

Изд. 2-е. 06

Ульянов С. А.

Эл. магнитные переход. процессы в эл.
системах

621.316

У-51

С. А. Ульянов

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ
ПЕРЕХОДНЫЕ
ПРОЦЕССЫ

В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

С. А. УЛЬЯНОВ

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА

1964

ЛЕНИНГРАД

**Книга выпущена к шестидесятилетнему юбилею
Московского ордена Ленина энергетического института**

ЭЭ-5-3(2)

УДК 621.311.014.3

У 51

В книге рассмотрены электромагнитные переходные процессы в электрических системах и даны методы их расчета. Применение методов иллюстрировано числовыми примерами.

Книга предназначена для инженерно-технических работников и может быть также использована как учебное пособие студентами и аспирантами электротехнических и энергетических вузов и факультетов.

Ульянов Сергей Александрович.

Электромагнитные переходные процессы в электрических системах.

М.—Л., издательство «Энергия». 1964.

704 с. с черт. и илл.

Тематический план 1964 г., № 95

Редактор *И. П. Крючков*

Техн. редактор *Г. С. Юдаева*

Сдано в набор 2/VI 1964 г.

Подписано к печати 29/VIII 1964 г.

Т-12835 Бумага 84×108¹/₃₂

36,08 печ. л.

Уч.-изд. л. 38,15

Тираж 10 000

Цена 2 р. 06 к.

Зак 1325

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Государственного комитета Совета Министров СССР по печати.
Шлюзовая наб., 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемая вниманию читателя книга в значительной мере отличается от ранее написанной автором книги «Короткие замыкания в электрических системах», последнее издание которой вышло в 1952 г. Помимо процессов короткого замыкания, в данной книге рассмотрены также некоторые другие электромагнитные переходные процессы (форсировка возбуждения синхронных машин, гашение магнитного поля машин, повторные включения и отключения цепей), в силу чего ей дано более общее название. При этом следует сразу оговорить принятую условность: сюда не входят переходные процессы, которые рассматриваются в технике высоких напряжений.

В настоящей книге помещено много нового материала, а прежний почти полностью заново переработан.

Математический анализ переходного процесса синхронной машины проведен на основе теории двух реакций с использованием преобразования Лапласа. Как общий случай рассматривается машина с явно выраженными полюсами, причем, чтобы упростить выкладки, вначале предполагается, что у нее нет демпферных обмоток. В дальнейшем рассмотрено влияние таких обмоток.

Отсутствие общепринятых обозначений для всех переменных величин, выражаемых во вращающейся вместе с ротором системе координат, существенно затрудняет пользование разными литературными источниками. По этому поводу уже немало статей было опубликовано в периодической печати. В данной книге использованы обозначения, которые совместно приняты наиболее заинтересованными кафедрами (электрических машин, электрических систем и электрических станций) Московско-

го энергетического института при участии редакции издательства «Энергия».

Наряду с аналитическим исследованием в книге уделено значительное внимание физической стороне рассматриваемых процессов. Наиболее трудные и сложные места автор стремился изложить подробнее и как можно яснее, отступая иногда в рамках допустимого от строгости трактовки. Большое количество числовых примеров иллюстрирует все наиболее важные и принципиальные положения и рассматриваемые вопросы.

В связи с проводимыми изменениями учебных планов материал данной книги может представлять самостоятельный курс или входить в другие смежные специальные дисциплины. Построение книги и распределение материала в ней выполнено таким образом, что для учебных целей книгой можно пользоваться выборочно. Некоторые сведения, которые имеют более специальный и углубленный характер, а также вспомогательные материалы, примеры, вопросы и задачи набраны мелким шрифтом.

Для большей активизации самостоятельной работы учащихся (что важно как при очной, так и особенно при заочной системах обучения) в конце каждой главы помещены вопросы и задачи.

Автор надеется, что данная книга будет полезной также для инженерно-технических работников в их практической деятельности и особенно для тех из них, кто работает в области релейной защиты и автоматизации электрических систем. Интересы последних автор часто имел в виду при подборе и изложении ряда вопросов, а также многих числовых примеров.

Несмотря на значительный объем книги, в ней все же не представлялось возможным охватить все вопросы, которые относятся к рассматриваемым процессам и которые интересуют электроэнергетику. В частности, представляет интерес выяснить влияние насыщения магнитных систем и его практический учет, образование и учет высших гармоник, вопросы физического и математического моделирования электромагнитных переходных процессов, протекание таких процессов в условиях длинных линий и другие вопросы. Систематическое изложение подобных специальных вопросов автор намерен дать в отдельной монографии, работа над которой им проводится

в настоящее время. Сейчас же для знакомства, в частности, с процессом короткого замыкания в длинных линиях и его расчетом читатель должен обратиться к опубликованным работам, основные из которых указаны в перечне [Л. 141—146], помещенном в конце книги.

Автор считает своим приятным долгом выразить благодарность доктору техн. наук, проф. Н. И. Соколову за все замечания, сделанные им при работе автора над рукописью, и доктору техн. наук, проф. И. М. Марковичу, проводшему рецензирование рукописи и сделавшему ряд замечаний и предложений, которые учтены при окончательном редактировании.

С благодарностью автор отмечает большую работу канд. техн. наук, доц. И. П. Крючкова по тщательному редактированию рукописи и подбору части материала для приложений.

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

С. Ульянов

Абрамцево, 1964

ВВЕДЕНИЕ

Надежность работы электрической системы и ее отдельных элементов во многом зависит от того, насколько правильно и полно учтены опасные проявления возникающих в ней переходных процессов, которые могут быть вызваны как случайно, так и преднамеренно.

В то время как теория установившихся режимов рано встала на правильный путь и быстро приспособилась к нуждам практики, сущность переходных процессов еще долго оставалась невыясненной. Изучение этой сущности, конечно, не может быть самоцелью. Познание ее необходимо прежде всего, чтобы предотвратить возникновение опасных переходных процессов и выработать меры борьбы с их вредными последствиями. Чем глубже проникновение в природу этих процессов, тем достигается большая возможность сознательного управления ими.

На примере развития электромашиностроения нетрудно проследить, насколько важен учет явлений, например, при коротких замыканиях.

Первоначальные конструкции электрических машин выполнялись в соответствии лишь с требованиями нормальной длительной работы. Пока мощности машин были малы и вопросам экономичного расходования применяемых материалов не уделялось достаточное внимание, эти конструкции обладали «естественным» запасом устойчивости против механических и тепловых действий токов короткого замыкания. Однако такое положение существовало недолго. По мере роста мощностей машин и стремления к наиболее рациональному использованию материалов выяснялось, что для создания надежной конструкции одних требований нормальной работы недоста-

точно. Неоднократные случаи крупных повреждений машин при коротких замыканиях послужили наглядным доказательством этого. Внимание конструкторов было привлечено к разработке специальных мероприятий, которые обеспечивали бы должную надежность машины и при аварийных условиях. Успех этих мероприятий находился в непосредственной зависимости от точности располагаемых знаний о самом процессе короткого замыкания. С углублением изучения последнего открывались новые конструктивные решения. Так постепенно создавались все более надежные конструкции электрических машин. В современном исполнении электрические машины являются одним из надежных элементов электрической системы. Разумеется, эта надежность достигнута с учетом не только явлений коротких замыканий, но также всех прочих явлений и условий, в которых работает электрическая машина.

Аналогичные примеры можно привести из области электроаппаратостроения. В конструкции каждого современного электрического аппарата имеются особенности, продиктованные условиями его работы при коротких замыканиях.

Специальные требования, вытекающие из условий протекания переходных процессов, выдвигаются к параметрам электрических машин, системам их возбуждения, устройствам релейной защиты и автоматизации, выполнению линий связи и при решении других вопросов.

Таким образом, с развитием техники необходимость исследования переходных процессов постепенно приобретала все более важное значение. Этому способствовало также непрерывное повышение требований со стороны потребителей электрической энергии в отношении их надежного электроснабжения.

С применением все более высоких напряжений, развитием электрических сетей и линий передачи, осуществлением параллельной работы электрических станций, т. е. образованием электрических систем, круг вопросов, подлежащих разрешению, непрерывно увеличивался. Жизнь выдвигала перед электриками ряд новых задач. Многие вопросы, по которым раньше были получены решения, в новых условиях стали приобретать иную значимость и требовали существенного пересмотра. Из ряда родственных задач и вопросов образовались отдельные пробле-

мы, как-то: проблема защиты от перенапряжений, проблема коротких замыканий, проблема устойчивости электрических систем, проблема защиты линий связи от влияния линий электропередачи и др.

Все эти проблемы в той или иной мере взаимно связаны, в силу чего их разделение является условным. Однако последнее целесообразно ввиду различия задач и вопросов, относящихся к каждой проблеме, что позволяет для их анализа и практического решения исходить из разных предпосылок и допущений.

Тесно связаны, например, проблемы коротких замыканий и динамической устойчивости электрических систем. Обе они касаются по существу одного и того же переходного процесса в электрической системе, но поскольку в каждой из них практический интерес представляют изменения различных параметров (при коротком замыкании — изменение главным образом токов, а при динамической устойчивости — в частности, колебания угла между э. д. с. генераторов), это позволяет строить методику соответствующих расчетов, исходя из разных предпосылок и допущений. Для получения более точного решения обе указанные проблемы следует рассматривать совместно.

Из сказанного следует, что мероприятия, вытекающие из рассмотрения одной проблемы, в какой-то мере влияют на другие. Иногда требования различных проблем находятся во взаимном противоречии. Так, например, для уменьшения величины токов короткого замыкания было бы желательным снижение возбуждения генераторов (что в прежнее время и осуществлялось), но это недопустимо по условиям устойчивости станций и нагрузки, для обеспечения которой обычно требуется, напротив, быстрый подъем возбуждения генераторов в аварийном режиме.

Надежная работа электрических систем может быть достигнута лишь при одновременном учете всех факторов, определяемых различными проблемами, что позволяет в конечном итоге найти наиболее рациональное комплексное решение.

Проблемы, связанные общностью основных исходных предпосылок, могут быть объединены в укрупненные группы. Так, к одной из них можно отнести электромагнитные переходные процессы, исследуемые в предположе-

нии, что все участвующие в заданной системе электрические машины в течение переходного процесса сохраняют скорость вращения постоянной. Именно такого характера переходные процессы [дополнительно ограниченные рядом допущений (§ 2-1)] рассмотрены ниже, причем наибольшее внимание уделено процессам при коротких замыканиях, поскольку последние являются самой распространенной причиной возникновения переходных процессов, связанных с многочисленными опасными последствиями.

Указанное предположение о постоянстве скорости вращения электрических машин, вообще говоря, находится в соответствии с современной тенденцией возможного сокращения времени отключения поврежденного участка или элемента системы. Если раньше это время составляло секунды и редко значительные доли секунды, то теперь в необходимых случаях оно может быть снижено до десятых и даже сотых долей секунды. За столь короткий промежуток существенных качаний машин обычно не возникает. Однако в отдельных случаях имеют место исключения, и тогда для получения достаточно надежных результатов расчета необходимо вводить хотя бы приближенный учет таких качаний.

С переходными процессами в электрических цепях, где все элементы являются статическими, читатель знаком из курса теоретических основ электротехники. Принципиально новое в характер протекания электромагнитного переходного процесса вносят вращающиеся электрические машины. Благодаря непрерывному изменению взаимной индукции между обмотками статора и ротора дифференциальные уравнения переходного процесса содержат периодически изменяющиеся коэффициенты. Следовательно, даже при пренебрежении насыщением магнитной системы машины переходный процесс выражается системой нелинейных дифференциальных уравнений, что вносит большие трудности в их решение. Дополнительные осложнения вызываются тем, что роторы некоторых типов машин несимметричны в электромагнитном отношении и на них размещено несколько различных обмоток.

Достаточно полная разработка теории переходных процессов в электрических машинах началась лишь в начале текущего столетия. Первые работы в этом направ-

лении были выполнены Дрейфусом (Dreyfus). В конце 20-х годов, используя предложенную Блонделем (Blondel) теорию двух реакций, Парк (Park) разработал основы строгой теории переходных процессов в синхронных машинах. Это послужило известным толчком к быстрому развитию дальнейших исследований в области переходных процессов в электрических машинах и системах. Они интенсивно проводились в Советском Союзе и за рубежом, главным образом в США. Особое место среди них занимают исследования, проведенные А. А. Горевым.

За истекший период по вопросам переходных процессов создана огромная литература (монографии, статьи, учебники и учебные пособия), часть которой указана в конце книги.

Наряду с теоретическими исследованиями переходных процессов существенно важной являлась своевременная разработка практических методов расчета таких процессов. Это выдвигалось требованиями быстро развивавшейся электрификации нашей страны и необходимостью решать в связи с этим все новые задачи. К выполнению такой работы были привлечены научно-исследовательские институты (ВЭИ и др.), крупные энергетические объединения (Мосэнерго, Ленэнерго) и проектные организации (Теплоэлектропроект), где были созданы специальные группы. Для координации проводимых работ, обобщения полученных результатов, подготовки соответствующих рекомендаций и руководящих указаний были созданы специальные комиссии. Так, в 30-х годах под председательством К. А. Круга работала комиссия по созданию руководящих указаний по расчету коротких замыканий. Аналогичные комиссии под председательством Л. И. Сиротинского были заняты подготовкой руководящих указаний по защитным заземлениям и руководящих указаний по расчету влияний линий электропередачи на провода связи. Систематический пересмотр и уточнение такого рода руководящих указаний проводились в последующие годы.

Теоретические исследования и практические методы расчета переходных процессов в электрических системах требуют экспериментальной проверки. С этой целью часто используют записи автоматических приборов и аппаратов, которыми все более полно оснащаются современные электрические системы. Однако такие проверки по-

сят скорее случайный характер и не позволяют в должной мере выявить влияние различных факторов на протекание переходного процесса или допустимость намечаемых упрощений в практических методах расчета.

Проведение экспериментов по специальной программе непосредственно в натуральных условиях, т. е. в реальных электрических системах, связано с рядом трудностей эксплуатационного характера, дополнительными затратами и, наконец, известным риском возможности нарушения нормального электрообеспечения хотя бы части потребителей. Поэтому создание искусственных аварийных условий в электрических системах для указанных целей обычно практикуется лишь в исключительных случаях, когда это вызвано крайней необходимостью.

В этом отношении оказалось весьма эффективным использование специальных моделей, на которых можно воспроизвести исследуемые переходные процессы. В зависимости от задачи исследования такие модели выполняют на основе различных принципов и в конструировании их применяют различные решения.

Наиболее наглядным представлением электрической системы является ее физическая модель, где все элементы (с присущими им параметрами и характеристиками) воспроизведены в некотором уменьшенном масштабе. Такое аналоговое устройство обычно называют динамической моделью электрической системы. Если в модели обеспечено близкое соответствие с оригиналом, то любой переходный процесс в ней подобен соответствующему действительному процессу. При этом само исследование проводят по снятым на модели осциллограммам, а наиболее трудная работа по составлению и решению уравнений данного процесса вообще отпадает.

По мере усложнения электрической системы создание ее полной динамической модели встречает все большие трудности и требует значительных затрат. Кроме того, при таком моделировании затруднено широкое варьирование параметров элементов (особенно электрических машин). В силу указанных причин динамические модели создают для относительно простых систем и используют преимущественно при проведении научных исследований.

Когда электрическая машина представлена соответствующей схемой замещения, задача моделирования резко упрощается. В данном случае моделирование элек-

трической системы может быть выполнено уже на статической модели цепей переменного тока, применение которой существенно упрощает аналитическое решение. При однородных сопротивлениях всех элементов системы (например, чисто индуктивных) такая модель выполняется на постоянном токе. Благодаря сравнительной простоте и меньшей стоимости статические модели уже свыше 30 лет широко используют при исследованиях и выполнении расчетов для решения многих проектных и эксплуатационных задач. Такие модели конструируют универсального типа, т. е. пригодные для любой системы, или в виде стационарных установок, специально предназначенных для конкретной системы.

В отличие от физического моделирования статические модели по существу воспроизводят математическое моделирование электрических систем, причем в зависимости от исходных допущений последнее может иметь большую или меньшую погрешность по сравнению с действительностью. Как видно, математическое моделирование не освобождает от составления уравнений, описывающих рассматриваемый процесс, и разработки необходимых методов расчета такого процесса, но оно почти полностью исключает всю вычислительную работу, что имеет весьма большое значение.

Возможности математического моделирования в последние годы резко возросли благодаря применению электронных вычислительных машин как непрерывного действия (машины-аналоги), так и дискретного (цифровые машины). Эти машины позволяют с большой полнотой и наглядностью воспроизвести интересующий переходный процесс, проследить влияние отдельных параметров и различных факторов на протекание этого процесса. Особенно перспективными являются возможности комбинированного использования статических моделей и электронных вычислительных машин.

Вопросы физического и математического моделирования в последнее время образовали самостоятельную научную область, развитие которой протекает весьма интенсивно. Лишь за несколько последних лет по этим вопросам опубликовано большое число научных статей и монографий. В настоящей книге вопросы моделирования не рассматриваются, и для знакомства с ними читатель должен обратиться к специальной литературе.

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И УКАЗАНИЯ

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ

1-1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Из всего разнообразия электромагнитных переходных процессов в системе с сосредоточенными постоянными наиболее распространенными являются процессы, вызванные:

а) коротким замыканием в системе, а также повторным включением и отключением (одновременным или каскадным) короткозамкнутой цепи;

б) возникновением местной несимметрии в системе;

в) действием форсировки возбуждения синхронных машин;

г) развозбуждением синхронных машин или гашением их магнитного поля.

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 расположения точки короткого 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.

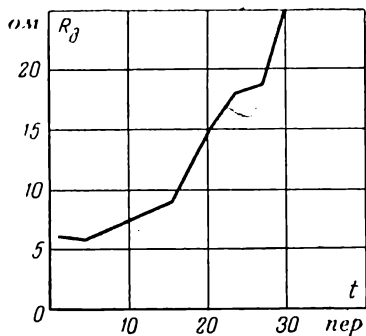


Рис. 1-1. Характер изменения сопротивления электрической дуги в зависимости от времени.

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 изоляторов, или через некоторый промежуток, когда перегорит элемент, вызвавший замыкание.

При замыканиях между фазами переходное сопротивление определяется главным образом сопротивлением электрической дуги R_d .

Проведенные исследования электрической дуги [Л. 35] показали, что при достаточно больших величинах токов (сотни ампер и более) быстро прогревающийся ствол дуги обуславливает в ней градиент напряжения, который почти не зависит от величины тока; при этом максимальное мгновенное значение этого градиента составляет около 1,4—1,5 кВ/м длины дуги. В соответствии с этим сопротивление электрической дуги (действующее значение) R_d , которое может быть принято почти чисто активным, можно оценить как

$$R_d \approx \frac{1000}{I_d} l_d, \text{ ом}, \quad (1-1)$$

где I_d — действующее значение тока в дуге, а;

l_d — длина дуги, м.

Поскольку ток в дуге и длина дуги изменяются в процессе замыкания, сопротивление дуги также изменяется во времени. Оно имеет наименьшую величину в начальной стадии процесса, когда ток в дуге достигает наибольшего значения, а длина дуги, напротив, минимальна. С течением времени сопротивление дуги быстро возрастает, как это видно из приведенной на рис. 1-1 характерной кривой.

В ряде других 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 худших условий, считая, что в месте замыкания отсутствуют какие-либо переходные сопротивления.

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

- а) трехфазное;
- б) двухфазное;
- в) однофазное;
- г) двухфазное на землю, т. е. замыкание между двумя фазами с одновременным замыканием той же точки на землю.

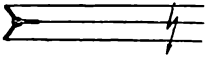
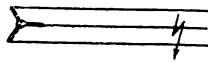
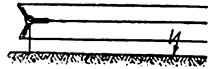
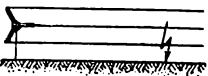
Трехфазное короткое замыкание является симметричным, коль скоро при нем все фазы остаются в одинаковых условиях¹. Напротив, все остальные виды коротких замыканий являются несимметричными, поскольку при каждом из них фазы находятся уже в неодинаковых условиях; поэтому системы токов и напряжений при этих видах короткого замыкания в той или иной мере искажены.

Многолетняя аварийная статистика по союзным и зарубежным системам показывает, что при глухо заземленной нейтрали относительная вероятность различных основных видов короткого замыкания характеризуется примерными данными табл. 1-1. В той же таблице пока-

¹ При наличии переходных сопротивлений симметрия сохраняется лишь при равенстве этих сопротивлений.

Таблица 1-1

**Относительная вероятность и сокращенные обозначения
различных видов короткого замыкания**

Вид 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		~~$K^{(2)}$~~	20

ваны рекомендуемые сокращенные обозначения каждого вида короткого замыкания.

Как видно из приведенной таблицы, подавляющее число коротких замыканий связано с замыканиями 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 окончательных суждений относительно возможности работы системы в условиях короткого замыкания. С другой стороны, само изучение процесса трехфазного короткого замыкания особенно важно в связи с тем, что применение метода симметричных составляющих позволяет величины токов и напряжений прямой последовательности любого

несимметричного замыкания определять как соответственные величины при некоторых условных трехфазных замыканиях (см. § 15-5).

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

При возникновении коротких замыканий возможны также одновременные нарушения симметрии трехфазной цепи. В качестве примера можно привести случай, когда при обрыве провода воздушной линии один его конец, расположенный близко к точке подвеса, остается изолированным, а другой, упав на землю, образует однофазное короткое замыкание; в данном случае однофазное короткое замыкание сопровождается одновременным обрывом поврежденной фазы. Такие виды повреждений называют сложными.

К сложным видам повреждений относятся также одновременные короткие замыкания в различных точках системы. Здесь возможны самые разнообразные комбинации и сочетания из указанных основных видов короткого замыкания. Одним из частых видов таких повреждений является замыкание на землю разных фаз в различных точках сети с изолированной нейтралью.

Местное нарушение симметрии трехфазной цепи может произойти помимо короткого замыкания. Так, например, наблюдались случаи обрыва цепи одной фазы отключающего аппарата или, напротив, отказ в отключении одной фазы такого аппарата (например, из-за сваривания контактов одной фазы). Оно также имеет место при пофазном ремонте оборудования (например, линии передачи, группы из однофазных трансформаторов и др.) Такие нарушения симметрии трехфазной цепи называют продольной несимметрией в отличие от несимметричной нагрузки или несимметричных коротких замыканий, которые по существу представляют различные виды поперечной несимметрии.

Любое несимметричное короткое замыкание в сети, работающей в неполнофазном режиме, является уже сложным видом повреждения.

Практикой эксплуатации электрических систем установлено, что большая часть возникающих повреждений, особенно на воздушных линиях, имеет преходящий 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 грозовыми разрядами. После отключения линии электрическая прочность воздушного промежутка восстанавливается в течение небольшого интервала 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 воздушных линиях преобладают замыкания одной фазы, часто производят отключение только поврежденной фазы с последующим однофазным автоматическим повторным включением (ОАПВ). Наконец, помимо однократного выполняют также многократное автоматическое повторное включение с соответствующими ступенями времени его действия.

Наглядной иллюстрацией эффективности автоматического повторного включения могут служить данные табл. 1-2, представляющие итоги работы устройств автоматического повторного включения за 1961 г. по союзным энергосистемам¹. Как видно, на воздушных линиях относительное число самоустраняющихся повреждений, которому соответствует успешная работа автоматического повторного включения, составляет значительное большинство всех повреждений на них, причем оно существенно возрастает с увеличением напряжения линии, достигая почти 85%¹ при напряжениях 220 кВ и выше. В кабельных линиях, как и следовало ожидать, число самоустраняющихся повреждений заметно меньше, чем в воздушных. Оно составляет примерно половину общего числа повреждений в кабелях.

При неуспешном автоматическом повторном включении, т. е. когда возникшее повреждение в цепи сохрани-

¹ См. Информационные материалы № 69 Всесоюзного научно-исследовательского института электроэнергетики, Госэнергоиздат, 1963.

Работа автоматического повторного включения

Место установки АПВ	Успешно	Неуспешно
	в процентах общего числа	
Воздушные линии 2—10 кв	62,5	37,5
То же 20—35 кв	76,2	23,8
То же 110—154 кв	79,2	20,8
То же 220—330 кв	84,5	15,5
Кабельные линии всех напряжений	52,7	47,3
Шины и трансформаторы	81,7	18,3

лось, весь переходный процесс состоит из нескольких этапов. Первый из них наступает в момент возникновения короткого и продолжается до отключения поврежденного участка. Вторым этапом является пауза (порядка 0,5 сек) до момента повторного включения. С последнего наступает третий этап, продолжающийся до нового отключения того же участка. При многократном автоматическом повторном включении число этапов соответственно возрастает¹. 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 одновременно (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 в о з б у ж д е н и я синхронных машин, которую обеспечивают специальные устройства авто-

¹ Пауза перед вторым повторным включением значительно больше, чем перед первым таким включением. Она определяется характеристиками самого выключателя; ее порядок 120—180 сек.

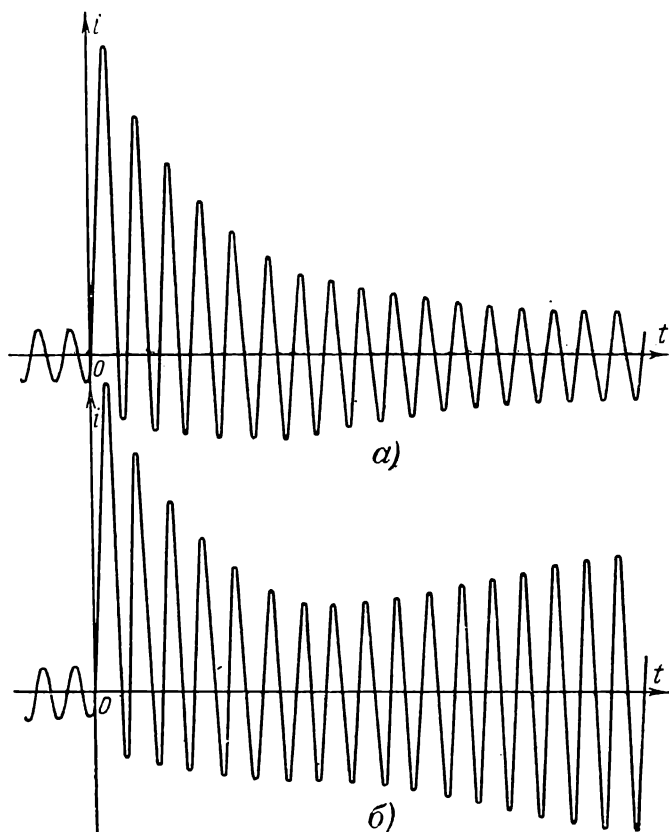


Рис. 1-2. Осциллограммы токов при внезапном коротком замыкании.

а — при отсутствии автоматического регулирования возбуждения;
б — при наличии автоматического регулирования возбуждения.

матического регулирования возбуждения (АРВ), происходит при снижении напряжения, которое может быть 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. Про-

цесс 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 регули-

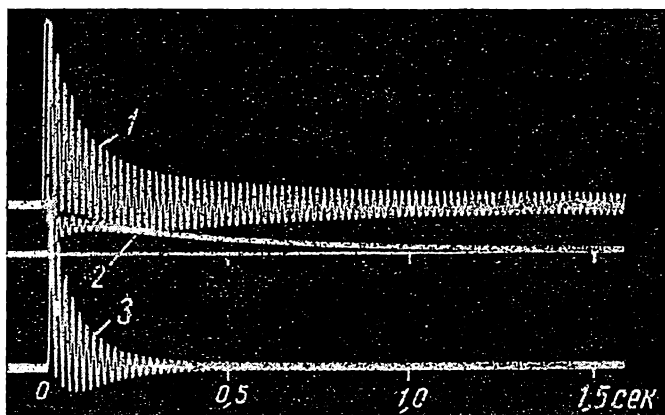


Рис. 1-3. Осциллограммы токов в фазе статора (1), обмотке возбуждения (2) и демпферной обмотке (3) синхронного генератора при внезапном трехфазном коротком замыкании на его выводах.

рования 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 относительно генератора.

Для дополнительной иллюстрации характерных переходных процессов приведем несколько снятых экспери-

ментально осциллограмм. На рис. 1-3 показаны осциллограммы токов в фазе статора, обмотке возбуждения и демпферной обмотке синхронного генератора мощностью 50 Мвт при внезапном трехфазном коротком замыкании на его выводах. До короткого генератор работал на холостом ходу и его АРВ было отключено. На рис. 1-4 приведены осциллограммы тока фазы статора асинхронно-

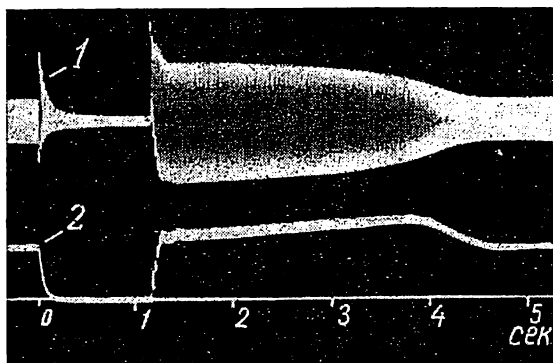


Рис. 1-4. Осциллограммы тока фазы статора (1) асинхронного двигателя и потребляемой им активной мощности (2) при трехфазном коротком замыкании и при самозапуске двигателя после отключения короткого замыкания.

го двигателя 600 кВт и потребляемой им активной мощности при трехфазном коротком замыкании вблизи двигателя и при его дальнейшем самозапуске после отключения короткого (спустя примерно 1,2 сек).

1-2. ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И СЛЕДСТВИЯ

Основной причиной возникновения рассматриваемых далее 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 земляных работах и т. п.). В практике наблюдались случаи, когда короткие замыкания возникали от перекрытия токоведущих частей животными и птицами.

В последнее время все более широкое применение находят упрощенные схемы электрических соединений понижающих подстанций. Здесь в цепях трансформаторов на стороне высшего напряжения не ставят выключателей; это существенно снижает стоимость подстанций. При повреждении самого трансформатора, что, вообще говоря, бывает очень редко, его отключение производит выключатель, установленный в начале питающей линии. При этом, для того чтобы данный выключатель пришел в действие, должен быть создан определенной величины ток короткого замыкания. С этой целью около трансформатора устанавливают специальный аппарат — короткозамыкатель (т. е. аппарат, создающий искусственное короткое замыкание), действующий при каком-либо повреждении трансформатора. После отключения линии короткозамыкатель автоматически отсоединяется специальным отделителем¹. Затем линия вновь включается отключившим ее выключателем, который приходит в действие от устройства автоматического повторного включения. В системах с заземленной нейтралью, очевидно, достаточно иметь короткозамыкатель на одной фазе, а в системах с изолированной нейтралью — на двух фазах.

Таким образом, наряду с короткими замыканиями случайного характера в системах имеют место также преднамеренные короткие замыкания, вызываемые действием установленных короткозамыкателей. При этом следует подчеркнуть, что преднамеренные короткие замыкания не являются первопричиной, а используются в качестве импульса для быстрого отключения уже возникшего повреждения.

Относительное распределение общего числа повреждений (как-то: короткие замыкания, перегрузки, обрывы и пр.) по месту их возникновения в электрической системе можно характеризовать следующими средними данными:

В воздушных и кабельных сетях	44,5%
В электрической части станций и подстанций	55,5%

Социалистическое хозяйство предъявляет особые требования к безаварийному электроснабжению всех потре-

¹ Стоимость короткозамыкателя с отделителем значительно меньше стоимости выключателя на то же номинальное напряжение.

бителей электроэнергии. Поэтому внимание и усилия работников в области электроэнергетики должны быть направлены на соблюдение этих требований. Для этого должно быть в первую очередь обеспечено тщательное и строгое соблюдение установленных Правил технической эксплуатации электрических установок. Помимо того, для повышения надежности работы последних необходимы дальнейшее улучшение качества выпускаемой электротехническими заводами продукции, создание и применение новых видов высококачественной электрической изоляции, разработка и выпуск новых, более совершенных типов конструкций как отдельных аппаратов, так и установок в целом.

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 может составлять лишь незначительную долю номинального тока питающих генераторов и возникновение такого короткого воспринимается ими как небольшое увеличение нагрузки. Сильное снижение напряжения получается вблизи места 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 частях системы. Равным образом обрыв фазы слабо загруженной цепи не вызывает заметных последствий в остальной части системы.

Ток короткого замыкания, даже в тех случаях, когда он достаточно мал по сравнению с номинальным током генератора, обычно во много раз превышает номинальный ток самой аварийной ветви. Поэтому и при кратковременном протекании 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 начале коротко-

го замыкания, когда ток достигает максимума. При недостаточной прочности проводников и их креплений они при коротком замыкании могут быть разрушены.

Глубокое снижение напряжения и резкое искажение его симметрии, которые возникают при коротких замыканиях и образовании продольной несимметрии, вредно отражаются на работе потребителей. Так, уже при понижении напряжения на 30—40% в течение одной и более секунд двигатели промышленного предприятия могут остановиться, что вызовет большой народнохозяйственный ущерб. Помимо того, останов двигателей может привести к нарушению статической устойчивости системы. Следует отметить, что ряд промышленных производств вообще не допускает никаких (даже кратковременных) перерывов в подаче энергии.

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

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 оно отражается на всей системе.

1-3. НАЗНАЧЕНИЕ РАСЧЕТОВ И ТРЕБОВАНИЯ К НИМ

При проектировании и эксплуатации электрических установок и систем для решения многих технических вопросов 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 указанные величины находят для заданного момента 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 решения которых производят такие расчеты, относятся:

а) сопоставление, оценка и выбор схемы электрических соединений;

б) выявление условий работы потребителей при аварийных режимах;

в) выбор аппаратов и проверка проводников по условиям их работы при коротких замыканиях;

г) проектирование и настройка устройств релейной защиты и автоматизации;

д) определение влияния линий электропередачи на провода связи;

е) проектирование защитных заземлений;

ж) подбор характеристик разрядников для защиты от перенапряжений;

з) оценка и определение параметров устройств гашения магнитного поля синхронных машин;

и) оценка систем возбуждения синхронных машин;

к) проведение различных испытаний;

л) анализ произошедших аварий.

Особенностью расчетов для решения 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 расчетов.

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 часто требуется выявить как возможные наибольшие, так и возможные наименьшие величины токов и напряжений, сдвиг между ними в отдельных фазах, их распределение в схеме и т. п. Не меньшие требования предъявляются к расчетам для анализа аварий.

Краткие сведения о расчетных условиях даны в § 2-2.

1-4. ВОПРОСЫ

1. Что называют коротким замыканием и простым замыканием?
2. От каких факторов зависит сопротивление электрической дуги и в чем трудность его учета?
3. Каковы основные виды коротких замыканий в одной точке и какова относительная вероятность их возникновения в системах с глухозаземленной нейтралью?
4. Что называют продольной несимметрией?
5. Что называют сложными видами повреждений?
6. Из каких этапов состоит переходный процесс при применении автоматического повторного включения?
7. В чем заключается форсировка возбуждения синхронной машины на протекании переходного процесса?
8. Когда и с какой целью производят гашение магнитного поля синхронной машины?
9. Каковы основные причины возникновения коротких замыканий?
10. В чем проявляются опасные следствия коротких замыканий?
11. С какой целью производят практические расчеты электромагнитных переходных процессов?
12. В чем состоит различие в требованиях к практическим расчетам электромагнитных переходных процессов?

ГЛАВА ВТОРАЯ

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТОВ

2-1. ОСНОВНЫЕ ДОПУЩЕНИЯ

Коль скоро анализ и расчет электромагнитного переходного процесса в современной электрической системе с учетом всех действительных условий чрезвычайно сложны и практически невыполнимы, то с целью упрощения как в исходные условия, так и на промежуточных этапах решения вводят ряд допущений. Последние зависят главным образом от характера исследуемой задачи. Те допущения, которые оказываются пригодными при исследовании и решении одной задачи, могут быть совершенно неприемлемыми при исследовании и решении другой.

Каждый из практических методов расчета переходных процессов, в частности процесса короткого замыкания, основан на некоторых специфических допущениях, касающихся преимущественно возможности использования упрощенных представлений об изменении свободных токов в сложных схемах (с несколькими генераторами или станциями), о разных способах учета автоматиче-

ского регулирования возбуждения и т. п. Поэтому приводить здесь полный перечень всех возможных допущений нецелесообразно, так как ориентироваться в них и представить их значимость читатель еще не может.

В силу указанного остановимся только на некоторых основных допущениях, которые, как правило, принимают при решении большинства практических задач, связанных с определением токов и напряжений при электромагнитных переходных процессах. К числу таких допущений следует отнести:

а) Отсутствие насыщения магнитных систем. Это допущение приводит все схемы к линейным, что сильно упрощает проведение любых исследований происходящих в схеме установившихся и переходных процессов, в частности позволяет использовать принцип наложения в любых его формах.

б) Отсутствие намагничивающих токов у трансформаторов и автотрансформаторов. Данное допущение вполне пригодно во всех случаях, за редким исключением, когда в схеме нулевой последовательности участвует трехстержневой трансформатор с соединением обмоток Y_0/Y_0 (см. § 13-6).

в) Отсутствие несимметрии трехфазной системы. Это условие практически всегда выполнено для всех элементов системы. Оно нарушается обычно лишь для какого-либо одного элемента, что происходит в результате его повреждения или может быть вызвано умышленно по специальным соображениям (см. гл. 17).

г) Пренебрежение емкостными проводимостями. Обычно это допущение является вполне уместным и заметно не искажает результаты исследования, если в рассматриваемой схеме нет продольной компенсации индуктивности цепи, а также сверхдальних линий передачи напряжением выше 220 кВ. При рассмотрении простых замыканий на землю (см. § 15-11) это допущение, разумеется, совсем непригодно, так как в этом случае путь для тока замыкания осуществляется именно через емкостные проводимости.

д) Приближенный учет нагрузок. В зависимости от стадии переходного процесса нагрузку характеризуют некоторым постоянным сопротивлением.

е) Отсутствие активных сопротивлений. Это допущение практически приемлемо при исследовании переход-

ных процессов в основных звеньях высоковольтной части системы. Исключение составляют случаи, когда вводят учет сопротивления электрической дуги или когда рассматривается протяженная кабельная или воздушная сеть с мелкими сечениями проводов (особенно линии со стальными проводами). Говоря о пренебрежении активными сопротивлениями, здесь имеем в виду, что их не учитывают при определении начальных и конечных значений отдельных величин в переходном электромагнитном процессе, но их непременно вводят для определения постоянных времени затухания свободных составляющих этих величин. В этом заключается известная условность данного допущения.

ж) Отсутствие качаний генераторов. При рассмотрении лишь начальной стадии переходного процесса (т. е. в пределах до 0,1—0,2 сек с момента нарушения режима) это допущение обычно не вносит заметной погрешности. Однако если возникшее повреждение вызывает существенные качания генераторов или даже выпадение их из синхронизма, то при проведении более точных расчетов от этого допущения приходится отказываться и хотя бы приближенно вводить учет таких качаний (см. § 10-3, 11-8 и 16-6).

Остальные принимаемые допущения дополнительно указаны в ходе изложения дальнейшего материала при рассмотрении отдельных теоретических вопросов.

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 в рассматриваемой схеме включено наибольшее число генераторов, что вид короткого такой, при котором ток достигает наибольшей величины, что короткое металлическое и что оно произошло

непосредственно у выводов самого выключателя. Помимо того, к расчетным условиям в данном случае относится установление расчетного времени размыкания контактов выключателя и последовательности его операций (включение и отключение).

Для решения ряда вопросов, связанных с выбором и настройкой устройств релейной защиты и автоматики, часто приходится находить не наибольшие, а, напротив, наименьшие величины токов при коротких замыканиях. При этом, естественно, должны быть приняты совсем иные расчетные условия по сравнению с указанными выше. В них должны быть установлены соответствующие предшествующие режимы рассматриваемой электрической системы или отдельной ее части, указаны возможные точки короткого замыкания, виды коротких замыканий, последовательность отключения аварийного участка и т. п.

При определении токов, влияющих на провода связи, решающим фактором в расчетных условиях является указание о размещении заземленных нейтралей в системе.

При выборе схемы гашения поля синхронной машины и параметров элементов этой схемы необходимые расчеты производят для наиболее тяжелого предшествующего режима, которым может быть как режим короткого замыкания, так и режим холостого хода.

Приведенные примеры показывают, сколь велико разнообразие расчетных условий. Подробное выявление расчетных условий для конкретных технических задач является одним из важных вопросов соответствующих специальных курсов.

2-3. СИСТЕМА ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЕДИНИЦ

Представление любых физических величин не в обычных для каждой из них именованных единицах, а в относительных, безразмерных единицах позволяет существенно упростить многие теоретические выкладки и придать им обобщенный 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

очень широко используется, хотя на первый взгляд она может показаться несколько искусственной и даже излишней. Первоначальные трудности ее применения быстро преодолеваются, после чего ее преимущества выступают особенно ярко.

Под относительным значением какой-либо физической величины, как известно, следует понимать ее отношение к другой одноименной физической 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 междофазное напряжение приняты некоторые произвольные величины I_0 и U_0 . Тогда базисная мощность, очевидно, будет

$$S_0 = \sqrt{3} U_0 I_0 \quad (2-1)$$

и базисное сопротивление

$$z_0 = \frac{U_0}{\sqrt{3} I_0}, \quad (2-2)$$

т. е. оно подчинено закону Ома, с тем чтобы запись этого закона в именованных и относительных единицах была тождественной.

Из четырех рассмотренных базисных единиц только две могут быть выбраны произвольно, а две другие получаются из указанных соотношений. Фазные и междофазные базисные напряжения связаны между собой известными соотношениями для симметричной трехфазной системы. Следует подчеркнуть, что выбранные базисные единицы служат для измерения как полных величин, так и их составляющих (активных, реактивных и др.).

В соответствии с изложенным относительные э. д. с., напряжение, ток, мощность и сопротивление при выбранных базисных условиях определяются как:

$$E_{*(0)} = \frac{E}{U_0}; \quad (2-3)$$

$$U_{*(0)} = \frac{U}{U_0}; \quad (2-4)$$

$$I_{*(б)} = \frac{I}{I_б}; \quad (2-5)$$

$$S_{*(б)} = \frac{S}{S_б}; \quad (2-6)$$

$$z_{*(б)} = \frac{z}{z_б}, \quad (2-7)$$

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 можно опускать, если смысл выражения ясен из сопровождающего 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 $z_{*(б)}$ 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, одна и та же действительная величина может иметь разные численные значения при выражении ее в относительных единицах. Обычно относительные сопротивления элементов (генераторов, трансформаторов, реакторов и пр.) задаются при номинальных условиях (т. е. при I_n или S_n и U_n). Их величины определяются по (2-8) или (2-9),

где базисные единицы должны быть заменены соответствующими номинальными, т. е.

$$z_{*(н)} = \frac{\sqrt{3} I_{н} z}{U_{н}} \quad (2-8a)$$

и

$$z_{*(н)} = z \frac{S_{н}}{U_{н}^2}. \quad (2-9a)$$

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

$$z_{\%} = 100 z_{*}. \quad (2-10)$$

Как известно, напряжение короткого замыкания трансформатора задается обычно в процентах его номинального напряжения. Пренебрегая весьма малым его активным сопротивлением, можно считать $u_{к\%} = z_{\%} \approx x_{\%}$. 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.

Чтобы вести расчет в относительных единицах, очевидно, необходимо э. д. с. и сопротивления элементов схемы выразить в относительных единицах при выбранных базисных условиях. Если эти величины заданы в именованных единицах, то для перевода их в 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 производится по следующим соотношениям:

$$E_{*(б)} = E_{*(н)} \frac{U_{н}}{U_{б}}; \quad (2-11)$$

$$z_{*(б)} = z_{*(н)} \frac{I_{б}}{I_{н}} \cdot \frac{U_{н}}{U_{б}} \quad (2-12)$$

или

$$z_{*(б)} = z_{*(н)} \frac{S_{б}}{S_{н}} \cdot \frac{U_{н}^2}{U_{б}^2}. \quad (2-13)$$

При выборе базисных условий обычно следует руководствоваться соображениями, чтобы вычислительная работа была по возможности проще и порядок числовых значений относительных базисных величин был достаточно удобен для оперирования с ними. Поэтому для S_6 целесообразно принимать простое круглое число (1 000 *Мва*, 100 *Мва* и т. п.), а иногда часто повторяющуюся в заданной схеме номинальную мощность (или кратную ей). За U_6 рекомендуется принимать U_n или близкое к нему. При $U_6 = U_n$ пересчет относительных э. д. с. вообще отпадает ($E_{*(6)} = E_{*(n)}$), а выражения для пересчета относительных сопротивлений принимают более простой вид:

$$z_{*(6)} = z_{*(n)} \frac{I_6}{I_n} \quad (2-12a)$$

и

$$z_{*(6)} = z_{*(n)} \frac{S_6}{S_n}. \quad (2-13a)$$

Условие $U_6 = U_n$, вообще говоря, соблюдается только для части элементов, так как U_n элементов одной и той же электрической цепи в общем случае могут быть неодинаковы. Однако это различие сравнительно мало (в пределах 10%) и в приближенных расчетах им часто пренебрегают, полагая U_n 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 обычно составляют преобладающую часть общего сопротивления цепи, определение которого всегда желательно производить с большей точностью. В тех же 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 обязателен.

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 значе-

ний ряда величин, которые используются в дальнейшем изложении.

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

$$\omega_* = \frac{\omega}{\omega_b} = \frac{\omega}{\omega_c}. \quad (2-14)$$

Соответственно этому в качестве базисных единиц принимают:

$$\text{для индуктивности } L_b = \frac{z_b}{\omega_b} = \frac{z_b}{\omega_c};$$

для потокосцепления $\Psi_b = \frac{U_b}{\omega_b} = \frac{U_b}{\omega_c}$, т. е. потокосцепление, индуктирующее при базисной угловой скорости базисное напряжение.

Следовательно, если приняты указанные базисные единицы, то при сохранении угловой скорости неизменной и равной синхронной, очевидно, будем иметь:

$$x_{* (b)} = \omega_{*c} L_{* (b)} = L_{* (b)}; \quad (2-15)^*$$

$$\Psi_{* (b)} = I_{* (b)} L_{* (b)} = I_{* (b)} x_{* (b)}; \quad (2-16)$$

$$E_{* (b)} = \omega_{*c} \Psi_{* (b)} = \Psi_{* (b)}, \quad (2-17)$$

т. е. при таких условиях индуктивное сопротивление численно равно индуктивности, а потокосцепление численно равно э. д. с.

Возможность замены одних относительных величин численно равными им другими представляет одно из главных и существенных преимуществ системы относительных единиц.

Время также представляется удобным выражать в относительных единицах. За единицу его измерения принимают время, в течение которого ротор машины при синхронной скорости вращения повернется на 1 электрический радиан, т. е. базисное время $t_b = 1/\omega_c$, что при

* Вместо индуктивности L здесь может быть и взаимная индуктивность M .

частоте 50 гц составляет $t_6 = 1/314$ сек. Таким образом, время, выраженное в относительных единицах, будет

$$t_{*(6)} = \frac{t}{t_6} = \omega_c t; \quad (2-18)$$

при $f = 50$ гц

$$t_{*(6)} = 314 t. \quad (2-18a)$$

В предыдущем изложении предполагалось, что все элементы схемы связаны между собой только электрически. Применение системы относительных единиц к магнитносвязанным цепям приведено в следующем параграфе, а ее использование для роторных цепей синхронной машины, где имеют место некоторые особенности, рассмотрено в § 5-2 и 7-7.

2-4. СОСТАВЛЕНИЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ

При наличии трансформаторов (или автотрансформаторов) в схеме, как это практически всегда имеет место, для упрощения проводимых расчетов такую схему целесообразно предварительно представить схемой замещения. Другими словами, все имеющиеся в ней магнитносвязанные электрические цепи следует 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, которую принимают в данной схеме за основную. Само приведение осуществляется на основе соотношений, которые вытекают из общей 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 электрическая 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, нетрудно уста-

новить общие выражения для определения приведенных к основной ступени значений отдельных величин этой цепи:

$$\overset{\circ}{E} = (k_1 k_2 \dots k_n) E; \quad (2-19)$$

$$\overset{\circ}{U} = (k_1 k_2 \dots k_n) U; \quad (2-19a)$$

$$\overset{\circ}{I} = \frac{1}{(k_1 k_2 \dots k_n)} I; \quad (2-20)$$

$$\overset{\circ}{Z} = (k_1 k_2 \dots k_n)^2 Z, \quad (2-21)^*$$

т. е. истинные величины должны быть пересчитаны столько раз, сколько трансформаторов имеется на пути между приводимой цепью и принятой основной ступенью; при этом нужно иметь в виду, что такая запись формул пересчета предполагает, что коэффициенты трансформации определены *в направлении от выбранной основной ступени к той ступени, элементы которой подлежат приведению.*

Иногда смежные цепи могут быть связаны между собой в различных точках трансформаторами, коэффициенты трансформации которых несколько отличаются друг от друга. При связи через два трансформатора с коэффициентами трансформации k_1 и k_2 , как показал Н. А. Мельников, с достаточным приближением можно приводить одну цепь к другой по среднему коэффициенту трансформации, определяемому как

$$k = \sqrt{k_1 k_2}. \quad (2-22)$$

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 $Z_{*(n)}$, на основании (2-8a) или (2-9a) будет

$$Z = Z_{*(n)} \frac{U_n}{\sqrt{3} I_n} \text{ ом}, \quad (2-23)$$

или

$$Z = Z_{*(n)} \frac{U_n^2}{S_n} \text{ ом}. \quad (2-24)$$

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

Рассмотренное приведение по действительным коэффициентам трансформации связывающих трансформаторов для сокращения называют точным приведением. В отличие от него в практических расчетах часто используют приближенное приведение, позволяющее значительно быстрее и проще получить приближенную схему замещения. Применение последней обуславливается либо просто отсутствием сведений о действительных коэффициентах трансформации всех или части трансформаторов рассматриваемой схемы, либо тем, что применяемый метод нахождения интересующих величин настолько приближен, что нет смысла производить уточнения самой схемы замещения. Сущность приближенного приведения элементов к одной ступени трансформации состоит в следующем.

Для каждой ступени трансформации устанавливают среднее номинальное напряжение $U_{\text{ср}}$, а именно: 500; 330; 230; 154; 115; 37; 20; 15,75; 13,8; 10,5; 6,3; 3,15; 0,525 кВ, и при этом условно принимают, что номинальные напряжения всех элементов¹, находящихся на одной ступени, одинаковы и равны соответствующим значениям по указанной шкале. Тогда коэффициент трансформации каждого трансформатора, 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 весьма простой вид:

$$\overset{\circ}{E} = \frac{U_{\text{ср.б}}}{U_{\text{ср}}} E; \quad (2-25)$$

$$\overset{\circ}{U} = \frac{U_{\text{ср.б}}}{U_{\text{ср}}} U; \quad (2-25a)$$

$$\overset{\circ}{I} = \frac{U_{\text{ср}}}{U_{\text{ср.б}}} I; \quad (2-26)$$

$$\overset{\circ}{z} = \left(\frac{U_{\text{ср.б}}}{U_{\text{ср}}} \right)^2 z, \quad (2-27)$$

где $U_{\text{ср}}$ — среднее номинальное напряжение ступени, с которой производится пересчет;

$U_{\text{ср.б}}$ — то же выбранной основной (базисной) ступени.

¹ Кроме реакторов, о чем указывалось в § 2-3. —

Если элемент задан своим относительным сопротивлением $z_{* (n)}$, то его сопротивление в именованных единицах, приближенно приведенное к принятой основной ступени, легко определить по (2-24), вводя в последнее вместо U_n среднее номинальное напряжение основной ступени.

Приближенное приведение схемы вносит некоторую погрешность в расчет. Анализ этого вопроса изложен в § 2-5. Здесь же предварительно отметим, что такое приведение нужно использовать с известной осторожностью и при необходимости получения более надежных результатов приведение схемы следует производить по действительным коэффициентам трансформации участвующих в схеме трансформаторов. Это особенно относится к случаям, когда имеются трансформаторы с достаточно глубоким регулированием напряжения.

Найденные для схемы замещения токи и напряжения являются реальными только для той части схемы, ступень напряжения которой принята в качестве основной. Истинные токи и напряжения всех прочих участков схемы находят обратным пересчетом, исходя из (2-19a) и (2-20) или (2-25a) и (2-26).

До сих пор предполагалось, что сопротивления элементов схемы замещения и э. д. с. выражены 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. Последний, вообще говоря, можно рассматривать как непосредственное нахождение элемента схемы замещения, выраженного в относительных единицах.

Чтобы выкладки и решения имели более общий характер, целесообразно сохранить одинаковую форму записи любых уравнений независимо от того, принята ли система именованных или относительных единиц. В магнитносвязанных цепях этого можно достичь только при условии, если величины базисных единиц на стороне каждой из этих цепей взаимно связаны известными соотношениями, как это имеет место при переходе через трансформаторы. Следовательно, в данном случае произвольный выбор базисных единиц (вернее, части этих единиц) возможен лишь на какой-либо одной ступени трансформации и затем, уже в соответствии с ним, од-

нозначно устанавливаются базисные единицы на всех остальных ступенях рассматриваемой схемы. Иными словами, любая базисная единица на одной ступени по существу является соответствующей приведенной базисной единицей на другой ступени. Само собой разумеется, базисная мощность, а равным образом и другие базисные единицы, которые не зависят от трансформации (базисные скорость, время и пр.), на всех ступенях одинаковы.

Таким образом, если на какой-либо ступени выбраны U_6 и I_6 , то те же величины на другой ступени, связанной с первой через коэффициенты трансформации $k_1, k_2, \dots, k_n$, будут:

$$\dot{U}_6 = \frac{1}{k_1 k_2 \dots k_n} U_6; \quad (2-28)$$

$$\dot{I}_6 = (k_1 k_2 \dots k_n) I_6, \quad (2-29)$$

или, иначе,

$$\dot{I}_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \dot{U}_6}; \quad (2-30)$$

при этом, так же как и ранее, нужно считать, что $k_1, k_2, \dots, k_n$ определены в направлении от ступени, где выбраны U_6 и I_6 , к ступени, для которой находят базисные единицы.

Следовательно, для составления эквивалентной схемы замещения в относительных единицах нужно прежде всего на одной из ступеней заданной схемы выбрать базисные единицы и затем определить по ним соответствующие базисные единицы для каждой другой ступени. После этого по (2-3) — (2-9) и (2-11) — (2-13) следует подсчитать все величины в относительных единицах при базисных условиях, имея в виду, 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. Такой порядок приведения магнитно-связанной схемы, пожалуй, является наиболее простым и четким, так как при пересчете к базисным условиям в нем не требуется вводить в явной форме все промежуточные коэффициенты трансформации. Последние уже учтены в самих величинах базисных единиц. В справедливости такого приведения легко убедиться хотя бы на примере

выражения (2-9), введя в него вместо z его приведенное значение z , т. е.

$$\begin{aligned} z_{*(6)} &= z \frac{S_6}{U_6^2} = z (k_1 k_2 \dots k_n)^2 \frac{S_6}{U_6^2} = \\ &= z \frac{S_6}{\frac{1}{(k_1 k_2 \dots k_n)^2} U_6^2} = z \frac{S_6}{U_6^2}. \end{aligned}$$

При приближенном приведении схемы, когда действительные коэффициенты трансформации заменены отношениями соответствующих $U_{ср}$ по рекомендуемой шкале, пересчет к базисным условиям значительно упрощается, если за U_6 принимать значение $U_{ср}$ соответствующей ступени. В этом случае для приведения 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 напряжения¹. Что касается э. д. с. и напряжений, то при этих условиях их относительные номинальные и базисные значения, очевидно, совпадают.

Следует особо подчеркнуть, что точность расчета, конечно, не зависит от того, в какой системе единиц выражены элементы эквивалентной схемы замещения. Выше было показано, что эта схема при выражении ее элементов как в именованных, так и в относительных единицах может быть составлена либо точно, либо приближенно.

При пренебрежении током намагничивания трансформатора в схеме замещения последнего выпадает ветвь, отвечающая этому току. Для двухобмоточного трансформатора при этом отпадает необходимость определения сопротивлений отдельных его обмоток, так как его можно характеризовать суммарным сопротивлением, приведенным к стороне первичной или вторичной обмотки. Например, относя к первичной обмотке, имеем:

$$z = r_1 + \overset{\circ}{r}_2 + j(x_{\sigma 1} + \overset{\circ}{x}_{\sigma 2}) = r + jx_{\sigma},$$

где $r = r_1 + \overset{\circ}{r}_2$ — приведенное к первичной обмотке активное сопротивление трансформатора;

¹ Для пересчета сопротивления реактора упрощенные формулы непригодны, так как реактор одного номинального напряжения может быть установлен на стороне меньшего номинального напряжения.

$x_{\sigma} = x_{\sigma 1} + x_{\sigma 2}^{\circ}$ — то же, индуктивное сопротивление рассеяния трансформатора.

Используемые приближенные схемы замещения прямой и обратной последовательностей трансформаторов и автотрансформаторов с большим числом обмоток и с обмотками, расщепленными (разделенными) на параллельные ветви, приведены в приложении П-8, а в приложении П-7 даны некоторые типовые параметры трансформаторов и автотрансформаторов. Особенности схем замещения трансформаторов и автотрансформаторов для токов нулевой последовательности рассмотрены в § 13-6 и 13-7.

Магнитная связь в схеме возможна не только через обычные трансформаторы или автотрансформаторы. Цепи одного или разных напряжений могут быть связаны взаимной индукцией, влияние которой может сказываться весьма существенно. Наглядным примером служат параллельные ветви сдвоенного реактора, принцип выполнения которого основан на использовании эффекта взаимной индукции между этими ветвями. Очень сильно взаимная индукция проявляется между воздушными линиями передачи, проходящими по общей трассе, при протекании по ним токов нулевой последовательности. В подобных случаях также желательно освободиться от магнитных связей, перейдя к эквивалентной схеме с чисто электрическими связями. Нахождение и составление таких схем является одной из задач преобразования линейных цепей.

Для двух произвольных цепей I и II (рис. 2-1, а), индуктивно связанных между собой, точная схема замещения представляется полным пассивным четырехугольником (рис. 2-1, б) [Л. 1, 4, 5], сопротивления ветвей которого составляют:

$$\left. \begin{aligned} Z_{11} &= \frac{Z_1 Z_{II} - Z_{I-II}^2}{Z_{II}}; \\ Z_{22} &= \frac{Z_1 Z_{II} - Z_{I-II}^2}{Z_I}; \\ Z_{12} = Z_{1,2} &= -Z_{12} = -Z_{21} = \frac{Z_1 Z_{II} - Z_{I-II}^2}{Z_{I-II}} \end{aligned} \right\} \quad (2-31)$$

где Z_I , Z_{II} и Z_{I-II} — сопротивления, определяемые соответственно собственным и взаимным сопротивлениями цепей I и II .

Эту схему можно привести к несколько иному виду, как показано на рис. 2-1, в, где собственные сопротивления каждой цепи вынесены. В ряде случаев такая схема может оказаться удобнее схемы рис. 2-1, б.

Если рассматриваемые цепи на одном или обоих своих концах имеют между собой электрическую связь, то

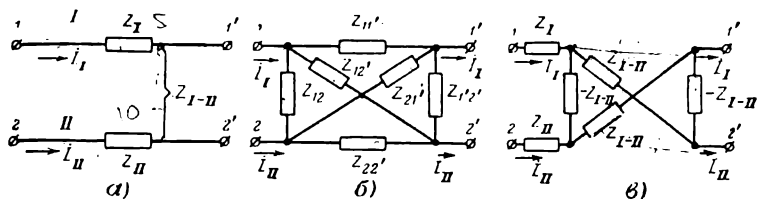


Рис. 2-1. Магнитносвязанные цепи (а) и их эквивалентные схемы замещения (б и в).

для отражения этого в схеме замещения нужно соединить соответствующие точки.

Из представленных на рис. 2-1 схем замещения как частный случай получается знакомая Т-образная схема замещения двухобмоточного трансформатора. Для этого достаточно соединить вместе точки $1'$ и $2'$ и затем образовавшийся треугольник преобразовать в эквивалентную звезду, после чего в схеме на рис. 2-1, в сложить последовательно соединенные элементы.

Аналогично можно получить в виде трехлучевой звезды схему замещения сдвоенного реактора. Она приведена в приложении П-6, где указаны значения реактивных ее ветвей и параметры таких реакторов.

С увеличением числа цепей, магнитносвязанных между собой, нахождение схемы замещения резко усложняется. В общем случае для решения подобных задач эффективно использовать матричное исчисление.

Ряд типовых случаев, которые достаточно часто встречаются при составлении схем нулевой последовательности, и соответствующие для них схемы замещения приведены в приложении П-13.

Приведение схемы к одной ступени трансформации и замена всех прочих магнитных связей между отдель-

ными цепями соответствующими электрическими связями целесообразны не только при выполнении аналитических расчетов. Они вносят также существенные упрощения и при использовании расчетных моделей. Очевидно, без такого приведения расчетные модели постоянного тока вообще не могут быть применены. Следует отметить, что некоторые ветви схем замещения, как, напри-

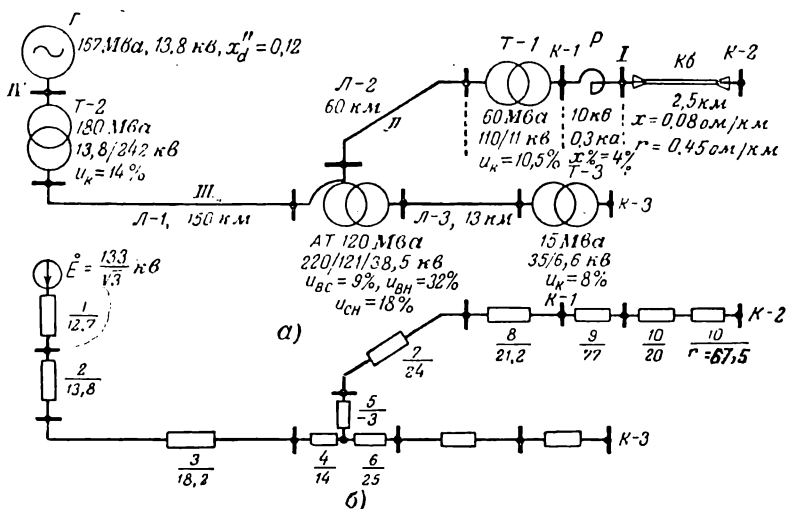


Рис. 2-2. Схема к примеру 2-1.
а — исходная схема; б — схема замещения.

мер, диагональные связи в схеме рис. 2-1,б и поперечные связи в схеме рис. 2-1,в, могут иметь отрицательные сопротивления, что вызывает трудности их имитации в расчетных моделях постоянного тока.

Пример 2-1. Составить схему замещения для схемы и при данных рис. 2-2,а. Решение провести в именованных и относительных единицах; при этом сделать точное и приближенное приведение схемы. Оценить начальные значения периодической слагающей тока при трехфазном коротком замыкании поочередно в точках К-1 и К-2, считая, что генератор предварительно работал на холостом ходу с номинальным напряжением.

Точное приведение в именованных единицах

В качестве основной выберем ступень II, где включена линия Л-2. Тогда по (2-19)—(2-21) и (2-23)—(2-24) реактивности и э. д. с. будут:

генератора

$$x_1 = 0,12 \frac{13,8^2}{167} \left(\frac{242}{13,8} \cdot \frac{121}{220} \right)^2 = 12,7 \text{ ом}$$

и

$$\dot{E} = \frac{13,8}{\sqrt{3}} \cdot \frac{242}{13,8} \cdot \frac{121}{220} = \frac{133}{\sqrt{3}} \text{ кВ};$$

трансформатора *T-2*

$$x_2 = \frac{14}{100} \cdot \frac{242^2}{180} \left(\frac{121}{220} \right)^2 = 13,8 \text{ ом};$$

линии *Л-1*

$$x_3 = 0,4 \cdot 150 \left(\frac{121}{220} \right)^2 = 18,2 \text{ ом};$$

автотрансформатора *АТ**, у которого $u_B = 0,5 (9 + 32 - 18) = 11,5\%$, $u_C = 9 - 11,5 = -2,5\%$, $u_H = 32 - 11,5 = 20,5\%$; соответственно

$$x_4 = \frac{11,5}{100} \cdot \frac{121^2}{120} = 14 \text{ ом}; x_5 = -3 \text{ ом и } x_6 = 25 \text{ ом};$$

трансформатора *T-1*

$$x_8 = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{110^2}{60} = 21,2 \text{ ом};$$

реактора *P*

$$x_9 = \frac{4}{100} \cdot \frac{10}{\sqrt{3} \cdot 0,3} \left(\frac{110}{11} \right)^2 = 77 \text{ ом};$$

кабеля *Кб*

$$x_{10} = 0,08 \cdot 2,5 \left(\frac{110}{10} \right)^2 = 20 \text{ ом};$$

$$r_{10} = 0,45 \cdot 2,5 \left(\frac{110}{11} \right)^2 = 113 \text{ ом}.$$

Реактивность линии *Л-2*

$$x_7 = 0,4 \cdot 60 = 24 \text{ ом}.$$

Схема замещения с указанием величин сопротивлений ее элементов приведена на рис. 2-2, б.

При коротком замыкании в *К-1*

$$x_{\Sigma} = 12,7 + 13,8 + 18,2 + 14 - 3 + 24 + 21,2 \approx 101 \text{ ом};$$

* Исходя из u_{BC} , можно найти сразу сумму $x_4 + x_5$. Полная схема замещения автотрансформатора показана только для общности решения.

величины токов:
в линии Л-2

$$I = \frac{133}{\sqrt{3} \cdot 101} = 0,76 \text{ ка};$$

в месте к. з.

$$I_k = 0,76 \frac{110}{11} = 7,6 \text{ ка};$$

в линии Л-1

$$I = 0,76 \frac{121}{220} = 0,42 \text{ ка}.$$

При коротком замыкании в К-2

$$x_\Sigma = 101 + 77 + 20 = 198 \text{ ом}; z_\Sigma = \sqrt{198^2 + 113^2} = 228 \text{ ом};$$

ток в линии Л-2

$$I = \frac{133}{\sqrt{3} \cdot 228} = 0,34 \text{ ка}$$

и в месте к. з.

$$I_k = 3,4 \text{ ка}.$$

Приближенное приведение в именованных единицах

В соответствии с рекомендованной шкалой принимаем U_6 для каждой ступени схемы: I—10,5 кВ; II—115 кВ; III—230 кВ; IV—13,8 кВ. В качестве основной сохраним ступень II; при этом, очевидно, только реактивность линии Л-2 останется той же ($x_7=24 \text{ ом}$), а все остальные сопротивления будут:

$$x_1 = 0,12 \frac{115^2}{167} = 9,5 \text{ ом}; x_2 = \frac{14}{100} \cdot \frac{115^2}{180} = 10,3 \text{ ом};$$

$$x_3 = 0,4 \cdot 150 \left(\frac{115}{230} \right)^2 = 15 \text{ ом}; x_4 + x_5 = \frac{9}{100} \cdot \frac{115^2}{120} = 9,9 \text{ ом};$$

$$x_8 = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{115^2}{60} = 23,2 \text{ ом}; x_9 = \frac{4}{100} \cdot \frac{10}{\sqrt{3} \cdot 0,3} \left(\frac{115}{10,5} \right)^2 = 92,5 \text{ ом};$$

$$x_{10} = 0,8 \cdot 2,5 \left(\frac{115}{10,5} \right)^2 = 24 \text{ ом}; \text{аналогично } r_{10} = 135 \text{ ом}.$$

Приведенная э. д. с. по (2-25)

$$\dot{E} = \frac{13,8}{\sqrt{3}} \cdot \frac{115}{13,8} = \frac{115}{\sqrt{3}} \text{ кВ}.$$

При коротком замыкании в К-1

$$x_\Sigma = 9,5 + 10,3 + 15 + 9,9 + 24 + 23,2 \approx 92 \text{ ом};$$

ток в линии Л-2

$$I = \frac{115}{\sqrt{3} \cdot 92} = 0,72 \text{ ка (меньше на 5,3\%);}$$

в месте к. з.

$$I_{\text{к}} = 0,72 \frac{115}{10,5} = 7,9 \text{ ка (больше на 4\%);}$$

в линии Л-1

$$I = 0,72 \frac{115}{230} = 0,36 \text{ ка (меньше на 14,3\%).}$$

При коротком замыкании в К-2

$$x_{\Sigma} = 92 + 92,5 + 24 = 208,5 \text{ ом; } z_{\Sigma} = \sqrt{208,5^2 + 135^2} = 248 \text{ ом;}$$

ток в Л-2

$$I = \frac{115}{\sqrt{3} \cdot 248} = 0,27 \text{ ка (меньше на 20,6\%);}$$

в месте к. з.

$$I_{\text{к}} = 0,27 \frac{115}{10,5} = 2,95 \text{ ка (меньше на 15,3\%).}$$

Точное приведение в относительных единицах

Примем $S_6 = 1000 \text{ Мва}$ и на II ступени $U_{\text{бII}} = 115 \text{ кв.}$ Тогда

$I_{\text{бII}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 5 \text{ ка}$ и на других ступенях базисные напряжения и токи будут:

$$U_{\text{бI}} = 115 \frac{11}{110} = 11,5 \text{ кв; } I_{\text{бI}} = 5 \frac{110}{11} = 50 \text{ ка;}$$

$$U_{\text{бIII}} = 115 \frac{220}{121} = 209 \text{ кв; } I_{\text{бIII}} = 5 \frac{121}{220} = 2,75 \text{ ка;}$$

$$U_{\text{бIV}} = 209 \frac{13,8}{242} = 11,9 \text{ кв; } I_{\text{бIV}} = 2,75 \frac{242}{13,8} = 48,3 \text{ ка.}$$

Пользуясь соответствующими выражениями, находим:

$$x_1 = 0,12 \frac{1000}{167} \left(\frac{13,8}{11,9} \right)^2 = 0,97; \quad x_2 = 0,14 \frac{1000}{180} \left(\frac{242}{209} \right)^2 = 1,04;$$

$$x_3 = 0,4 \cdot 150 \frac{1000}{209^2} = 1,37; \quad x_4 + x_5 = 0,09 \frac{1000}{120} \left(\frac{220}{209} \right)^2 = 0,83;$$

$$x_7 = 0,4 \cdot 60 \frac{1000}{115^2} = 1,82; \quad x_8 = 0,105 \frac{1000}{60} \left(\frac{110}{115} \right)^2 = 1,6;$$

$$x_9 = 0,04 \frac{50}{0,3} \cdot \frac{10}{11,5} = 5,8; \quad x_{10} = 0,08 \cdot 2,5 \frac{1\,000}{11,5^2} = 1,51;$$

аналогично $r_{10} = 8,5$; относительная э. д. с. $E = \frac{13,8}{11,9} = 1,16$.

При коротком замыкании в $K-I$

$$x_{\Sigma} = 0,97 + 1,04 + 1,37 + 0,83 + 1,82 + 1,6 = 7,63;$$

относительный ток $I_* = \frac{1,16}{7,63} = 0,152$; величины токов на соответствующих ступенях напряжения будут: в $\mathcal{L}-2$ $I = 0,152 \cdot 5 = 0,76$ ка; в месте к. з. $I_k = 0,152 \cdot 50 = 7,6$ ка; в $\mathcal{L}-1$ $I = 0,152 \cdot 2,75 = 0,42$ ка.

При коротком замыкании в $K-2$

$$x_{\Sigma} = 7,63 + 5,8 + 1,51 = 14,94; \quad z_{\Sigma} = \sqrt{14,94^2 + 8,5^2} = 17,2;$$

относительный ток $I_* = \frac{1,16}{17,2} = 0,068$; величины токов: в $\mathcal{L}-2$ $I = 0,068 \cdot 5 = 0,34$ ка; в месте к. з. $I_k = 0,068 \cdot 50 = 3,4$ ка.

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

Приближенное приведение в относительных единицах

Сохраняя $S_6 = 1\,000$ Мва, $U_{611} = 115$ кВ и, следовательно, $I_{611} = 5$ ка, для других ступеней в соответствии с рекомендованной шкалой напряжений имеем: $U_{61} = 10,5$ кВ и $I_{61} = 54,8$ ка; $U_{6111} = 230$ кВ и $I_{6111} = 2,5$ ка; $U_{61V} = 13,8$ кВ и $I_{61V} = 41,8$ ка.

Относительная базисная реактивность линии $\mathcal{L}-2$ сохранится той же, что и в предыдущем подсчете ($x_7 = 1,82$); для всех же прочих элементов по выражениям для упрощенного приведения в относительных единицах имеем:

$$x_1 = 0,12 \frac{1\,000}{167} = 0,72; \quad x_2 = 0,14 \frac{1\,000}{180} = 0,78;$$

$$x_3 = 0,4 \cdot 150 \frac{1\,000}{230^2} = 1,13; \quad x_4 + x_5 = 0,09 \frac{1\,000}{120} = 0,75;$$

$$x_8 = 0,105 \frac{1\,000}{60} = 1,75; \quad x_9 = 0,04 \frac{54,8}{0,3} \cdot \frac{10}{10,5} = 6,95;$$

$$x_{10} = 0,08 \cdot 2,5 \frac{1\,000}{10,5^2} = 1,82; \quad \text{аналогично } r_{10} = 10,2;$$

относительная э. д. с. $E_* = \frac{13,8}{13,8} = 1$.

При коротком замыкании в $K-X$

$$x_{\Sigma} = 0,72 + 0,78 + 1,13 + 0,75 + 1,82 + 1,75 = 6,95;$$

$$\text{относительный ток } I_* = \frac{1}{6,95} = 0,144;$$

величины токов:

$$\text{в } Л-2 \quad I = 0,144 \cdot 5 = 0,72 \text{ ка};$$

$$\text{в месте к. з. } I_K = 0,144 \cdot 54,8 = 7,9 \text{ ка};$$

$$\text{в } Л-1 \quad I = 0,144 \cdot 2,5 = 0,36 \text{ ка}.$$

При коротком замыкании в $K-2$

$$x_{\Sigma} = 6,95 + 6,95 + 1,82 = 15,72; \quad z_{\Sigma} = \sqrt{15,72^2 + 10,2^2} = 18,7;$$

$$\text{относительный ток } I_* = \frac{1}{18,7} = 0,054;$$

величины токов:

$$\text{в } Л-2 \quad I = 0,054 \cdot 5 = 0,27 \text{ ка};$$

$$\text{в месте к. з. } I_K = 0,054 \cdot 54,8 = 2,95 \text{ ка}.$$

Естественно, все найденные таким подсчетом токи получились такими же, как и при приближенном определении в именованных единицах.

2-5. ПОГРЕШНОСТИ ПРИБЛИЖЕННОГО ПРИВЕДЕНИЯ

Ранее уже отмечалось, что приближенное приведение схемы к одной ступени трансформации вносит в расчет некоторую погрешность. Последняя обуславливается, с одной стороны, неточностью пересчета приводимых величин и, с другой — неточностью оценки реактивностей самих трансформаторов. Пока различие между напряжениями холостого хода трансформатора и соответствующими средними номинальными напряжениями (по шкале § 2-4) незначительно, эта погрешность также достаточно мала. В противном случае, что имеет место особенно при наличии трансформаторов с глубоким регулированием напряжений, нужно ожидать значительного повышения этой погрешности.

Приведенный ниже анализ показывает, что уже для мало-мальски сложной схемы с несколькими ступенями трансформации погрешности в токах от приближенного составления схем замещения могут изменяться в широких пределах и заранее предвидеть порядок этих погрешностей в общем случае невозможно.

По мере перехода от ступени напряжения, к которой приведена схема замещения, к другим, более удаленным

ступеням напряжения, погрешность в токе обычно возрастает, хотя и здесь достаточно часто могут быть исключения.

Поэтому, как отмечалось в § 2-4, для повышения точности расчета следует в первую очередь схему замещения составлять с учетом действительных коэффициентов трансформации и особенно, когда в схеме имеются трансформаторы с регулированием напряжения.

Чтобы иметь представление о порядке величины возникающей погрешности, пределах ее изменений и влиянии на нее отдельных факторов, проведем исследование применительно к самой простой схеме рис. 2-3, где для упрощения выкладок введены чисто индук-

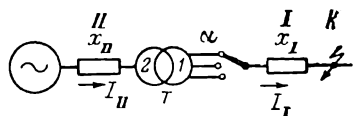


Рис. 2-3. Схема с двумя ступенями напряжения.

тивные сопротивления x_I и x_{II} . Ограничим свою задачу рассмотрением погрешностей только в токах при трехфазном коротком замыкании в точке К. Условно примем нумерацию ступеней, начиная со ступени, где предполагается короткое замыкание.

Если U_{n1} и U_{n2} — номинальные напряжения трансформатора, то при изменении числа витков обмотки I напряжение холостого хода будет $U_I = \alpha U_{n1}$ и коэффициент трансформации трансформатора $k' = \alpha k$, 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, приведенное к стороне его нерегулируемой обмотки, остается постоянным. Поэтому в данном случае можно считать, что оно включено в x_{II} . При трехфазном коротком замыкании за x_I для токов имеем:

$$I_I = \frac{\alpha k E}{x_I + (\alpha k)^2 x_{II}} \quad (2-32)$$

и

$$I_{II} = \alpha k I_I. \quad (2-33)$$

Найдем отношения токов I_I и I_{II} при $\alpha = 1$ к их значениям по (2-32) и (2-33). После небольших преобразований эти отношения можно представить в следующем виде:

$$K_I = \frac{I_I (\alpha=1)}{I_I} = \frac{1 + n_{II} \alpha^2}{\alpha (1 + n_{II})}; \quad (2-34)$$

$$K_{II} = \frac{I_{II} (\alpha=1)}{I_{II}} = \frac{K_I}{\alpha} = \frac{1 + n_{II} \alpha^2}{\alpha^2 (1 + n_{II})}, \quad (2-35)$$

где $n_{II} = \frac{x_{II}}{x_I} = \frac{x_{II}}{x_I}$ — отношение соответствующих реактивностей, приведенных к какой-либо одной ступени трансформации, при $\alpha = 1$; если реактивности выражены в относительных единицах, то они должны быть приведены к базисным условиям также при $\alpha = 1$.

Полученные выражения показывают, что отклонения величин токов при учете действительного коэффициента трансформации от их значений при $\alpha = 1$ зависят как от α , так и от соотношения между реактивностями на обеих сторонах трансформатора. При изменении n_{II} от 0 (т. е. $x_{II} = 0$) до ∞ (т. е. $x_I = 0$) рассматриваемые отношения находятся в пределах:

$$K_I = \frac{1}{\alpha} \div \alpha,$$

$$K_{II} = \frac{1}{\alpha^2} \div 1,$$

откуда следует, что если при $\alpha \geq 1$ всегда $K_{II} \geq 1$, то K_I при заданном α в зависимости от n_{II} может быть и больше, и меньше единицы; наконец, легко найти [приравняв выражение (2-34) единице], что при $\alpha = 1/n_{II}$ приближенное приведение вообще не вносит погрешности в определение тока I_I .

По структуре (2-34) видно, что $K_I = f(\alpha)$ имеет минимум. Из $dK_I/d\alpha = 0$ находим, что он наступает при $\alpha = 1/\sqrt{n_{II}}$. Его величина составляет

$$K_{I\min} = \frac{2\sqrt{n_{II}}}{1 + n_{II}}. \quad (2-36)^*$$

При заданном n_{II} с изменением α в диапазоне от 1 до $1/n_{II}$ отношение $K_I \leq 1$ (его минимум наступает при $\alpha = 1/\sqrt{n_{II}}$), т. е. здесь приближенное приведение дает преуменьшение тока I_I ; при выходе α за указанные пределы отношение $K_I > 1$, т. е. приближенное приведение здесь дает уже преувеличение тока I_I .

Для большей наглядности на рис. 2-4 представлены графики изменения K_I и K_{II} в функции α при предельных (0 и ∞) и нескольких конечных ($1/4$, 1 и 4) значениях n_{II} . Как видно, при $n_{II} \ll 1$ ошибки в определении токов I_I и I_{II} одного знака, причем вторая из них всегда больше первой. В то время как с ростом n_{II} ошибка

* Нетрудно убедиться, что величина $K_{I\min}$ сохраняется одной и той же для взаимно обратных значений n_{II} (т. е. для $n'_{II} = 1/n_{II}$).

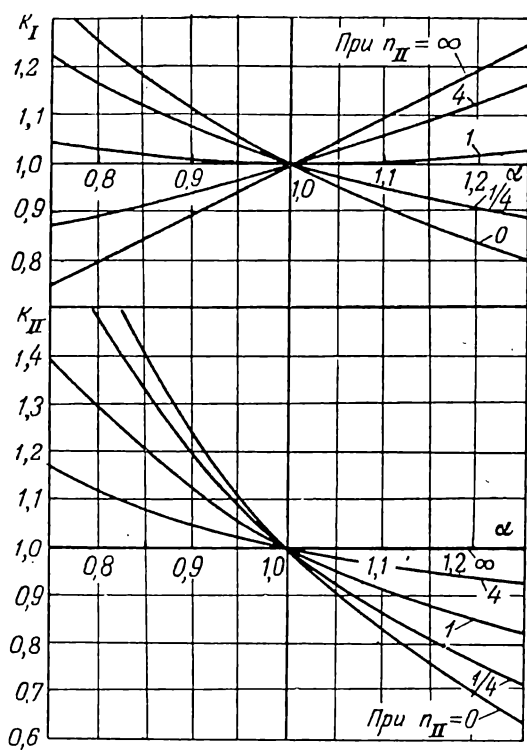


Рис. 2-4. Кривые изменения K_I и K_{II} в функции α при разных значениях n_{II} .

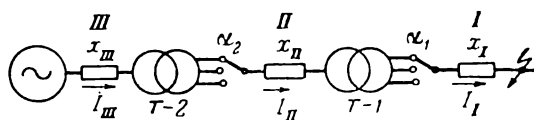


Рис. 2-5. Схема с тремя ступенями напряжения.

в токе I_{II} непрерывно падает, ошибка в токе I_I сперва тоже падает, но затем, изменив знак, увеличивается. Следовательно, ошибки в этих токах могут быть одинаковыми лишь по абсолютной величине. Соотношение между α и n_{II} , при котором соблюдается такое условие, легко найти из равенства

$$(1 - K_I) = -(1 - K_{II}).$$

Перейдем к более сложному случаю, когда схема содержит каскад хотя бы из двух трансформаторов (рис. 2-5). Зная отношение реактивностей $n_{III} = \frac{x_{III}^*}{x_I}$ и относительное отклонение α_2 коэффициента трансформации трансформатора Т-2, можно по аналогии с (2-34) и (2-35) написать выражения для отношения токов на каждой ступени:

$$K_I = \frac{1 + n_{II}\alpha_1^2 + n_{III}\alpha_1^2\alpha_2^2}{\alpha_1\alpha_2(1 + n_{II} + n_{III})}; \quad (2-37)$$

$$K_{II} = \frac{K_I}{\alpha_1} = \frac{1 + n_{II}\alpha_1^2 + n_{III}\alpha_1^2\alpha_2^2}{\alpha_1^2\alpha_2(1 + n_{II} + n_{III})}; \quad (2-38)$$

$$K_{III} = \frac{K_{II}}{\alpha_2} = \frac{1 + n_{II}\alpha_1^2 + n_{III}\alpha_1^2\alpha_2^2}{\alpha_1^2\alpha_2^2(1 + n_{II} + n_{III})}, \quad (2-39)$$

где $\alpha_1\alpha_2 = \alpha$ можно рассматривать как относительное отклонение коэффициента трансформации между ступенями I и III.

Каждое из этих выражений является функцией уже четырех независимых переменных, что обуславливает трудности анализа в общем виде. Однако по ним достаточно просто выявить некоторые зависимости и соотношения, которые полезны для оценки исследуемых погрешностей. В частности, при заданных n_{II} и n_{III} легко установить, в каком соотношении должны быть α_1 и α_2 , чтобы погрешность в токе на одной из ступеней вообще отсутствовала. Для этого надлежит использовать соответствующее выражение из (2-37) — (2-39), приравняв его единице.

Нетрудно также показать, что для заданных α_1 , n_{II} и n_{III} возможно такое значение α_2 , при котором величины K_I и K_{II} сохраняются теми же, что и при $\alpha_2 = 1$, т. е. изменение коэффициента трансформации другого трансформатора не всегда может вызвать изменение токов на отдельных ступенях. В самом деле, приравняв (2-37) или (2-38) аналогичному выражению при $\alpha_2 = 1$, получим квадратное уравнение, один корень которого $\alpha_2 = 1$ очевиден, а другой

$$\alpha_2 = \frac{1 + n_{II}\alpha_1^2}{n_{III}\alpha_1^2}. \quad (2-40)$$

* Здесь, как и выше, реактивности должны быть приведены к одной ступени или базисным условиям при $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$.

При ином значении α_1 величины K_I и K_{II} , разумеется, будут другими. Коль скоро K_I и K_{II} рассматриваются сейчас как функции только α_2 , то обычным путем можно найти, что их минимумы наступают при

$$\alpha_2 = \sqrt{\frac{1 + n_{II}\alpha_1^2}{n_{III}\alpha_1^2}} \quad (2-41)$$

и составляют соответственно:

$$\left. \begin{aligned} K_{I_{\min}} &= \frac{2 \sqrt{n_{III} (1 + n_{II}\alpha_1^2)}}{1 + n_{II} + n_{III}} \\ K_{II_{\min}} &= \frac{K_{I_{\min}}}{\alpha_1} \end{aligned} \right\} \quad (2-42)^*$$

Отсюда можно заключить, что если при заданном α_1 дополнительно вводимое в другой точке схемы относительное отклонение коэффициента трансформации α_2 находится в пределах

$$1 \geq \alpha_2 \geq \frac{1 + n_{II}\alpha_1^2}{n_{III}\alpha_1^2}.$$

(при одновременном соблюдении только верхних или только нижних знаков неравенства), то это приводит к снижению K_I и K_{II} против их значений при $\alpha_2=1$, причем наибольшее снижение будет при величине α_2 , определяемой по (2-41). Соответственно при выходе α_2 за указанные пределы имеет место увеличение K_I и K_{II} . Разумеется, такой критерий позволяет характеризовать лишь тенденцию изменения K_I и K_{II} , но по нему еще нельзя судить об изменении величин исследуемых погрешностей. Для оценки последних, очевидно, нужно знать сами величины K_I и K_{II} при $\alpha_2=1$, т. е. знать, в какую сторону от единицы они отличаются (или, иначе, знак погрешности). Так, например, если при $\alpha_2=1$ $K_I < 1$, то при значении α_2 , находящемся в указанном выше диапазоне, величина K_I будет еще меньше, т. е. погрешность в токе I_I возрастет. Напротив, при $K_I > 1$ то же значение α_2 при сохранении знака погрешности непременно уменьшит ее величину. При изменении знака погрешности возможно как увеличение, так и уменьшение ее абсолютной величины.

Интересно отметить, что при каскаде трансформаторов с регулированием напряжения возможны такие соотношения между α_1 и α_2 , при которых погрешности в токах на всех ступенях остаются постоянными независимо от изменения реактивности на какой-либо одной ступени. Для соблюдения такого несколько неожиданного и даже парадоксального на первый взгляд условия достаточно на-

* Легко убедиться, что (2-40) — (2-42) при $\alpha_1=1$ переходят в ранее полученные выражения для схемы с одним трансформатором.

писать одно из выражений (2-37) — (2-39) отдельно для двух произвольных значений реактивности на одной из ступеней и приравнять их правые части. Для упрощения выкладок можно принять, в частности, предельные значения этой реактивности, т. е. 0 и ∞ .

Так, приравняв выражения, полученные из (2-37) при $n_{II} = 0$ и $n_{II} = \infty$, имеем:

$$\frac{1 + n_{III} \alpha_1^2 \alpha_2^2}{\alpha_1 \alpha_2 (1 + n_{III})} = \frac{x_1}{\alpha_2},$$

откуда после преобразования найдем, что погрешности в токах на каждой ступени не будут зависеть от x_{II} , если

$$\alpha_2 = \frac{1}{\alpha_1} \sqrt{\frac{(1 + n_{III}) \alpha_1^2 - 1}{n_{III}}}, \quad (2-43)$$

для соблюдения которого в реальных условиях, очевидно, должно быть выполнено неравенство

$$\alpha_1 > \sqrt{\frac{1}{1 + n_{III}}}.$$

Аналогично легко найти, что указанная независимость от x_{III} будет обеспечена при

$$\alpha_2 = \frac{1}{\alpha_1} \sqrt{\frac{1 + n_{II} \alpha_1^2}{1 + n_{II}}}, \quad (2-44)$$

а независимость от x_I — при

$$\alpha_2 = \frac{1}{\alpha_1} \sqrt{1 + \frac{x_{III}}{x_{II}} (1 - \alpha_1^2)}, \quad (2-45)$$

причем в последнем случае для реальных условий дополнительно должно быть

$$\alpha_1 < \sqrt{\frac{x_{III}}{x_{II}} + 1}.$$

Остановимся еще на определении экстремума отношения K_I , рассматривая последнее как функцию двух независимых переменных: α_1 и α_2 . Для существования экстремума такой функции, как известно, необходимым условием является

$$\frac{\partial K_I}{\partial \alpha_1} = 0 \text{ и } \frac{\partial K_I}{\partial \alpha_2} = 0,$$

которое приводит к уравнениям:

$$\begin{aligned} n_{II} \alpha_1^2 + n_{III} \alpha_1^2 \alpha_2^2 - 1 &= 0; \\ -n_{II} \alpha_1^2 + n_{III} \alpha_1^2 \alpha_2^2 - 1 &= 0. \end{aligned}$$

Из последних следует, что экстремум возможен лишь при $n_{II}=0$ и что он наступает при $\alpha_1 \alpha_2 = \alpha = \frac{1}{\sqrt{n_{III}}}$, т. е. решение свелось

к уже рассмотренному случаю, когда две ступени связаны трансформатором, относительное отклонение коэффициента трансформации которого составляет $\alpha = \alpha_1 \alpha_2$.

В предыдущих выкладках предполагалось, что регулирование осуществлено на обмотке трансформатора, которая ближе к короткому замыканию. Если оно выполнено на другой обмотке и относительное отклонение напряжения холостого хода этой обмотки составляет $\beta = U_2/U_{н2}$, то во всех приведенных выше формулах под α нужно понимать $\alpha = 1/\beta$; при этом реактивность трансформатора, как указывалось выше, следует суммировать с реактивностью на стороне его нерегулируемой обмотки.

Пример 2-2. Для схемы примера 2-1 (рис. 2-2,а) исследовать влияние изменения коэффициентов трансформации трансформаторов *T-1* и *T-2* на величины токов при трехфазном коротком замыкании в точке *K-1* и сравнить их со значениями, полученными расчетом по приближенно приведенной схеме.

Дополнительно известно, что напряжения холостого хода у трансформатора *T-1* 110 ($\pm 15\%$)/11 кВ,

у трансформатора *T-2* 13,8/242 ($+25\%$, -15%) кВ;

ступени регулирования, как обычно, через 1,5—2,5%.

При этих данных пределы относительного отклонения коэффициентов трансформации (по сравнению с их приближенными значениями, т. е. 10,5/115 и 230/13,8) будут:

у трансформатора *T-1*

$$\alpha_1 = \frac{11/110 (0,85 \div 1,15)}{10,5/115} = 0,91 \div 1,23;$$

у трансформатора *T-2*

$$\alpha_2 = \frac{242 (0,85 \div 1,25)/13,8}{230/13,8} = 0,89 \div 1,31.$$

Используя подсчитанные ранее реактивности элементов при приближенном приведении, найдем суммарные реактивности на отдельных ступенях трансформации: $x_1 = x_8 = 23,2$ ом; поскольку между ступенями II и III изменения коэффициента трансформации нет, реактивности этих ступеней объединяем в одну: $x_{II-III} = x_3 + x_4 + x_5 + x_7 = 15 + 9,9 + 24 \approx 49$ ом и на ступени IV $x_{IV} = x_1 + x_2 = 9,5 + 10,3 = 19,8$ ом.

Отношения реактивностей будут:

$$n_{II-III} = \frac{49}{23,2} = 2,11; \quad n_{IV} = \frac{19,8}{23,2} = 0,85.$$

Здесь индексация отношений соответствует принятым на схеме рис. 2-2 номерам ступеней трансформации. Поэтому при использовании формул (2-37)—(2-45) нужно вместо величин с индексом II брать величины с индексом II—III и вместо величин с индексом III вводить величины с индексом IV.

Определим, при каких значениях α_1 и α_2 погрешности в токе на ступени I (т. е. в месте короткого замыкания) не будет. Для этого, полагая в (2-37) $K_I=1$, имеем:

$$\frac{1 + 2,11\alpha_1^2 + 0,85\alpha_1^2\alpha_2^2}{\alpha_1\alpha_2(1 + 2,11 + 0,85)} = 1,$$

откуда $0,85\alpha_1^2\alpha_2^2 + 2,11\alpha_1^2 - 3,96\alpha_1\alpha_2 + 1 = 0$.

Это уравнение позволяет построить кривую $\alpha_2 = f(\alpha_1)$, которая представлена на рис. 2-6. Для сопоставления здесь показаны аналогичные зависимости, полученные для $K_{II-III} = 1$ и для $K_{IV} = 1$. Как видно, при изменении α_1 в заданном диапазоне значений α_2 обеспечивающие поставленные условия также находятся в установленных пределах (за исключением участка для $\alpha_1 > 1,16$ при $K_{II-III}=1$), т. е. эти условия практически осуществимы. Правда, относительные отклонения коэффициентов трансформации обычно бывают в одну и ту же сторону¹, поэтому наиболее вероятным является соблюдение $K_I=1$.

Оценим теперь возможные величины отношений токов. Представим сперва, что регулирование имеется только на трансформаторе *T-1*. Тогда $n = n_{II-III} + n_{IV} = 2,11 + 0,85 = 2,96$ и возможный ми-

нимум K_I по (2-36) был бы $K_{I\min} = \frac{2\sqrt{2,96}}{1 + 2,96} = 0,87$; однако практически он не имеет места, так как для этого должно быть $\alpha_1 = \frac{1}{\sqrt{2,96}} = 0,58$, что выходит за заданный нижний предел.

При изменении α_1 от 0,91 до 1,23 пределы отношений токов по (2-34) и (2-35) будут: $K_I = 0,96 \div 1,13$ и $K_{II-III} = K_{IV} = 1,05 \div 0,92$.

Аналогично легко определить пределы рассматриваемых отношений при регулировании только на трансформаторе *T-2*. При $\alpha_2 = 0,89 \div 1,31$ они получаются следующими:

$$K_I = K_{II-III} = 1,07 \div 0,88 \text{ и } K_{IV} = 1,20 \div 0,67.$$

Применение регулирования на трансформаторе *T-2* могло не повлиять на величины K_I и K_{II-III} , получающиеся при регулировании в указанных пределах только на *T-1*. Однако для этого согласно (2-40) пределы регулирования α_2 должны быть от 3,9 до 3,26, что, разумеется, нереально.

На рис. 2-7 показаны графики исследуемых отношений в зависимости от α_1 при $\alpha_2=1$ и при предельных значениях α_2 . Они построены по (2-37)—(2-39). Разница между ординатами кривых и

¹ При принятом определении коэффициента трансформации, т. е. в направлении от ступени, к которой производится приведение.

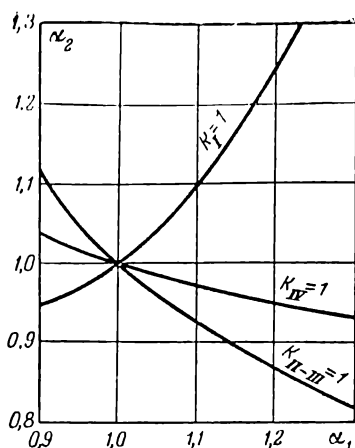


Рис. 2-6. К примеру 2-2.

единицей характеризует величину и знак погрешности в токе на каждой ступени. Как видно, эта разница может достигать весьма значительных размеров (особенно на ступени IV).

Найдем, при каких условиях погрешность в токе на ступени I будет сохраняться неизменной при коротком замыкании в любой точке сети этой ступени. Для этого должно быть

$$\alpha_1 < \sqrt{\frac{x_{IV}}{x_{II-III}} + 1} = \sqrt{\frac{19,8}{49} + 1} = 1,19.$$

Следовательно, приняв, например, $\alpha_1 = 0,95$, по (2-45) находим:

$$\alpha_2 = \frac{1}{0,95} \sqrt{1 + \frac{49}{19,8} (1 - 0,95^2)} = 1,18,$$

что соответствует ответвлению $\left(\frac{230 \cdot 1,18}{242} - 1\right) \cdot 100 = +12,5\%$.

При таких значениях α_1 и α_2 величины отношений токов на отдельных ступенях будут: $K_I = 0,9$; $K_{II-III} = 0,95$ и $K_{IV} = 0,81$. Они останутся постоянными не только при изменении внешней реактивности ступени I до места короткого замыкания, но также и при изменении мощности или реактивности трансформатора T-I, лишь бы был сохранен установленный для него коэффициент трансформации.

Аналогичным образом по (2-44) можно найти, что рассматриваемые отношения не будут зависеть от реактивности на ступени IV. Так, например, при $\alpha_1 = 1,23$ это достигается при $\alpha_2 = 0,94$.

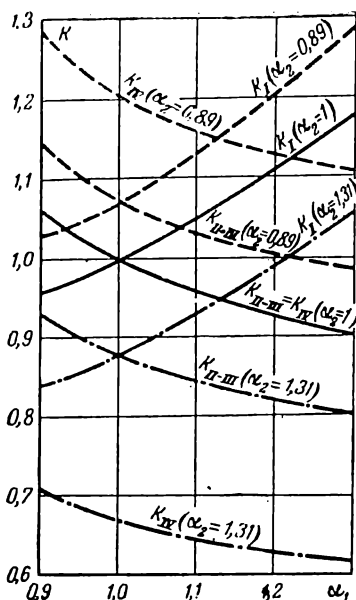


Рис. 2-7. К примеру 2-2.

2-6. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ

Если схема замещения не содержит замкнутых контуров и в ней имеется один или несколько источников с одинаковыми э. д. с., то ее легко привести к простейшему виду путем элементарных преобразований (последовательного и параллельного сложения элементов). В общем же случае приведение схемы к простейшему виду требует применения ряда дополнительных преобразований, известных из теории линейных электрических цепей и широко используемых, в частности, при расчетах электрических сетей. К ним относятся преобразования треугольника в звезду или, наоборот, многолучевой звезды в полный многоугольник, замена нескольких генерирующих ветвей с разными э. д. с., присоединенных к общему узлу, одной эквивалентной. Формулы таких преобразований читателю знакомы и лишь для справки они помещены в приложении П-3.

Приведем ряд указаний и рекомендаций, которыми следует руководствоваться при преобразованиях схем в ходе выполнения расчета коротких замыканий. Некоторые особенности подобных расчетов позволяют использовать дополнительные частные возможности и специальные приемы.

Первоочередной задачей расчета коротких замыканий обычно является нахождение тока непосредственно в рассматриваемой 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

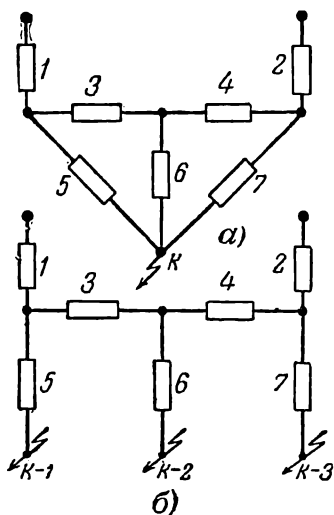


Рис. 2-8. Разрез сложной схемы по точке трехфазного короткого замыкания.

соединять с точкой трехфазного короткого замыкания, а лучше эти ветви объединять с генераторами в эквивалентные генерирующие ветви.

Если металлическое трехфазное короткое замыкание находится в узле с несколькими сходящимися в нем ветвями (рис. 2-8,а), то последний можно разрезать, сохранив на конце каждой из этих

ветвей по такому же короткому замыканию (рис. 2-8,б). Получившуюся разомкнутую (т. е. без контуров) схему далее легко преобразовать относительно любой из точек короткого замыкания, учитывая другие ветви с короткими замыканиями как обычные нагрузочные ветви. Этот прием особенно эффективен, когда требуется найти ток в одной из ветвей, присоединенных к узлу короткого замыкания.

Рассматривая короткое замыкание в схеме, часто можно обнаружить, что схема либо полностью симметрична относительно точки короткого, либо какая-то ее часть имеет симметрию относительно некоторой промежуточной точки. Использование этого обстоятельства позволяет значительно упростить преобразование схем. Так, если в схеме рис. 2-9,а все одноименные элементы одинаковы, то, несмотря на кажущуюся сложность, она при коротком замыкании в точке $K-1$ эквивалентна простой схеме рис. 2-9,б, так

как ни реакторы, ни обмотки 37 кВ трансформаторов не входят в цепь тока короткого замыкания. Равным образом при коротком замыкании в точке $K-2$ она может быть представлена схемой рис. 2-9,в. Наконец, при ко-

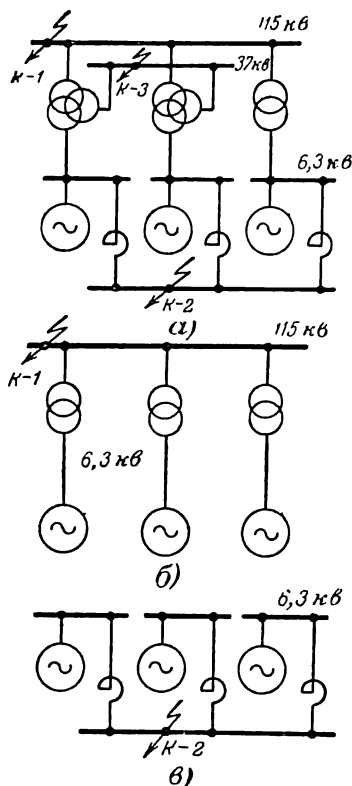


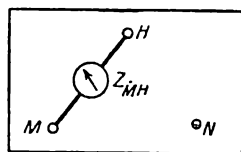
Рис. 2-9. Схема электрической станции (а) и ее упрощенный вид при коротких замыканиях в точках $K-1$ (б) и $K-2$ (в).

ротком в точке $K-3$ можно использовать частичную симметрию схемы, т. е. замкнуть левую и среднюю секции шин $6,3$ кв, после чего получится схема с одним контуром (по треугольнику).

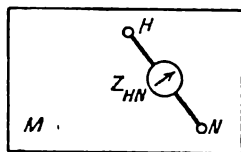
Все эти способы и приемы используются также при преобразовании схемы при расчете коротких замыканий одновременно в нескольких точках или каких-либо иных повреждений.

Как отмечалось ранее, практический интерес представляет одновременное возникновение коротких замыканий в двух точках схемы. В данном случае при преобразовании должны быть сохранены обе аварийные точки и, очевидно, точка нулевого потенциала схемы. Элементарной схемой, к которой при этих условиях может быть приведена исходная схема, является либо треугольник, в двух сторонах которого, соединяющих аварийные точки с точкой нулевого потенциала, приложены эквивалентные э. д. с., либо эквивалентная ему звезда с соответствующими э. д. с. в лучах, присоединенных к аварийным точкам (см. приложение П-3).

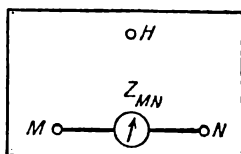
При наличии расчетных моделей суммарные или результирующие сопротивления легко найти путем непосредственных измерений. Так, для определения результирующего сопротивления относительно какой-либо точки нужно в набранной на модели схеме замещения измерить ее сопротивление между заданной точкой и точкой, в которую объединены концы всех генераторных и нагрузочных ветвей. Для нахождения сопротивлений трехлучевой звезды Z_H , Z_M и Z_N на модели предварительно измеряют три сопротивления, т. е. Z_{HM} , Z_{HN} и Z_{MN} (рис. 2-10).



а)



б)



в)

Рис. 2-10. Измерения сопротивлений схемы для определения сопротивлений эквивалентной трехлучевой звезды.

а — определение Z_{MH} ; б — определение Z_{HN} ; в — определение Z_{MN} .

Поскольку

$$\left. \begin{aligned} Z_{HM} &= Z_H + Z_M; \\ Z_{HN} &= Z_H + Z_N; \\ Z_{MN} &= Z_M + Z_N, \end{aligned} \right\} \quad (2-46)$$

то

$$\left. \begin{aligned} Z_H &= 0,5 (Z_{HM} + Z_{HN} - Z_{MN}); \\ Z_M &= 0,5 (Z_{HM} + Z_{MN} - Z_{HN}); \\ Z_N &= 0,5 (Z_{HN} + Z_{MN} - Z_{HM}). \end{aligned} \right\} \quad (2-47)$$

Эти выражения аналогичны тем, которые используются для определения сопротивлений схемы замещения трехобмоточного трансформатора.

При расчете несимметричных режимов аналогичные преобразования производят для схем замещения отдельных последовательностей.

2-7. ПРИМЕНЕНИЕ ПРИНЦИПА НАЛОЖЕНИЯ

Для практического расчета линейных электрических цепей часто представляется удобным использовать принцип наложения, согласно которому действительный режим можно рассматривать 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 нулю¹. Расчет каждого из указанных условных режимов является более простой задачей. Использование принципа наложения в такой обычной форме достаточно удобно при применении расчетной модели, если в ее конструкции не предусмотрена возможность одновременной установки разных э. д. с. При аналитическом же решении он становится весьма громоздким, когда схема содержит достаточно большое число различных э. д. с. Поэтому практически обычно используют следующие формы принципа наложения.

а) Наложение собственно аварийного режима на предшествующий

Условия трехфазного короткого замыкания, очевидно, не изменятся, если представить, что в точке корот-

¹ При этом сами генерирующие ветви, э. д. с. которых принимаются равными нулю, непременно должны быть сохранены в схеме своими сопротивлениями.

кого приложены две равные, но взаимно противоположные э. д. с. Величина их, вообще говоря, может быть произвольной; в частности, ее можно принять равной значению напряжения, которое было в этой точке до возникновения 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 только из двух режимов. Один из них целесообразно получить, учитывая все э. д. с. генераторов и дополнительно введенную в точке короткого замыкания э. д. с. $+\dot{U}_{к0}$. Одновременное действие этих э. д. с. дает нормальный предшествующий режим в данной схеме. Второй режим получается от действия только одной э. д. с. $-\dot{U}_{к0}$, приложенной в точке короткого. Его называют собственно аварийным режимом, а получающиеся при нем токи и напряжения — аварийными составляющими соответственно токов и напряжений при коротком замыкании. Этот режим можно представить и в несколько ином виде, считая, что напряжение в месте короткого равно нулю, а у всех генераторных и нагрузочных ветвей приложены э. д. с. $+\dot{U}_{к0}$. Особенностью схемы собственно аварийного режима является участие всех нагрузок (независимо от их характера) в виде дополнительных источников.

Действительные величины тока и напряжения при трехфазном коротком замыкании получаются суммированием соответствующих предшествующих величин и найденных собственно аварийных составляющих, т. е.

$$I = I_0 + I_{ав}; \quad (2-48)$$

$$\dot{U} = \dot{U}_0 + \dot{U}_{ав}. \quad (2-49)$$

Здесь $U < U_0$, поскольку $U_{ав} < 0$. Что касается токов, то в генераторах $I_{ав}$ имеет одно направление с I_0 , а во всех прочих ветвях эти токи могут иметь одинаковые или разные направления.

Использование такой формы наложения целесообразно главным образом в случаях, когда предшествующий нормальный режим уже известен, так как при этом задача сводится к сравнительно более простому расчету собственно аварийного режима. На практике часто до-

пускают наложение собственно аварийного режима, полученного для чисто индуктивной схемы, на предшествующий нормальный режим, который соответствует схеме с действительными полными сопротивлениями ее элементов. Разумеется, такое наложение принципиально недопустимо, однако практически им все же можно пользоваться, ибо получающиеся ошибки незначительны¹.

Следует отметить, что если собственно аварийные составляющие токов отдельных ветвей в общем случае являются фиктивными токами, то сумма этих составляющих, которые соответствуют генераторным и нагрузочным ветвям, дает действительный ток в месте короткого замыкания, так как в нем до возникновения короткого тока 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, коль скоро отклонения напряжения в нормальном режиме находятся в пределах нескольких процентов.

Рассматриваемую форму принципа наложения используют также при расчете простых и сложных несимметричных режимов.

б) Применение собственных и взаимных сопротивлений и проводимостей

В схеме с произвольным числом генераторов с э. д. с. $\dot{E}_1, \dot{E}_2, \dots, \dot{E}_n$ для тока, например, генератора 1, считая положительным направление тока от генератора к внешней сети, по принципу наложения имеем:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 = \dot{I}_{11} - \dot{I}_{12} - \dot{I}_{13} - \dots - \dot{I}_{1n} = \frac{\dot{E}_1}{Z_{11}} - \frac{\dot{E}_2}{Z_{12}} - \\ - \frac{\dot{E}_3}{Z_{13}} - \dots - \frac{\dot{E}_n}{Z_{1n}} = Y_{11}\dot{E}_1 - Y_{12}\dot{E}_2 - Y_{13}\dot{E}_3 - \dots - Y_{1n}\dot{E}_n, \end{aligned} \quad (2-50)$$

¹ Поскольку аварийные составляющие токов обычно много больше токов нормального режима.

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 генератора 1, 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 генератора 1, вызванный действием 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 генератора 1 в рассматриваемой схеме.

Аналогично для тока в месте короткого замыкания имеем:

$$\dot{I}_K = \frac{\dot{E}_1}{Z_{1K}} + \frac{\dot{E}_2}{Z_{2K}} + \dots + \frac{\dot{E}_n}{Z_{nK}} = Y_{1K} \dot{E}_1 + Y_{2K} \dot{E}_2 + \dots + Y_{nK} \dot{E}_n, \quad (2-51)$$

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

Собственные и взаимные сопротивления или проводимости достаточно просто находят с помощью так называемого способа токораспределения или путем преобразования заданной схемы. Сущность первого нагляднее всего иллюстрировать на конкретном примере. Пусть в схеме рис. 2-11,а требуется найти собственное и взаимные сопротивления генератора Г-1. Для этого, полагая $\dot{E}_2 = 0$ и задаваясь, например в ветви Z_3 , произвольным током $\dot{I}_3$ (рис. 2-11,б), находим напряжение узла *b* и по нему — ток в ветви Z_2 . Далее, определив падение напряжения в Z_4 от тока $\dot{I}_4 = \dot{I}_2 + \dot{I}_3$, находим напряжение узла *a* и по нему — ток в ветви Z_5 . Наконец, зная ток $\dot{I}_1 = \dot{I}_4 + \dot{I}_5$, определяем э. д. с. $\dot{\mathcal{E}}_1$, которая должна быть за Z_1 , чтобы в ветви Z_3 обеспечить принятый ранее ток $\dot{I}_3$.

Теперь искомые сопротивления будут:

$$Z_{11} = \frac{\dot{\mathcal{E}}_1}{\dot{I}_1}; \quad Z_{12} = \frac{\dot{\mathcal{E}}_1}{\dot{I}_2}; \quad Z_{13} = \frac{\dot{\mathcal{E}}_1}{\dot{I}_3};$$

$$Z_{15} = Z_{1K} = \frac{\dot{\mathcal{E}}_1}{\dot{I}_5}.$$

Те же сопротивления можно найти и постепенным преобразованием схемы, исключив имеющиеся в ней промежуточные узлы и представив ее в виде схемы с непосредственными связями между интересующими точка-

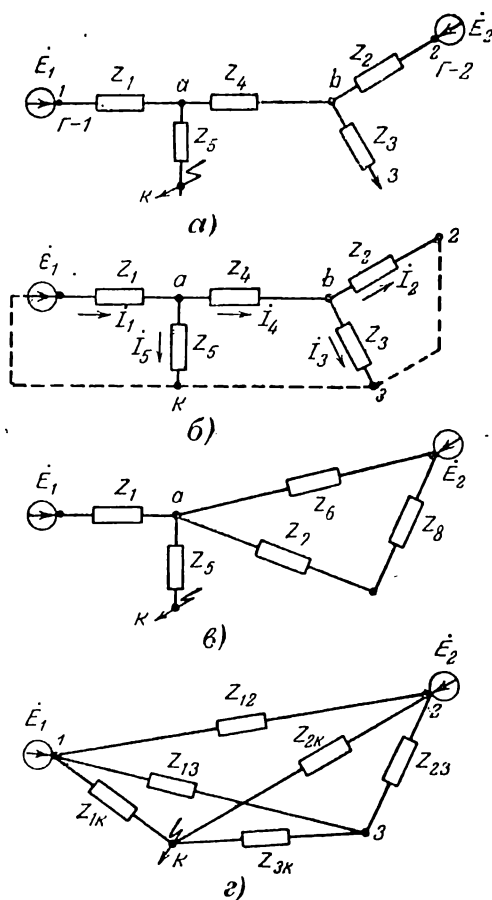


Рис. 2-11. К нахождению собственных и взаимных сопротивлений.

ми. Так, в рассматриваемой схеме рис. 2-11,а вначале следует преобразовать звезду с элементами Z_2, Z_3 и Z_4 в треугольник (рис. 2-11,в), после чего образовавшуюся четырехлучевую звезду заменить полным четырехугольником (рис. 2-11,г). Для нахождения собственных сопро-

тивлений каждого генератора достаточно сложить параллельно все его взаимные сопротивления.

Оба изложенных приема можно использовать совместно, т. е. сначала произвести ряд преобразований, а затем найти токораспределение в схеме и необходимые в ней э. д. с.

В практических расчетах коротких замыканий часто приходится определять взаимные сопротивления между точкой короткого замыкания и отдельными генераторами (или станциями). Если ток в месте короткого замыкания условно принять за единицу и произвести его распределение, полагая все э. д. с. одинаковыми, то найденные для отдельных ветвей доли этой единицы: $C_1, C_2, \dots, C_n$, называемые коэффициентами распределения, позволяют найти эти сопротивления. При отсутствии нагрузок в схеме коэффициенты распределения для генераторов характеризуют долю их участия в питании места короткого замыкания. По коэффициенту распределения C_n любого генератора (или станции) и результирующему сопротивлению схемы Z_Σ легко найти взаимное сопротивление между этим генератором и точкой короткого замыкания как¹

$$Z_{нк} = \frac{Z_\Sigma}{C_n}. \quad (2-52)$$

Запись выражения (2-51) через собственные и взаимные сопротивления особенно удобна в тех случаях, когда требуется выявить индивидуальные свойства отдельных источников или учесть влияние изменения величины и фазы отдельных э. д. с. на искомые значения токов и напряжений.

2-8. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ

Ток в любой ветви схемы без определения токов в других ее ветвях можно найти в общем случае по выражению, аналогичному (2-51); при этом должны быть известны соответствующие собственные и взаимные сопротивления для данной ветви. Когда схема приведена к простейшему виду и найден ток в месте короткого за-

¹ Это вытекает из того, что для создания в месте короткого замыкания тока равного единице, должна быть приложена э. д. с., численно равная Z_Σ .

мыкания, токораспределение в схеме проще находить путем постепенного ее развертывания, пользуясь общеизвестными формулами (см. приложение П-3).

При отсутствии напрузок и равенстве приведенных э. д. с. источников удобно пользоваться коэффициентами распределения, поскольку последние не зависят от величины тока в месте короткого замыкания, что позволяет использовать их при разных сопротивлениях аварийной ветви (т. е. при разных удаленностях точки короткого замыкания). Столь же целесообразно использование коэффициентов распределения в схемах с нагрузками, если последние входят в них на равных основаниях с генераторами, как это имеет место в схемах для аварийных составляющих (см. § 2-7) или в схемах обратной и нулевой последовательностей (см. § 14-2 и 14-3).

Напряжения отдельных точек схемы обычно определяют попутно с нахождением токораспределения. В большинстве случаев удобнее определять напряжения, идя от места повреждения, т. е. постепенно определяя падения напряжения на участках между аварийной точкой и рассматриваемой точкой схемы. Если известны э. д. с. и ток генератора, то напряжение последнего легко найти как разность этой э. д. с. и падения напряжения в нем.

2-9. МОЩНОСТЬ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Отключающую способность выключателей при номинальном напряжении U_n принято характеризовать номинальным отключаемым током $I_{от.н}$ или пропорциональной ему номинальной отключаемой мощностью

$$S_{от.н} = \sqrt{3} U_n I_{от.н}.$$

Соответственно если выбор или проверка выключателя производится по отключаемой мощности, то она должна быть сопоставлена с так называемой мощностью короткого замыкания, которая независимо от вида короткого определяется как

$$S_{кз} = \sqrt{3} U_n I_{кз}, \quad (2-53)$$

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 относительного тока и относительной мощности короткого замыкания одинаковы:

$$S_{k*}(б) = I_{k*}(б), \quad (2-54)$$

представляется возможным вести расчет непосредственно для мощностей короткого замыкания.

При этом во избежание ошибок при выборе или проверке выключателей нужно иметь в виду, что отключаемая мощность выключателя в общем случае не постоянна, а зависит от напряжения, при котором работает выключатель [Л. 33].

2-10. ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. В чем заключаются основные допущения, принимаемые в практических расчетах электромагнитных переходных процессов?

2. Какие преимущества и недостатки системы относительных единиц по сравнению с системой именованных единиц?

3. Какими соображениями следует руководствоваться при выборе базисных условий?

4. Относительные реактивности двух генераторов одинаковы. Определить, в каком соотношении находятся их реактивности, выраженные в омах, если:

а) номинальные мощности генераторов одинаковы, а их номинальные напряжения составляют соответственно U_n и nU_n ;

б) номинальные напряжения генераторов одинаковы, а их номинальные мощности составляют соответственно S_n и nS_n .

5. В цепи установлен реактор $x=5\%$ при $I_n=150$ а и $U_n=6$ кВ, который предполагается заменить реактором на $I_n=300$ а. Определить, какова должна быть относительная (в процентах) реактивность этого реактора при номинальном напряжении: а) 6 кВ и б) 10 кВ, чтобы после замены реактивность цепи осталась прежней.

6. Нагрузка с коэффициентом мощности $\cos \varphi_n$ представлена полным сопротивлением: а) $Z_n=r_n+jx_n$ и б) $Z_n=R_n||jX_n$. В обоих случаях выразить активные и реактивные составляющие полного сопротивления нагрузки в относительных единицах, приняв номинальные ток и напряжение нагрузки за базисные величины.

7. С какой целью магнитносвязанные цепи представляют схемой замещения?

8. Три точки системы связаны между собой трехобмоточным трансформатором, номинальные данные которого следующие: $S_n=31$ Мва; $U_{нд}=110$ кВ; $U_{нс}=11$ кВ; $U_{nn}=6,6$ кВ; $u_{вс}=17\%$; $u_{вн}=10,5\%$; $u_{сн}=6\%$.

Определить величины реактивностей (в омах), которые следует включить последовательно в цепи обмоток 11 и 6,6 кВ, чтобы сопротивление между этими точками системы были одинаковыми.

9. На чем основано составление приближенной схемы замещения?

10. При трехфазном коротком замыкании в точке К-3 схемы рис. 2-2,а определить начальное значение периодической слагающей тока. Решение провести в именованных и относительных единицах; при этом сделать точное и приближенное приведение схемы замещения.

11. Для условий предыдущей задачи исследовать влияние изменения коэффициентов трансформации трансформаторов Т-1 и Т-3 на величины токов при коротком замыкании в точке К-3 и сравнить последние с их значениями, полученными расчетом при приближенно приведенной схеме.

Дополнительно известно, что напряжения холостого хода:

у трансформатора Т-2 13,8/242 (+25%—15%) кВ;

у трансформатора Т-3 35(±5%)/6,6 кВ.

12. Каков порядок преобразования схемы рис. 2-8 к элементарному виду относительно точки короткого замыкания К (без рассеяния схемы в точке К)?

13. Произвести преобразование схемы рис. 2-9 относительно точки К-2 при условии, что одноименные элементы схемы различны.

14. Что понимается под собственно аварийным режимом?

15. Считая, что все элементы схемы рис. 2-8 одинаковы и равны 10 ом, определить собственное сопротивление одного из источников и его взаимное сопротивление относительно точки К.

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ СОХРАНЕНИИ СИММЕТРИИ СИСТЕМЫ

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

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 бесконечной мощности. Подобный гипотетический источник характеризуется тем, что его собственное сопротивление равно нулю и его напряжение, изменяясь с постоянной частотой, имеет неизменную амплитуду.

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.

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

Коль скоро подлежащая рассмотрению цепь предполагается без емкости, то тем самым исключается возможность образования колебательных контуров; это значительно упрощает характер протекания переходного процесса в такой цепи.

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

3-2. ТРЕХФАЗНОЕ КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ В НЕРАЗВЕТВЛЕННОЙ ЦЕПИ

Обратимся к схеме рис. 3-1, где в точке K предполагается возникновение металлического трехфазного короткого замыкания.

Пусть $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C, \dot{I}_A, \dot{I}_B$ и $\dot{I}_C$ (рис. 3-2) характеризуют предшествующий режим данной цепи, а вертикаль tt является неподвижной линией времени, т. е. мгновенные значения отдельных величин определяются проекциями на эту линию соответствующих вращающихся векторов.

После возникновения короткого замыкания схема рис. 3-1 распадается на две независимые друг от друга цепи, одна из которых остается присоединенной к источнику, а вторая превращается в короткозамкнутый контур, ток в котором поддерживается до тех пор, пока запасенная в нем энергия магнитного потока не перейдет в тепло, поглощаемое активным сопротивлением этого

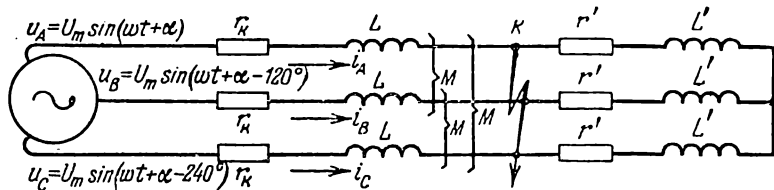


Рис. 3-1. Простейшая трехфазная электрическая цепь.

$i_{пв}$ и $i_{пс}$ (рис. 3-2) отвечают новому установившемуся режиму в этой цепи. В любой момент времени для фазы A , например, справедливо уравнение

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

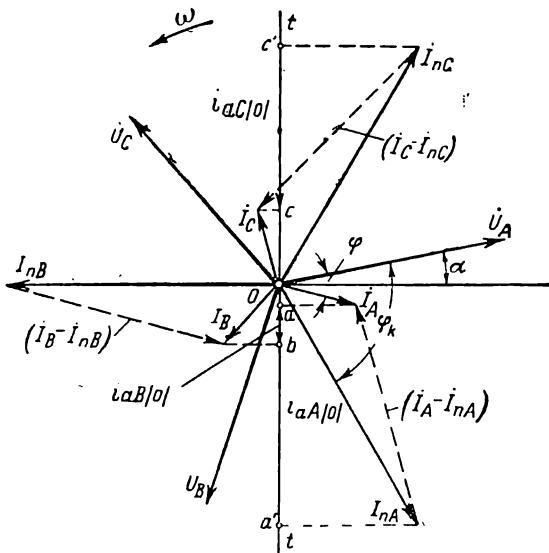


Рис. 3-2. Векторная диаграмма для начального момента трехфазного короткого замыкания.

которое, имея в виду соотношение $(i_B + i_C) = -i_A$, можно представить (опуская индекс фазы) как

$$u = ir_K + L_K \frac{di}{dt}, \quad (3-1)$$

где $L_{\kappa} = (L - M)$ — результирующая индуктивность фазы. Введение этой индуктивности позволяет дифференциальное уравнение равновесия записать так же, как для однофазной цепи.

Решение (3-1) общеизвестно; оно имеет вид

$$i = \frac{U_m}{z_k} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) + C e^{-\frac{r_k}{L_k} t}, \quad (3-2)$$

где z_k — полное сопротивление цепи короткого замыкания;

φ_k — аргумент полного сопротивления цепи короткого замыкания в комплексной форме или угол сдвига тока в этой цепи;

α — угол, определяющий значение напряжения фазы A при $t=0$, или так называемая фаза включения;

C — постоянная, определяемая из начальных условий.

Первый член правой части (3-2) представляет периодическую слагающую тока и является вынужденным током нового режима. При рассматриваемых условиях он постоянен по амплитуде ($I_{\pi m} = U_m/z_k$). Соответственно второй член представляет свободную аperiodическую слагающую тока. Она затухает по экспоненте с постоянной времени, определяемой соотношением параметров цепи:

$$T_a = \frac{L_k}{r_k} = \frac{x_k}{\omega r_k}, \text{ сек.} \quad (3-3)$$

Начальное значение аperiodической слагающей $i_{a|0|}$ легко находится из условия, что в цепи с индуктивностью ток в момент нарушения режима сохраняется неизменным. Следовательно, выражение для этой слагающей можно представить в виде

$$\begin{aligned} i_a &= C e^{-\frac{t}{T_a}} = i_{a|0|} e^{-\frac{t}{T_a}} = \\ &= [I_m \sin(\alpha - \varphi) - I_{\pi m} \sin(\alpha - \varphi_k)] e^{-\frac{t}{T_a}}, \end{aligned} \quad (3-4)$$

и тогда для полного тока будем иметь:

$$i = i_{\pi} + i_a = I_{\pi m} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) + i_{a|0|} e^{-\frac{t}{T_a}}. \quad (3-5)$$

В дальнейшем часто придется иметь дело с экспоненциальными функциями, поэтому здесь уместно напомнить некоторые их свойства и особенности.

При изменении тока (или иной величины) по затухающей экспоненте (рис. 3-3,а) его скорость затухания в момент t будет

$$\frac{di_t}{dt} = \frac{d(i_{|0|} e^{-\frac{t}{T_a}})}{dt} = -\frac{i_{|0|} e^{-\frac{t}{T_a}}}{T_a} = -\frac{i_t}{T_a}, \quad (3-6)$$

т. е. она максимальна в начальный момент и падает пропорционально току.

Подкасательная в любой точке экспоненты (рис. 3-3,а), как известно, в принятом для оси времени масштабе дает значение постоянной времени T_a . Отсюда для последней можно дать такое толкование: это время, за которое переменная величина полностью исчезла бы, если бы скорость ее затухания оставалась постоянной и равной той, которая была в исходной точке экспоненты. С другой стороны, при $t=T_a$ свободный ток составляет $e^{-1}=0,368$ своего начального значения. Следовательно, постоянная T_a может быть также определена как время, в течение которого переменная величина снижается до 0,368 своего начального значения. При этом за начальную может быть принята любая точка кривой.

Если по оси ординат для переменной величины принять логарифмический масштаб, то в такой системе координат экспоненциальная кривая превращается в прямую (рис. 3-3,б).

Графическое представление постоянной времени T_a используя для приближенного построения экспоненты. Считая в пределах каждого интервала Δt скорость изменения переменной величины неизменной и равной скорости в начале данного интервала, нетрудно по точкам построить искомую кривую. Чем больше интервал, тем, разумеется, меньше точность построения. Помимо того, нужно иметь в виду, что при таком построении постепенно накапливается ошибка за счет того, что за среднюю скорость изменения кривой в каждом интервале принимается скорость в начале интервала.

Последнее обстоятельство можно в значительной степени исправить и тем существенно повысить точность графического построения экспоненты при сохранении того же размера интервалов [Л. 39]. В самом деле, пусть на произвольном интервале Δt экспонента заменена отрезком прямой ab (рис. 3-3,в), продолжение которой до оси абсцисс дает точку c . Для отрезков aa' и bb' , характеризующих в принятом масштабе m_i значения тока в моменты времени t_k и $(t_k + \Delta t)$, имеем:

$$aa' = m_i i_{|0|} e^{-\frac{t_k}{T_a}}$$

и

$$bb' = m_i i_{|0|} e^{-\frac{(t_k + \Delta t)}{T_a}}.$$

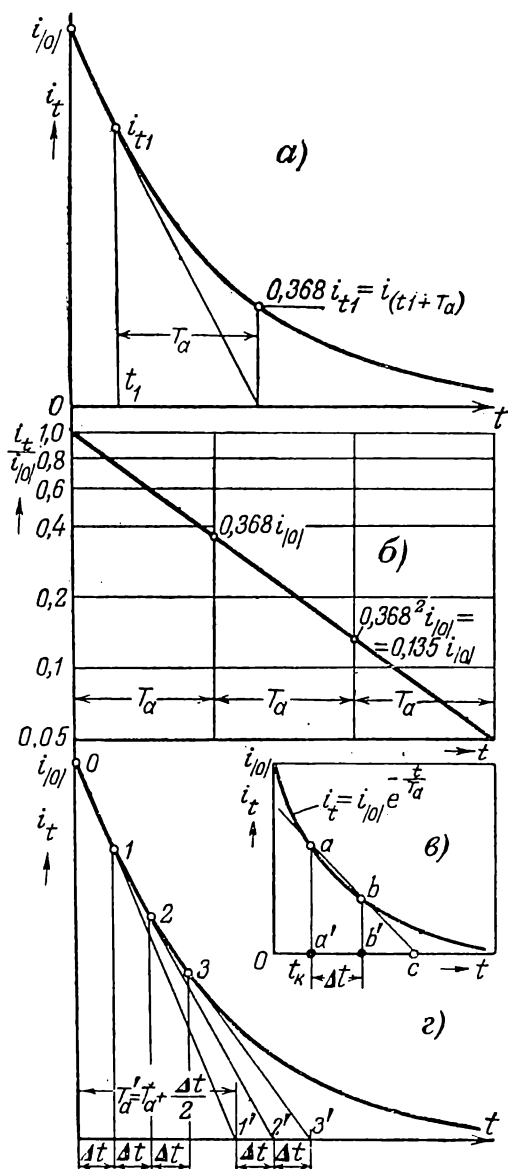


Рис. 3-3. Затухающая экспоненциальная кривая.

a — в обычной системе координат; *б* — в полулогарифмической системе координат; *в* и *г* — приближенный графический метод построения.

Далее, из подобия треугольников $aa'c$ и $bb'c$ следует:

$$\frac{aa'}{bb'} = \frac{a'c}{a'c - a'b'},$$

откуда

$$a'c = \frac{aa' \cdot a'b'}{aa' - bb'},$$

или после подстановки, имея в виду, что в масштабе оси абсцисс m_t отрезки $a'b' = m_t \Delta t$ и $a'c = m_t T'_a$, найдем выражение для постоянной времени T'_a , которая отвечает скорости изменения тока (по прямой ab) в рассматриваемом интервале:

$$T'_a = \frac{\Delta t}{1 - \frac{\Delta t}{T_a}}.$$

Если разложить знаменатель этого равенства в ряд и ограничиться первыми двумя членами полученного при этом отношения, то найдем:

$$T'_a \approx T_a + \frac{\Delta t}{2}.$$

Следовательно, чтобы уточнить графическое построение экспоненты, нужно вместо T_a использовать постоянную времени T'_a , которая больше T_a на $\Delta t/2$. Само построение производится, как показано на рис. 3-3,г. Значение кривой в конце первого интервала (точка 1) определяется пересечением ординаты для этого момента времени с наклонной прямой $O1'$; аналогично в конце второго интервала (точка 2) — как пересечение соответствующей ординаты с прямой $12'$ и т. д.

В зависимости от требуемой точности построения принимают $\Delta t = 0,1 \div 0,2$ сек.

Наконец, отметим еще одно обстоятельство. Экспоненциальную кривую, построенную при некотором значении постоянной времени T_a , можно использовать для нахождения той же переменной, но при ином значении постоянной времени. Пусть $T'_a = mT_a$. Тогда

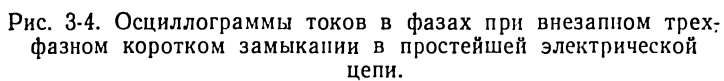
$$i_{|0|} e^{-\frac{t}{T'_a}} = i_{|0|} e^{-\frac{t}{mT_a}} = i_{|0|} e^{-\frac{t'}{T_a}},$$

откуда следует, что значение переменной при T'_a можно найти по кривой с T_a , беря вместо действительного времени t приведенное значение

$$t' = t \frac{T_a}{T'_a} = \frac{t}{m} \quad (3-7)$$

или соответственно изменив масштаб оси времени заданной кривой.

Указанные свойства экспоненциальных функций (которые в равной мере относятся и к возрастающим по экспоненте функциям) широко используют при обработке и расшифровке осциллографических записей переходных процессов.



Вернемся к выражениям (3-4) и (3-5). Коль скоро i_{Π} и 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 эту линию (см. рис. 3-2). Нетрудно заметить, что в зависимости от фазы включения начальное значение $i_{a|0|}$ 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 одновременно лишь в одной из фаз.

На рис. 3-4 представлены кривые изменения токов в фазах при трехфазном коротком замыкании. Их начальные условия соответствуют положению векторной диаграммы рис. 3-2. Как видно, чем больше апериодическая слагающая тока, тем больше смещение кривой полного тока относительно оси времени. Эта слагающая является криволинейной осью симметрии изменения полного тока, что позволяет выделить ее из заданной кривой тока. Как показано на рис. 3-4 для фазы *C*, каждая точка кривой апериодической составляющей лежит посредине вертикального отрезка между огибающими по положительным и отрицательным амплитудам кривой полного тока.

Из (3-4) и рис. 3-2 видно, что наибольшее возможное значение апериодической слагающей тока определяется не только фазой включения, но также предшествующим режимом цепи. Если ток был отстающим, то наибольшая величина $i_{a|0|}$ возникает при условиях, показанных на рис. 3-5,а. Нетрудно убедиться, что при предшествующем опережающем токе величина $i_{a|0|}$ может быть еще больше (рис. 3-5,б). Наконец, при отсутствии предшествующего тока в данной цепи величина $i_{a|0|}$ может достигать амплитуды периодической слагающей, если в момент короткого эта слагающая проходит через свой положительный или отрицательный максимум (рис. 3-5,в).

Последнее условие (отсутствие предшествующего тока) как вероятное и в то же время самое простое обычно принимают в качестве расчетного. Для такого условия найдем максимальное мгновенное значение полного тока (пик тока) i_y , которое называют ударным током короткого замыкания.

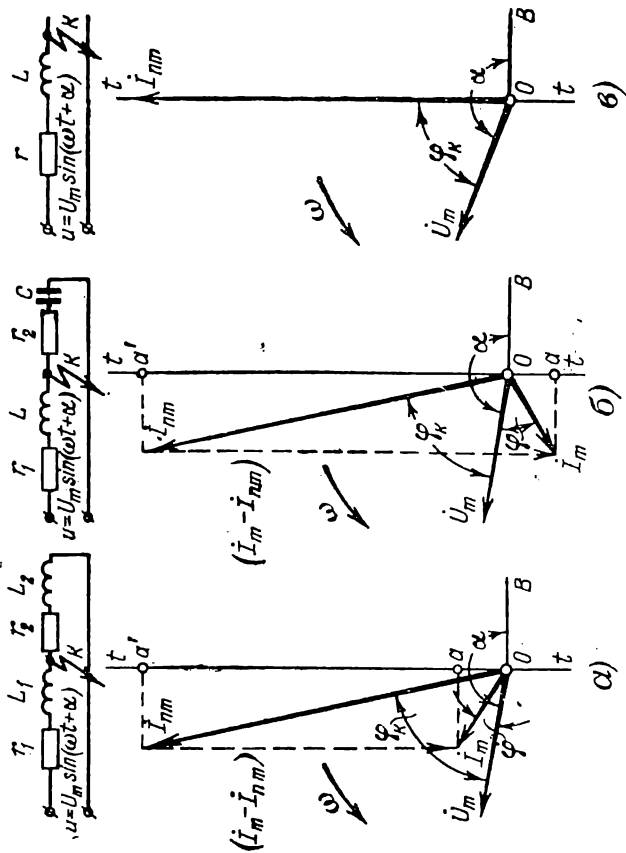


Рис. 3-5. Условия образования наибольшей величины апериодической составляющей тока короткого замыкания.

Фаза включения, при которой имеет место наибольшее значение апериодической слагающей, не предопределяет того, что именно при ней будет максимум мгновенного значения полного тока. В самом деле, из (3-4) 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

$$i = I_{\text{им}} \left[\sin(\omega t + \alpha - \varphi_K) - \sin(\alpha - \varphi_K) e^{-\frac{t}{T_a}} \right].$$

Приравняв нулю частные производные этого уравнения, т. е.

$$\frac{\partial i}{\partial t} = \omega \cos(\omega t + \alpha - \varphi_K) + \frac{1}{T_a} \sin(\alpha - \varphi_K) e^{-\frac{t}{T_a}} = 0;$$

$$\frac{\partial i}{\partial \alpha} = \cos(\omega t + \alpha - \varphi_K) - \cos(\alpha - \varphi_K) e^{-\frac{t}{T_a}} = 0,$$

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

$$\text{tg}(\alpha - \varphi_K) = -\omega T_a = -\frac{x_K}{r_K} = \text{tg}(-\varphi_K),$$

т. е. при $\alpha = 0$.

Следовательно, в предварительно разомкнутой цепи с активным сопротивлением и индуктивностью максимум мгновенного значения полного тока при коротком замыкании наступает, если в момент возникновения короткого напряжения источника проходит через нуль.

Поскольку в большинстве случаев в цепи короткого замыкания $\varphi_K \approx 90^\circ$, условие возникновения наибольшей величины апериодической слагающей тока и условие, при котором имеет место максимум мгновенного значения полного тока, очень близки друг к другу. Поэтому в практических расчетах ударный ток короткого замыкания обычно находят при наибольшем значении апериодической слагающей, как показано на рис. 3-6, считая, что он наступает приблизительно через полпериода, что при $f=50$ гц составляет около 0,01 сек с возникновения короткого.

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

$$i_y = I_{nm} + I_{nm} e^{-\frac{0.01}{T_a}} = k_y I_{nm}, \quad (3-8)$$

где

$$k_y = 1 + e^{-\frac{0.01}{T_a}}. \quad (3-9)$$

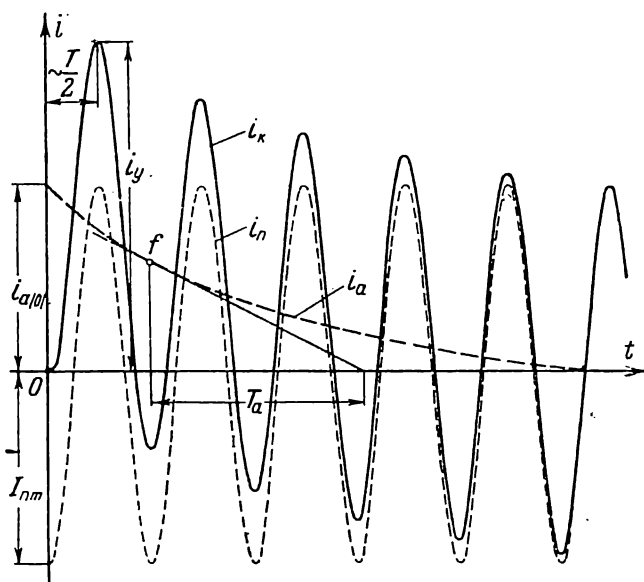


Рис. 3-6. Осциллограмма тока короткого замыкания при наибольшей аperiodической слагающей.

называют ударным коэффициентом, который показывает превышение ударного тока над амплитудой периодической слагающей; его величина находится в пределах ¹

$$1 < k_y < 2,$$

что соответствует предельным значениям T_a , т. е. $T_a = 0$ ($L = 0$) и $T_a = \infty$ ($r = 0$). Зависимость $k_y = f(T_a)$ дана на рис. 3-7.

¹ Не считая случая, представленного на рис. 3-5,б, когда $k_y > 2$.

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; спустя 0,1—0,3 сек она практически исчезает.

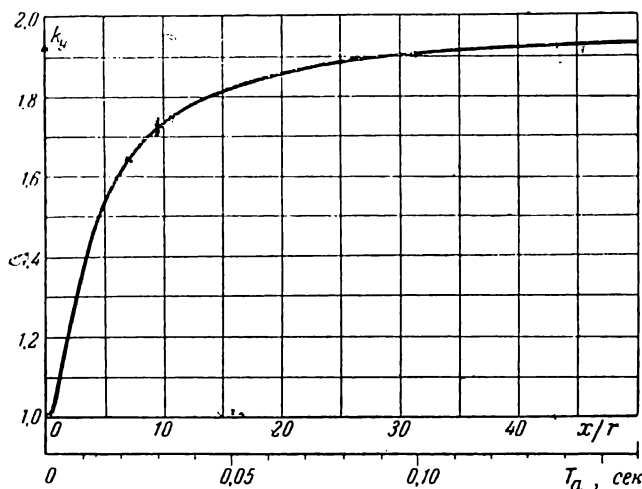


Рис. 3-7. Кривая зависимости ударного коэффициента от постоянной времени T_a (или отношения $\frac{x}{r}$).

Следует еще раз подчеркнуть, что апериодические слагающие токов в фазах всегда 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, называя действующее значение, например, тока в произвольный момент переходного процесса, будем иметь в виду, что оно определяется как среднеквадратичное значение за один период T , в середине которого находится рассматриваемый момент. В соответ-

ствии с этим при известной зависимости $i=f(t)$ для действующего значения тока в момент t можно написать:

$$I_t = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} i^2 dt}. \quad (3-10)$$

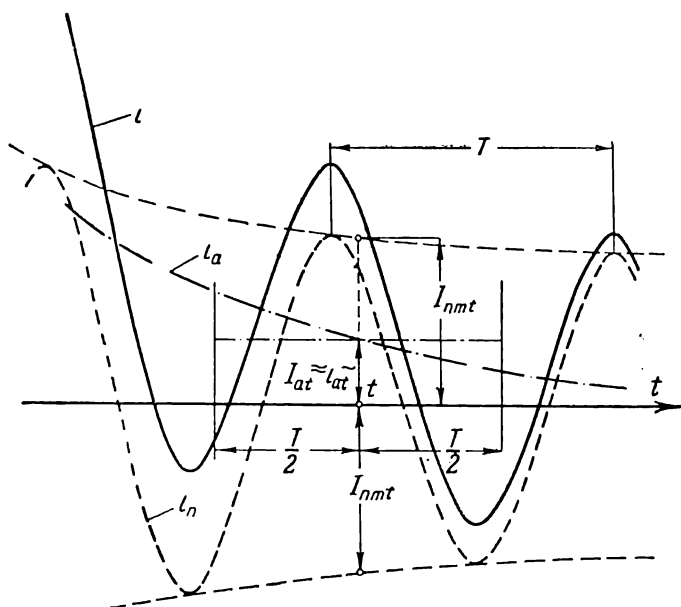


Рис. 3-8. К определению действующего значения тока при переходном процессе.

В общем случае зависимость $i=f(t)$ может быть очень сложной. Поэтому для упрощения подсчета I_t обычно принимают, что за рассматриваемый период обе слагающие тока не изменяются, т. е. амплитуда периодической слагающей постоянна и аperiodическая слагающая также неизменна; каждая из них равна своему значению в данный момент t . Такое допущение относительно периодической слагающей приходится делать, когда источником является генератор конечной мощности; для условий же § 3-2 постоянство амплитуды соблюдается.

Сказанное иллюстрировано рис. 3-8, где для общности принято, что амплитуда периодической слагающей тока также изменяется. Для заданного момента t амплитуду этой слагающей $I_{\pi m t}$ определяют по соответствующей огибающей (см. пунктирную линию). Тогда действующее значение данной слагающей в момент времени t находят как

$$I_{\pi t} = \frac{I_{\pi m t}}{\sqrt{2}}. \quad (3-11)$$

Соответственно действующее значение аperiodической слагающей за один период при принятом допущении равно ее мгновенному значению в момент, находящийся посередине данного периода (рис. 3-8), т. е.

$$I_{at} = i_{at}. \quad (3-12)$$

Действующее значение полного тока в тот же момент будет

$$I_t = \sqrt{I_{\pi t}^2 + I_{at}^2}. \quad (3-13)$$

Точность такого приближенного определения обычно удовлетворяет целям практики.

Наибольшее действующее значение тока короткого замыкания I_y имеет место за первый период переходного процесса. При условии, когда $i_{a|0|} = I_{\pi m}$, его можно определить по (3-13), придав последнему следующий вид:

$$I_y = \sqrt{I_{\pi}^2 + [(k_y - 1) \sqrt{2} I_{\pi}]^2} = I_{\pi} \sqrt{1 + 2(k_y - 1)^2}, \quad (3-14)$$

где k_y — ударный коэффициент.

В соответствии с указанными выше пределами изменений k_y величина отношения I_y/I_{π} находится в пределах

$$1 < \frac{I_y}{I_{\pi}} < \sqrt{3}.$$

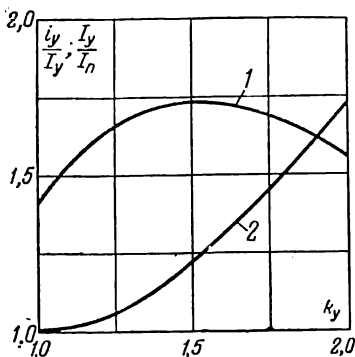


Рис. 3-9. Кривые изменения отношений i_y/I_y (кривая 1) и I_y/I_{π} (кривая 2) в зависимости от ударного коэффициента k_y .

На рис. 3.9 показаны изменения отношений $\frac{I_y}{I_n}$ и $\frac{i_y}{I_y}$ в зависимости от k_y . Следует обратить внимание, что отношение $\frac{i_y}{I_y}$ изменяется в сравнительно узких пределах и его максимум ($\sqrt{3}$) наступает при $k_y = 1,5$.

3-4. ПРИБЛИЖЕННОЕ РЕШЕНИЕ

Представим выражение для амплитуды периодической слагающей тока короткого замыкания в несколько ином виде, а именно:

$$I_{nm} = \frac{U_m}{z_k} = \frac{U_m}{x_k \sqrt{1+C^2}} = \frac{I_{nm}(r_k=0)}{\sqrt{1+C^2}},$$

где $C = \frac{r_k}{x_k}$ и $I_{nm}(r_k=0) = \frac{U_m}{x_k}$ — значение той же слагающей при $r_k = 0$.

Отсюда видно, что преувеличение периодической слагающей тока, вызванное пренебрежением r , можно характеризовать отношением

$$\frac{I_{nm}(r_k=0)}{I_{nm}} = \sqrt{1+C^2}. \quad (3-15)$$

Если считать, что последнее не должно превышать 1,05 (что практически обычно вполне допустимо), то из (3-15) легко установить, что это условие будет соблюдаться при $C \leq \sqrt{1,05^2 - 1} \approx \frac{1}{3}$, т. е. определение I_n

можно производить без учета r_k , когда $r_k \leq \frac{1}{3} x_k$. При этом, конечно, фаза данной слагающей тока получается искаженной: $\varphi_k = 90^\circ$ вместо $\varphi_k = 72^\circ$ при $r_k = \frac{1}{3} x_k$, т. е. погрешность в сдвиге составляет 25% . Что касается апериодической слагающей, то при $r_k = 0$ ее затухание вообще отсутствует и $k_y = 2$, в то время как при $r_k = \frac{1}{3} x_k$ имеем $k_y = 1,37$; преувеличение ударного тока составляет уже

$$\frac{1,05 \cdot 2 - 1,37}{1,37} \cdot 100 = 53\%,$$

а электродинамического эффекта — почти в 2,5 раза.

Аналогично легко установить, что при тех же условиях преувеличение в наибольшем действующем значении 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 тока. Очевидно, достаточно правильная оценка аperiodической слагающей и полных величин тока, в которых ее участие существенно, может быть получена при непрременном учете активного сопротивления цепи. Последний можно сделать приближенно и даже в неявной форме путем использования 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.

Рассмотрим, в какой мере приближенное значение постоянной времени T_a влияет на погрешность, которая получается при определении искомой величины. Пусть истинная величина этой постоянной времени T_a , а ее приближенное значение — $T'_a = mT_a$. Тогда для разности двух экспонент имеем:

$$\Delta_t = Ae^{-\frac{t}{mT_a}} - Ae^{-\frac{t}{T_a}} = A \left(e^{-\frac{t}{mT_a}} - e^{-\frac{t}{T_a}} \right);$$

при этом, когда $m > 1$, $\Delta_t > 0$ и соответственно при $m < 1$ $\Delta_t < 0$. На рис. 3-10 приведены экспоненты при $m = 0,5$; 1,0 и 2, а также кривые разности Δ_t между каждой из этих крайних экспонент и средней экспонентой.

Из $\frac{d\Delta_t}{dt} = 0$ находим, что максимум разности $\Delta_{\text{макс}}$ наступает при

$$t_m = T_a \frac{m}{m-1} \ln m \quad (3-16)$$

и его величина составляет

$$\Delta_{\text{макс}} = A(1-m)m^{\left(\frac{m}{1-m}\right)}. \quad (3-17)$$

Отметим, что абсолютная величина $\Delta_{\text{макс}}$ одинакова при отклонении T'_a относительно T_a в m раз как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения. Наступают же эти максимумы, разумеется, неодновременно. Нетрудно убедиться, что если при $m=n$ максимум $\Delta_{\text{макс}}$ имеет место в момент t_m , то при $m=1/n$ он наступает в момент $t'_m = t_m/n$.

Практический интерес представляет собственно не абсолютная, а относительная погрешность приближенного определения, т. е.

$$\Delta_t^* = \frac{e^{-\frac{t}{mT_a}} - e^{-\frac{t}{T_a}}}{e^{-\frac{t}{T_a}}} = e^{-\frac{t}{T_a}} \left(\frac{1-m}{m} \right) - 1.$$

Очевидно, при $m > 1$ с ростом t величина Δ беспрестанно увеличивается, а при $m < 1$ она стремится к -1 . Следовательно, должным образом выявить относительное отклонение только одних экс-

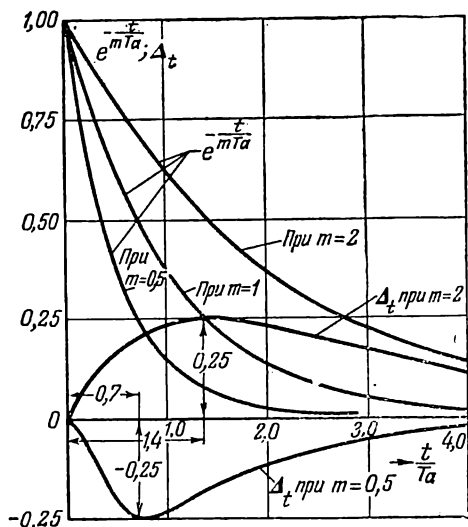


Рис. 3-10. Сопоставление экспоненциальных кривых с разными постоянными времени.

поненциальных функций не представляется возможным. Поэтому рассмотрим получающиеся относительные погрешности в полных величинах, включающих в себя также и некоторую неизменную слагающую B , т. е.

$$\Delta_t^* = \frac{(Ae^{-\frac{t}{mT_a}} + B) - (Ae^{-\frac{t}{T_a}} + B)}{Ae^{-\frac{t}{T_a}} + B} = \frac{e^{-\frac{t}{mT_a}} - e^{-\frac{t}{T_a}}}{e^{-\frac{t}{T_a}} + \frac{B}{A}}.$$

Теперь из $\frac{d\Delta_t}{dt} = 0$ после преобразований имеем:

$$\chi^m + \frac{m}{m-1} \cdot \frac{B}{A} \chi^{(m-1)} - \frac{1}{m-1} \cdot \frac{B}{A} = 0,$$

где $\chi = e^{-\frac{t}{mT_a}}$.

Решение этого уравнения в общем виде невозможно. Для заданных значений B/A и m корни уравнения с достаточной точностью проще всего найти подбором. Результаты такого подсчета для ряда

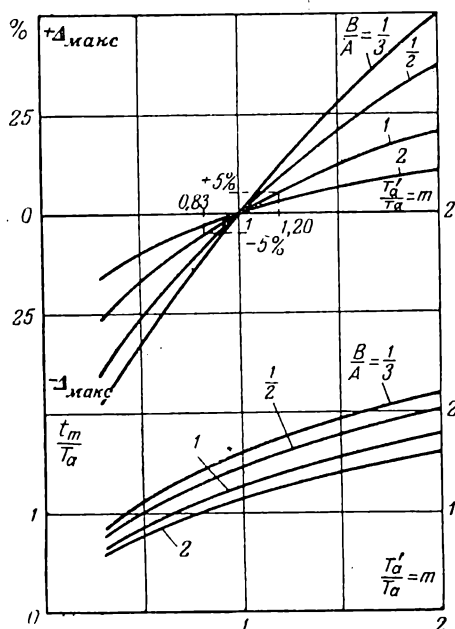


Рис. 3-11. Максимальные погрешности, вызванные отклонением постоянной времени T_a от ее истинной величины, и моменты их наступления.

значений B/A представлены на рис. 3-11. Понятно, с увеличением расхождения между T'_a и T_a (т. е. с увеличением отклонения m от 1) максимальная относительная погрешность увеличивается и, напротив, с ростом отношения B/A (т. е. с увеличением неизменной слагающей) она сравнительно быстро снижается. Для принятого допустимого диапазона максимальной погрешности полной величины кривые рис. 3-11 позволяют установить пределы точности оцен-

ки T'_a . Так, например, для того чтобы при $B/A=1$ было $\Delta_{\max} \leq \pm 5\%$, нужно, чтобы $T'_a = (0,83 \div 1,20) T_a$.

Как видно из кривых $t_m/T_a = f(m)$, время наступления $\Delta_{\max}$ увеличивается с ростом m и падает с увеличением B/A .

Используя (3-8) и (3-14), нетрудно установить допустимые отклонения приближенной величины постоянной времени T'_a , с тем чтобы ошибки в определении

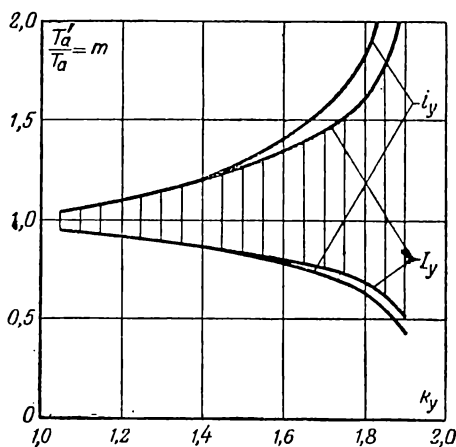


Рис. 3-12. Кривые, ограничивающие зону допустимого отклонения постоянной времени T'_a , исходя из требования, чтобы погрешность в токах i_y и I_y не превышала $\pm 5\%$.

ударного тока и наибольшего действующего значения тока короткого замыкания не выходили за пределы $\pm 5\%$. Результаты такого подсчета приведены на рис. 3-12. Для каждого значения ударного коэффициента

k_y допускаемые по заданному условию пределы $m = \frac{T'_a}{T_a}$

ограничены соответствующими кривыми рис. 3-12. Чем меньше k_y , тем уже диапазон допускаемого отклонения m . Для $k_y=1,8$ по рис. 3-7 $T_a=0,045$ сек; если приближенно вычисленная T'_a согласно данным рис. 3-12 будет находиться в пределах $T'_a = (0,65 \div 1,83) T_a = 0,029 \div 0,082$ сек, то ошибка в ударном токе не будет превышать $\pm 5\%$.

3-5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ПОСТОЯННОЙ ВРЕМЕНИ

Для цепи, состоящей из последовательно соединенных элементов, определение постоянной времени T_a не представляет труда. Ее значение легко находится по выражению (3-3), где под x_k и z_k следует понимать соответственно суммарные индуктивное и активное сопротивления всей короткозамкнутой цепи.

Иное положение имеет место в сложной, разветвленной схеме. Нахождение свободного тока в любой ветви такой схемы является знакомой задачей, которая рассматривается в курсе теоретических основ электротехники. Как известно, ее решение наиболее эффективно достигается путем применения преобразования Лапласа, т. е. с использованием операторного метода. В общем случае для свободного тока произвольной ветви имеем:

$$I_a = I_{a1}e^{p_1 t} + I_{a2}e^{p_2 t} + \dots + I_{an}e^{p_n t}, \quad (3-18)$$

где каждое из слагаемых представляет частный свободный ток.

Величины $p_1, p_2, \dots, p_n$ являются корнями характеристического уравнения $z(p) = 0$, где $z(p)$ представляет собой результирующее операторное сопротивление заданной схемы. При отсутствии емкости все корни характеристического уравнения являются вещественными отрицательными величинами и для них можно написать:

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

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

Начальные значения частных свободных токов $I_{a1}, I_{a2}, \dots, I_{an}$ находятся непосредственно из формулы разложения, т. е. при переходе от операторной функции к временной. Следует отметить, что эти значения токов, а также величины постоянных времени $T_{a1}, T_{a2}, \dots, T_{an}$ являются функциями всех элементов схемы.

Такой общий и строгий путь решения принципиально возможен, но уже для мало-мальски сложной схемы он 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 представляется необходимым найти приближенное, более простое решение.

Специальный анализ этого вопроса¹ приводит к выводу, что с достаточной для практики точностью выражение (3-18) можно заменить приближенным:

$$I_a = I_{a|0} e^{-\frac{t}{T_{a.э}}}, \quad (3-19)$$

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

$$T_{a.э} = \frac{x_\Sigma}{\omega r_\Sigma}, \quad (3-20)$$

причем здесь x_Σ — суммарное индуктивное сопротивление схемы, найденное при условии, что все $r=0$, и r_Σ — суммарное активное сопротивление схемы, найденное при условии, что все $x=0$. Следует отметить, что такое искусственное определение x_Σ и r_Σ не только существенно упрощает решение, но даже приводит к более точной оценке $T_{a.э}$, чем если последнюю определять, исходя из составляющих полного сопротивления схемы.

Начальное значение $I_{a|0}$ в (3-19) всегда 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 часто не прибегают к подсчету $T_{a.э}$, а принимают для нее некоторое среднее значение в соответствии с принятым для данных условий ударным коэффициентом. Так, при $k_y=1,8$ значение $T_a=0,045$ сек, которое считают одним и тем же для всех ветвей схемы.

Пример 3-1. Для схемы рис. 3-13 при трехфазном коротком замыкании в точке K найти затухание свободных токов и эквивалентную постоянную времени. Сопротивления элементов и напряжения

¹ Проведен Н. Г. Гейниным.

источника заданы в операторной форме, причем их численные значения даны в относительных единицах при некоторых базисных условиях.

Результирующее операторное сопротивление схемы будет

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

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

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

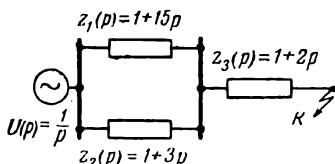
т. е. $p_1 = -0,091$; соответственно

$$T_{a1} = \frac{-1}{-0,091} = 11, \text{ или } T_{a1} = \frac{11}{314} = 0,035 \text{ сек};$$

$p_2 = -0,405$; соответственно

$$T_{a2} = \frac{-1}{-0,405} = 2,47, \text{ или } T_{a2} = \frac{2,47}{314} = 0,008 \text{ сек}.$$

Рис. 3-13. Схема и данные к примеру 3-1.



Выражение для тока в операторной форме будет

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

Используя известную формулу разложения, найдем ток как временную функцию:

$$I_t = \frac{F_1(0)}{F_2(0)} + \sum_{k=1}^{k=n} \frac{F_1(p_k)}{p_k F'_2(p_k)} e^{p_k t},$$

что в данном случае дает:

$$\begin{aligned} I_t &= \frac{2}{3} + \frac{18(-0,091) + 2}{(-0,091)[2 \cdot 81(-0,091) + 40]} e^{-0,091t} + \\ &+ \frac{18(-0,405) + 2}{(-0,405)[2 \cdot 81(-0,405) + 40]} e^{0,405t} = \\ &= 0,67 - 0,16e^{-0,091t} - 0,51e^{-0,405t}. \end{aligned}$$

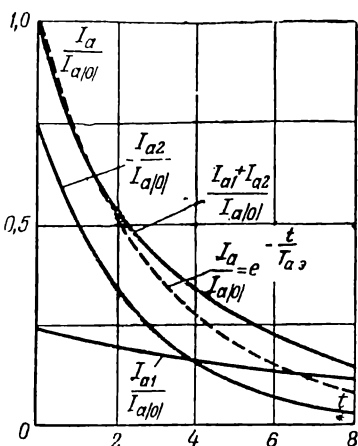


Рис. 3-14. Кривые изменения свободных токов для условий примера 3-1.

Начальные значения частных свободных токов в долях принужденного тока будут:

$$I_{a1|0} = \frac{0,16}{0,67} = 0,24$$

и

$$I_{a2|0} = \frac{0,51}{0,67} = 0,76.$$

Изменение этих токов (а также их суммы) во времени показано на рис. 3-14. Здесь время выражено в относительных единицах; для перевода его в секунды нужно согласно (2-18а) относительное значение времени разделить на $\omega_c = 314$.

Для определения эквивалентной постоянной времени $T_{a.э}$ находим, полагая в схеме рис. 3-13 $r = 0$:

$$x_{*} = \frac{15,3}{15 + 3} + 2 = 4,5;$$

аналогично при $x = 0$

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

Следовательно, в соответствии с (3-20) имеем:

$$T_{a.э} = \frac{4,5}{1,5} = 3$$

или

$$T_{a.э} = \frac{3}{314} \approx 0,01 \text{ сек.}$$

Экспонента с этой постоянной времени показана на рис. 3-14. Ее расхождение с истинной кривой $\left(\frac{I_{a1} + I_{a2}}{I_a|0} \right)$ к моменту наступления ударного тока, т. е. при $t = 314 \cdot 0,01 = 3,14$, составляет 0,04, что дает пресумевшение ударного коэффициента примерно на 3%.

3-6. УЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ ЦЕПИ

До сих пор предполагалось, что при переходных процессах параметры всех элементов цепи остаются неизменными. В действительности это условие практически соблюдается не у всех элементов. Параметры некоторых

из них могут в значительной мере зависеть от величины протекающего тока. Следовательно, для нахождения последней приходится решать схему с нелинейными элементами. Рассмотрим влияние двух основных факторов, вызывающих нелинейность элементов, и их практический учет.

а) Изменение параметров ферромагнитных проводников

Как известно, активное сопротивление r и внутреннее индуктивное сопротивление $x_{\text{внут}}$ (обусловленное магнитным потоком, замыкающимся в сечении самого проводника) стального провода зависят от проходящего по нему тока. Эта зависимость довольно существенна при изменении тока в некотором диапазоне, а за пределами последнего указанные сопротивления практически можно считать постоянными.

Для различных сечений стальных проводов марки ПС в ГОСТ 5800-51 даны зависимости $r=f(I)$ и $x_{\text{внут}}=f(I)$ при токах до 100—200 а. Используя их, можно графоаналитически [Л. 41] найти величину тока при коротком замыкании в заданной схеме. Однако такой путь решения достаточно громоздок и трудоемок. Как показано в [Л. 43], значительно проще и с приемлемой точностью решение можно получить, характеризуя стальной провод в рассматриваемом диапазоне изменений тока постоянными расчетными параметрами. Это приводит к обычному решению линейной цепи. С этой целью по известным $r=f(I)$ и $x_{\text{вн}}=f(I)$ для каждого сечения стального провода нужно построить вольт-амперную характеристику

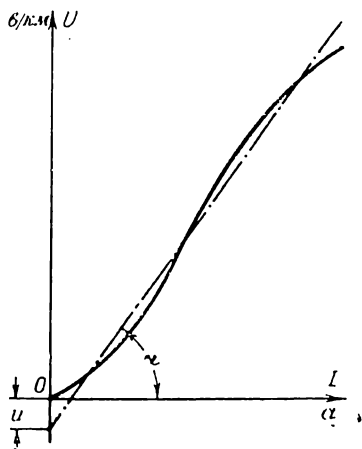


Рис. 3-15. Вольт-амперная характеристика стального провода и ее спрямление.

$$U = IV\sqrt{r^2 + (x_{\text{внут}} + x_{\text{вн}})^2},$$

где $x_{вп}$ — внешнее индуктивное сопротивление, которое можно принимать равным 0,4 ом/км, и затем заменить ее подходящей прямой (рис. 3-15). Наклон последней к оси абсцисс пропорционален расчетному сопротивлению данного провода:

$$\operatorname{tg} \alpha \equiv z \text{ ом/км}, \quad (3-21)$$

а u [в/км] является как бы э. д. с., обусловленной остаточным магнетизмом этого провода; значения u могут быть как положительными, так и отрицательными.

Результаты подсчетов z и u для стандартных стальных проводов марки ПС приведены в табл. 3-1 (заимствована из [Л. 42]). Этими параметрами можно характеризовать стальные провода при токах от 20 до 200 а, причем произведенное спрямление вольт-амперной характеристики вызывает погрешность в искомом токе, которая, как правило, не превышает $\pm 10\%$.

Таблица 3-1

Расчетные параметры стальных проводов

Расчетные параметры	Марка провода				
	ПС-25	ПС-35	ПС-50	ПС-70	ПС-95
$z, \text{ ом/км}$	6,5	5,3	4,0	2,7	2,0
$u, \text{ в/км}$	7	—5	—15	—21	—10

Аргументы этих сопротивлений настолько близки между собой (от 16 до 23°), что практически их можно считать одинаковыми и равными $\varphi_z = 20^\circ$. Это еще больше позволяет упростить расчет, поскольку представляется возможность производить действия непосредственно с модулями полных сопротивлений стальных проводов всех сечений.

Если x_c и r_c — соответственно индуктивное и активное сопротивления схемы до места присоединения линии со стальными проводами, то при трехфазном коротком замыкании на расстоянии l (км) от начала этой линии начальное значение периодической слагающей тока может быть найдено из очевидного равенства

$$U_\phi^2 = (U_a + R_z I)^2 + (U_p + X_z I)^2,$$

из которого, пренебрегая весьма малой величиной $(U_F R_\Sigma - U_a X_\Sigma)^2$, имеем:

$$I = \frac{U_\Phi}{\sqrt{R_\Sigma^2 + X_\Sigma^2}} - \frac{(U_a R_\Sigma + U_p X_\Sigma)}{R_\Sigma^2 + X_\Sigma^2}, \quad (3-22)$$

где U_Φ — фазное напряжение источника, v ;

$$R_\Sigma = r_c + z l \cos \varphi_z = r_c + 0,94 z l, \text{ ом};$$

$$X_\Sigma = x_c + z l \sin \varphi_z = x_c + 0,34 z l, \text{ ом};$$

$$U_a = u l \cos \varphi_z = 0,94 u l, \text{ в};$$

$$U_p = u l \sin \varphi_z = 0,34 u l, \text{ в}$$

(здесь $\cos \varphi_z$ и $\sin \varphi_z$ приняты при $\varphi_z = 20^\circ$).

При нескольких последовательно соединенных линиях со стальными проводами разных сечений величины R_Σ , X_Σ , U_a и U_p в (3-22) должны включать в себя суммы соответствующих расчетных параметров. Когда в системе имеются трансформаторы, то при составлении схемы замещения расчетные параметры рассматриваемых линий должны быть приведены обычным образом (см. § 2-4) к ступени напряжения, которая выбрана за базисную.

Обычно второй член в (3-22) достаточно мал, и им часто можно пренебречь.

При токах свыше 200 a внутреннее индуктивное сопротивление стального провода резко падает и суммарное индуктивное сопротивление линии со стальными проводами в этом случае можно принимать $x = 0,5 \text{ ом/км}$. При этом активное сопротивление провода следует брать в соответствии с действительной температурой провода (см. ниже).

Пример 3-2. Для схемы и при данных рис. 3-16 определить начальные значения периодической слагающей тока при трехфазных коротких замыканиях поочередно в точках К-1 и К-2.

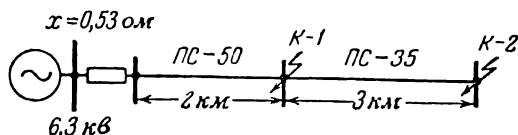


Рис. 3-16. Схема и данные к примеру 3-2.

При коротком в $K-1$, используя данные табл. 3-1, имеем:
 $r = R_{\Sigma} = 4 \cdot 2 \cdot 0,94 = 7,52 \text{ ом}; X_{\Sigma} = 0,53 + 4 \cdot 2 \cdot 0,34 = 3,25 \text{ ом}.$

Пренебрегая в (3-22) вторым членом, получим:

$$I = \frac{6300}{\sqrt{3} \sqrt{7,52^2 + 3,25^2}} = 445 \text{ а.}$$

Поскольку ток получился более 200 а. его значение должно быть определено при иных значениях параметров данной линии, а именно:

$$r = R_{\Sigma} = \frac{150}{50} \cdot 2 = 6 \text{ ом и } x = 0,5 \cdot 2 = 1 \text{ ом},$$

и, следовательно, искомый ток будет

$$I = \frac{6300}{\sqrt{3} \sqrt{6^2 + (0,53 + 1)^2}} = 590 \text{ а.}$$

При коротком в $K-2$ можно ожидать $I < 200 \text{ а.}$ Поэтому для линий используем данные табл. 3-1. При этом

$$R_{\Sigma} = (4 \cdot 2 + 5,3 \cdot 3) \cdot 0,94 = 22,52 \text{ ом};$$

$$X_{\Sigma} = 0,53 + (4 \cdot 2 + 5,3 \cdot 3) \cdot 0,34 = 8,65 \text{ ом};$$

$$U_a = - (15 \cdot 2 + 5 \cdot 3) \cdot 0,94 = - 42 \text{ в};$$

$$U_p = - (15 \cdot 2 + 5 \cdot 3) \cdot 0,34 = - 15,3 \text{ в}.$$

По (3-22) имеем:

$$I = \frac{6300}{\sqrt{3} \sqrt{22,52^2 + 8,65^2}} - \frac{(42 \cdot 22,52 + 15,3 \cdot 8,65)}{22,52^2 + 8,65^2} = \\ = 151 + 2 = 153 \text{ а.}$$

Если бы обе линии характеризовать параметрами для больших токов, то ток получился бы 190 а, т. е. больше на 24%.

б) Увеличение активного сопротивления проводников от их нагрева током короткого замыкания

Когда в цепи имеется проводник, активное сопротивление которого составляет значительную часть полного сопротивления всей цепи, то при протекании по нему большого тока короткого замыкания нагрев проводника быстро возрастает. Последнее приводит к увеличению активного сопротивления проводника, что в свою очередь вызывает снижение тока. Этот эффект так назы-

ваемого теплового спада тока короткого замыкания и его практический учет впервые исследованы И. А. Сыромятниковым [Л. 40].

Пусть проводник сечением q мм² и длиной l м с удельным электрическим сопротивлением ρ_{ϑ_0} (при начальной температуре ϑ_0) и индуктивным сопротивлением x (ом/м) присоединен через x_c ом к источнику, напряжение которого по амплитуде неизменно. При трехфазном коротком замыкании в конце этого проводника начальное значение периодической слагающей тока, очевидно, будет

$$I_{n|0|} = \frac{U_{\Phi}}{\sqrt{\left(\rho_{\vartheta_0} \frac{l}{q}\right)^2 + (x_c + xl)^2}} = \frac{U_{\Phi}}{\sqrt{r_{\vartheta_0}^2 + X_{\Sigma}^2}}. \quad (3-23)$$

Теперь напишем в дифференциальной форме уравнение теплового баланса для данного проводника, рассматривая ввиду кратковременности короткого замыкания процесс его нагрева адиабатическим, т. е. не считаясь с рассеянием выделяющегося в проводнике тепла:

$$\left(\frac{U_{\Phi}}{\sqrt{r_{\vartheta}^2 + X_{\Sigma}^2}} \right)^2 r_{\vartheta} dt = c \gamma q l d\vartheta; \quad (3-24)$$

здесь

$$r_{\vartheta} = r_{\vartheta_0} \frac{1 + \alpha \vartheta}{1 + \alpha \vartheta_0},$$

где α — температурный коэффициент сопротивления материала проводника при 0°С, 1/град;

c — средняя удельная теплоемкость материала, вт · сек/г · град;

γ — удельный вес материала, г/см³.

После разделения переменных (t и ϑ) и дополнительных преобразований уравнение (3-24) можно представить в виде

$$\left(\frac{I_{n|0|}}{q} \right)^2 dt = \frac{c \gamma}{\rho_{\vartheta_0}} \left[a \frac{1 + \alpha \vartheta}{1 + \alpha \vartheta_0} + (1 - a) \frac{1 + \alpha \vartheta_0}{1 + \alpha \vartheta} \right] d\vartheta, \quad (3-25)$$

где

$$a = \frac{r_{\vartheta_0}^2}{r_{\vartheta_0}^2 + X_{\Sigma}^2}$$

и

$$1 - a = \frac{X_{\Sigma}^2}{r_{\vartheta_0}^2 + X_{\Sigma}^2}.$$

Интегрируя левую часть (3-25) в пределах от 0 до t и правую от ϑ_0 по ϑ , получим зависимость между температурой проводника и временем его нагрева током короткого замыкания:

$$\Delta = \left(\frac{I_{n|0|}}{q} \right)^2 t = \frac{c\gamma}{\rho_{\vartheta_0}} \left\{ \frac{a}{1 + \alpha\vartheta_0} [(\vartheta - \vartheta_0) + \right. \\ \left. + \frac{\alpha}{2} (\vartheta^2 - \vartheta_0^2) \right] + \frac{(1-a)(1 + \alpha\vartheta_0)}{\alpha} \ln \frac{1 + \alpha\vartheta}{1 + \alpha\vartheta_0} \right\}. \quad (3-26)$$

При температуре проводника ϑ величина тока будет

$$I_{\Pi} = \frac{U_{\Phi}}{\sqrt{r_{\vartheta}^2 + X_{\Sigma}^2}} = \frac{U_{\Phi} n_{\vartheta}}{\sqrt{r_{\vartheta_0}^2 + X_{\Sigma}^2}} = I_{n|0|} n_{\vartheta},$$

где

$$n_{\vartheta} = \frac{I_{\Pi}}{I_{n|0|}} = \frac{1}{\sqrt{a \left(\frac{1 + \alpha\vartheta}{1 + \alpha\vartheta_0} \right)^2 + (1-a)}} \quad (3-27)$$

— коэффициент, учитывающий тепловой спад тока.

Зависимость $\vartheta = f(t)$ определяется из (3-26).

Полученные выражения, как видно, достаточно сложны. Для упрощения подобных расчетов служит диаграмма рис. 3-17, построенная по (3-26) и (3-27). В ней $a =$

$= \frac{r_{\vartheta_0}(r_c + r_{\vartheta_0})}{(r_c + r_{\vartheta_0})^2 + X_{\Sigma}^2}$, т. е. она позволяет дополнительно

учитывать активное сопротивление r_c прочих элементов цепи, которое принимается постоянным. При построении диаграммы принято: $\vartheta_0 = 65^\circ \text{C}$; для меди и алюминия $\alpha = 0,004$; для стали $\alpha = 0,0045$ (при 0°C). Продолжения кривых пунктиром и дополнительные пунктирные кривые относятся к стальным проводникам, причем нужно иметь в виду, что для этих проводников диаграмма дает результаты с грубым приближением.

Из физической сущности явления и характера кривых рис. 3-17 следует, что тепловой спад тока короткого

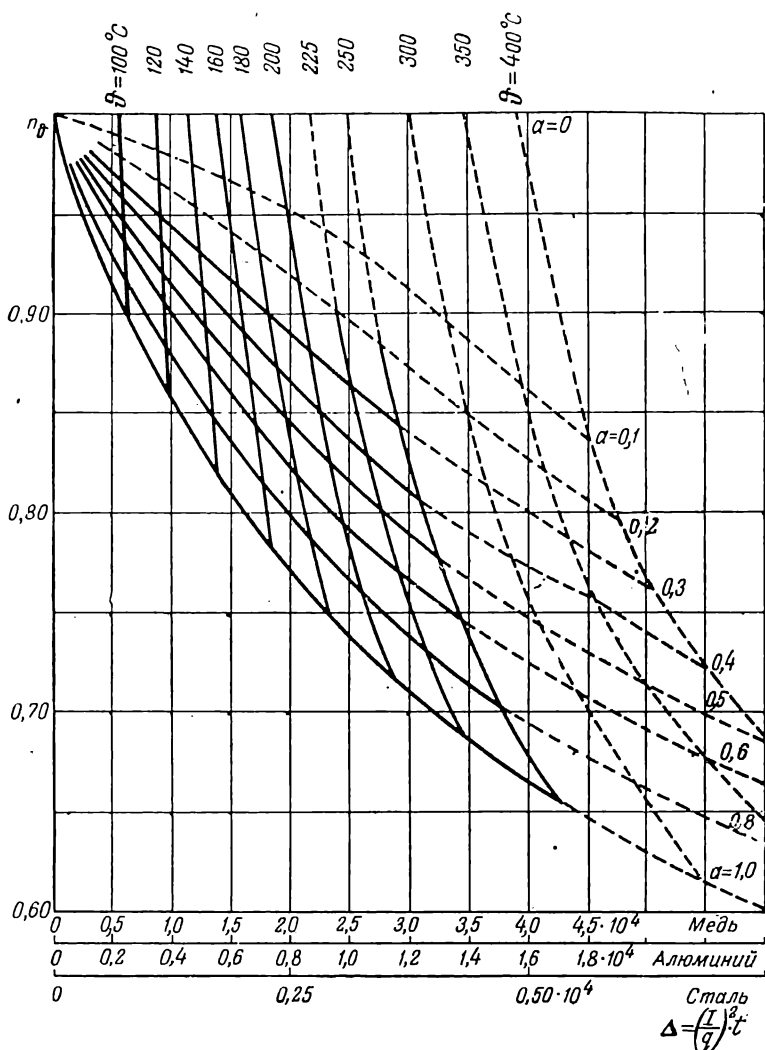


Рис. 3-17. Диаграмма для учета теплового спада тока короткого замыкания.

замыкания тем интенсивнее, чем больше плотность тока и продолжительность короткого замыкания, а также чем большую долю составляет активное сопротивление данного проводника от общего сопротивления цепи короткого замыкания. Рассматриваемый фактор особенно ска-

зывается в достаточно протяженных кабельных сетях.

Пример 3-3. К шинам 10,5 кВ бесконечно мощного источника через реактор с $x=4\%$ при $U_n=10$ кВ и $I_n=500$ А присоединен кабель с медными жилами сечением 25 мм². Определить ток и температуру кабеля, которые будут через 1 сек при трехфазном коротком замыкании в кабеле на расстоянии 2 км от источника.

Индуктивное сопротивление реактора в омах составляет

$$x = \frac{4 \cdot 10}{100 \sqrt{3} \cdot 0,5} = 0,46 \text{ ом.}$$

Приняв для кабеля $x=0,08$ ом/км, получим суммарное индуктивное сопротивление:

$$X_{\Sigma} = 0,46 + 2 \cdot 0,08 = 0,62 \text{ ом.}$$

Удельное электрическое сопротивление меди при $\vartheta_0 = 65^\circ \text{C}$ $\rho = 0,0212$ ом·мм²/м. Суммарное активное сопротивление при $\vartheta_0 = 65^\circ \text{C}$

$$r_{\vartheta_0} = \frac{0,0212 \cdot 2000}{25} = 1,7 \text{ ом.}$$

Полное сопротивление $z = \sqrt{1,7^2 + 0,62^2} = 1,81$ ом и, следовательно, начальный ток

$$I_{n|0} = \frac{10500}{\sqrt{3} \cdot 1,81} = 3350 \text{ А.}$$

Чтобы воспользоваться диаграммой рис. 3-17, находим:

$$\Delta = \left(\frac{3350}{25} \right)^2 \cdot 1 = 1,8 \cdot 10^4$$

и

$$a = \left(\frac{1,7}{1,81} \right)^2 = 0,88.$$

Теперь для полученных значений Δ и a по указанной диаграмме находим:

$$n_{\vartheta} = 0,8, \text{ т. е. } I = 0,8 \cdot 3350 = 2670 \text{ А и } \vartheta = 160^\circ \text{C.}$$

Интересно отметить, что если не считаться с тепловым спадом тока короткого замыкания, то температура кабеля через 1 сек была бы 200°C , т. е. выше на 25%.

Для большей наглядности на рис. 3-18 приведены кривые изменения во времени тока, полного сопротивления цепи и температуры кабеля, причем для сравнения еще показаны аналогичные кривые при условии, что кабель имеет сечение в 2 раза большее (50 мм²).

Чтобы убедиться в достаточной точности расчета по диаграмме, произведем аналогичный подсчет по (3-26) и (3-27). Поскольку решить (3-26) относительно ϑ нельзя, для решения поставленной задачи приходится делать вычисления для нескольких ϑ и затем, по-

строим кривую $\theta = f(t)$, находить по ней искомое значение. Сделаем такой подсчет, например, для $\theta = 200^\circ \text{C}$. Принимая для меди $s = 0,41 \text{ вт} \cdot \text{сек/г} \cdot \text{град}$; $\gamma = 8,9 \text{ г/см}^3$ и $\alpha = 0,004 \text{ 1/град}$, по (3-26) имеем:

$$\left(\frac{3350}{25}\right)^2 t = \frac{0,41 \cdot 8,9}{0,0212} \left\{ \frac{0,88}{1 + 0,004 \cdot 65} \left[(200 - 65) + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{0,004}{2} (200^2 - 65^2) \right] + \frac{(1 - 0,88)(1 + 0,004 \cdot 65)}{0,004} \right\} \times \\ \times \ln \frac{1 + 0,004 \cdot 200}{1 + 0,004 \cdot 65} \Big\} = 2,7 \cdot 10^4,$$

откуда $t = 1,5 \text{ сек}$.

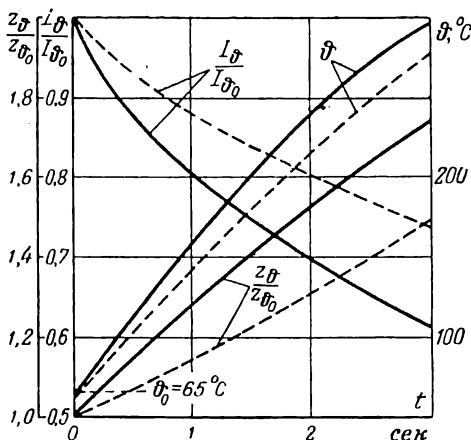


Рис. 3-18. Результаты расчета для условий примера 3-3; сплошные кривые при $q = 25 \text{ мм}^2$, пунктирные кривые при $q = 50 \text{ мм}^2$.

Соответственно по (3-27) имеем:

$$n_\theta = \sqrt{\frac{1}{0,88 \left(\frac{1 + 0,004 \cdot 200}{1 + 0,004 \cdot 65} \right)^2 + (1 - 0,88)}} = 0,73.$$

Легко видеть, что практически те же значения дают соответствующие кривые рис. 3-18.

3-7. ГРАФИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ

В тех случаях, когда приложенное к цепи с активным сопротивлением и индуктивностью напряжение может быть выражено аналитической функцией времени, решение дифференциального

уравнения (3-1) можно выполнить, применяя, в частности, известный интеграл Дюамеля [Л. 2, 3, 4]. Если же это напряжение u_i изменяется по какой-либо кривой, которую нельзя представить достаточно близкой аналитической функцией, то решение уравнения (3-1) можно провести приближенно с помощью графического построения, основанного на следующем.

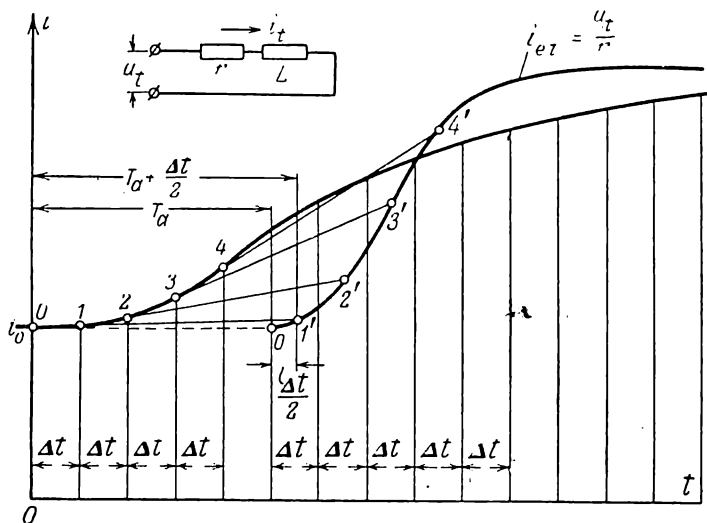


Рис. 3-19. Графический способ нахождения кривой изменения тока в цепи r, L при произвольном напряжении источника.

Заменяя в (3-1) производную di/dt отношением конечных разностей $\Delta i_i/\Delta t$, найдем, что последнее можно представить как

$$\frac{\Delta i_t}{\Delta t} = - \frac{i_t - \frac{u_t}{r_{\text{re}}}}{T_n} = - \frac{i_t - i_{et}}{T_n} = - \frac{i_{\text{cн}t}}{T_n}, \quad (3-28)$$

т. е. скорость изменения тока в пределах интервала Δt пропорциональна свободному току в начале рассматриваемого интервала.

Как указывалось в § 3-2, точность построения можно увеличить (при той же продолжительности интервала), если вместо действительной постоянной времени контура T_a ввести $T'_a = T_a + \frac{\Delta t}{2}$ и соответственно принужденный ток $\frac{u_t}{r_k} = i_{et}$ брать не в начале интервала, а в его середине. Соответственно этому при построении искомой кривой следует исходить не из (3-28), а из скорректированного выражения

$$\frac{\Delta i_t}{\Delta t} = - \frac{i_t - i_e \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right)}{T_a + \frac{\Delta t}{2}}. \quad (3-29)$$

Таким образом, для построения искомой кривой изменения тока во времени нужно на расстоянии T_a от начала координат (рис. 3-19) сперва нанести кривую изменения тока i_{et} . Затем, разбив ось абсцисс на интервалы Δt , построение следует вести так же, как и построение экспоненты (см. рис. 3-3,2), с той лишь разницей, что точки $1', 2', 3', \dots$ в рассматриваемом случае лежат не на оси абсцисс, а на кривой изменения тока i_{et} посередине соответствующего интервала (рис. 3-19). Так, например, в конце первого интервала искомое значение тока (точка 1) определяется пересечением соответствующей ординаты с прямой $O1'$ и т. д.

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

Этот способ графического решения дифференциального уравнения вида (3-1) иногда используют даже в тех случаях, когда происходящее возмущение в контуре может быть представлено в математической форме.

3-8. ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. Что называют фазой включения?
2. Произвести сравнение экспонент, построенных графическим способом в одном случае по постоянной времени T_a , а в другом по $\left(T_a + \frac{\Delta t}{2} \right)$ при одном и том же размере Δt .
3. На чем основано графическое построение экспоненты и чем достигается его уточнение?
4. Построить кривую изменения тока короткого замыкания в фазе В, считая что короткое произошло в момент, когда напряжение фазы А проходило через нуль (при переходе от положительных к отрицательным значениям). До короткого замыкания контур был разомкнут и его постоянная времени равна одному периоду, т. е. 0,02 сек.
5. Определить начальные значения аperiodических слагающих токов в фазах цепи, если известно, что $\varphi_0 = 37^\circ$ и $\varphi_K = 80^\circ$, периодическая слагающая тока короткого замыкания в 3 раза больше предшествующего тока и короткое произошло в момент, когда напряжение фазы А проходило через свой положительный максимум.
6. Что называется ударным током короткого замыкания и какие упрощающие условия принимают при его определении?
7. В чем заключается условность определения действующих значений отдельных величин при переходном процессе?
8. Что показывает ударный коэффициент и каковы пределы его изменений?
9. Что понимается под эквивалентной постоянной времени $T_{a.э}$ и как практически можно оценить ее значение?

10. Провести решение примера 3-1 для случая, когда действительные части сопротивлений всех элементов увеличены в 2 раза против заданных.

11. Для условий предыдущей задачи определить эквивалентную постоянную времени $T_{a.э}$ и оценить, какую погрешность она вносит при определении ударного тока короткого замыкания.

12. В чем трудность расчета цепи с ферромагнитными проводниками и каков путь практического приближенного решения?

13. Провести решение примера 3-2 для условий, когда первый участок линии выполнен проводом марки ПС-35, а второй — проводом марки ПС-25.

14. Решить пример 3-3 при условии, что заданная цепь приключена к источнику напряжением не 10,5 кВ, а 6,3 кВ.

15. Какова будет температура нагрева кабеля в примере 3-3, если жилы кабеля были бы не медными, а алюминиевыми того же сечения?

16. В цепи с r , L протекает постоянный ток 100 А. Постоянная времени цепи $T_a = 0,5$ сек. В некоторый момент времени напряжение, подведенное к контуру, стало возрастать по линейному закону со скоростью $3 U_0$ в/сек; спустя 0,5 сек оно с той же скоростью стало снижаться до нормального U_0 (предшествовавшего). Построить графическим способом кривую изменения тока в цепи за весь цикл изменения напряжения.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В НЕПОДВИЖНЫХ МАГНИТНОСВЯЗАННЫХ ЦЕПЯХ

4-1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Магнитная связь между цепями электрических систем имеет место не только при наличии трансформаторов и автотрансформаторов; она также существенно проявляется, например, между обмотками специальных (сдвоенных) реакторов, между линиями или кабелями, проложенными вблизи друг друга, и в ряде других элементов. Протекание электромагнитного переходного процесса в магнитносвязанных цепях имеет некоторые характерные особенности. Рекомендуются обратить особое внимание на основные закономерности и соотношения, рассматриваемые в настоящей главе; они в значительной мере облегчат понимание более сложных явлений, которые исследуются в дальнейшем.

В качестве основной предпосылки в соответствии с ранее принятыми допущениями (см. § 2-1) считаем, что между токами и напряжениями рассматриваемых цепей сохраняется линейная зависимость и, следова-

тельно, они могут быть связаны линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами. Для силовых трансформаторов и автотрансформаторов в условиях короткого замыкания это допущение практически выполняется, коль скоро основные магнитные потоки и обусловленное ими насыщение магнитопроводов при этом уменьшается. Иное положение имеет место в измерительных трансформаторах тока при протекании по их первичным обмоткам больших токов перегрузки или короткого замыкания. Здесь ток во вторичной обмотке сильно зависит от насыщения магнитопровода. Последний вопрос подлежит специальному рассмотрению.

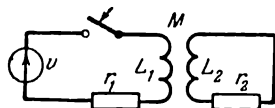
Характер изменения свободных токов, как известно, определяется только параметрами элементов рассматриваемой схемы и соотношениями между ними. Поэтому полученные ниже закономерности изменения свободных токов справедливы при любых э. д. с. источников питания. От величины э. д. с. зависят начальные значения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

Для упрощения математических выкладок используем преобразования Лапласа. По мере усложнения задачи эффективность такого преобразования, как правило, возрастает.

4.2. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ И СООТНОШЕНИЯ

Рассмотрим переходный процесс при включении на некоторое напряжение $u(t)$ контура с L_1 и r_1 , связанного взаимной индуктивностью M с другим контуром, индук-

Рис. 4-1. Простейшая цепь с магнитной связью.



тивность и активное сопротивление которого L_2 и r_2 . По существу это является процессом включения воздушного трансформатора с закороченной вторичной обмоткой (рис. 4-1). Условимся, что все параметры и величины второго контура приведены к стороне первого контура.

Для каждого контура соответственно имеем:
постоянные времени

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

и

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

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

коэффициенты рассеяния

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

и

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

Коэффициент магнитной связи между контурами

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

и общий коэффициент рассеяния

$$\sigma = 1 - k^2 = 1 - \frac{M^2}{L_1 L_2} = \sigma_1 + \sigma_2 - \sigma_1 \sigma_2; \quad (4-1)$$

при малых σ_1 и σ_2 можно принимать

$$\sigma \approx \sigma_1 + \sigma_2. \quad (4-2)$$

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

$$\left. \begin{aligned} u(t) &= i_1 r_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}; \\ 0 &= i_2 r_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (4-3)$$

или в операторной форме (при нулевых начальных условиях)

$$\left. \begin{aligned} u(p) &= r_1 I_1(p) + L_1 p I_1(p) + M p I_2(p); \\ 0 &= r_2 I_2(p) + L_2 p I_2(p) + M p I_1(p). \end{aligned} \right\} \quad (4-4)$$

Решение системы (4-4) легко получить простой подстановкой. Из второго уравнения имеем:

$$I_2(p) = -\frac{Mp}{r_2 + L_2 p} I_1(p); \quad (4-5)$$

после подстановки (4-5) в первое уравнение (4-4) найдем:

$$I_1(p) = \frac{u(p)}{z_1(p)}, \quad (4-6)$$

где

$$\begin{aligned} z_1(p) &= r_1 + \left(L_1 - \frac{M^2 p}{r_2 + L_2 p} \right) p = r_1 + \\ &+ \left(\frac{1 + \sigma T_{20} p}{1 + T_{20} p} \right) L_1 p = \frac{\sigma T_{10} T_{20} p^2 + (T_{10} + T_{20}) p + 1}{(1 + T_{20} p)} r_1 \end{aligned} \quad (4-7)$$

операторное сопротивление первого контура с учетом магнитно связанного с ним короткозамкнутого второго контура.

Из (4-7) следует, что влияние второго контура сказывается в снижении L_1 , причем оно тем сильнее, чем меньше рассеяние и больше постоянная времени T_{20} . Напротив, в пределе, когда $\sigma = 1$, т. е. при отсутствии магнитной связи, индуктивность L_1 неизменна.

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

$$\begin{aligned} p_{1,2} &= \frac{-(T_{10} + T_{20}) \pm \sqrt{(T_{10} + T_{20})^2 - 4\sigma T_{10} T_{20}}}{2\sigma T_{10} T_{20}} = \\ &= -\frac{(T_{10} + T_{20})}{2\sigma T_{10} T_{20}} (1 \mp q), \end{aligned} \quad (4-8)$$

где

$$q = \sqrt{1 - \frac{4\sigma T_{10} T_{20}}{(T_{10} + T_{20})^2}}. \quad (4-9)$$

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

Следовательно, свободный ток в каждом контуре состоит из двух свободных токов, один из которых затухает по экспоненте с постоянной времени ¹

$$T' = -\frac{1}{p_1} = \frac{2}{(1-q)} \cdot \frac{\sigma T_{10} T_{20}}{(T_{10} + T_{20})} = \frac{1+q}{2} (T_{10} + T_{20}), \quad (4-10)$$

а другой — с постоянной времени

$$T'' = -\frac{1}{p_2} = \frac{2}{(1+q)} \cdot \frac{\sigma T_{10} T_{20}}{(T_{10} + T_{20})} = \frac{1-q}{2} (T_{10} + T_{20}), \quad (4-11)$$

отношение между которыми

$$\frac{T'}{T''} = \frac{(1+q)}{(1-q)}. \quad (4-12)$$

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

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

$$I_1(p) = \frac{U}{pz_1(p)}.$$

Для перехода к оригиналу $i_1(t)$ используем формулу разложения или ее видоизменение, так называемую формулу включения, которая в данном случае, при отсутствии кратных корней характеристического уравнения, будет:

$$i_1(t) = \frac{U}{z_1(0)} + \sum_{k=1}^n \frac{U e^{p_k t}}{p_k \left[\frac{dz_1(p)}{dp} \right]_{p=p_k}},$$

где первое слагаемое представляет принужденный или установившийся ток i_1 в первом контуре.

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

После подстановки в нее соответствующих выражений для входящих величин и ряда преобразований получим:

$$i_1(t) = i_1 + i'_1 + i''_1 = \frac{U}{r_1} - \frac{U(T_{10} - T'')}{r_1(T' - T'')} e^{-\frac{t}{T'}} - \frac{U(T_{20} - T'')}{r_1(T' - T'')} e^{-\frac{t}{T''}}, \quad (4-13)$$

где i'_1 — медленно затухающий свободный ток;
 i''_1 — быстро затухающий свободный ток.

Соотношение между начальными значениями свободных токов $i''_{1|0|}$ и $i'_{1|0|}$ определяется постоянными времени:

$$\frac{i''_{1|0|}}{i'_{1|0|}} = \frac{T_{20} - T''}{T_{10} - T''}. \quad (4-14)$$

Аналогично находим выражение для тока во втором контуре:

$$i_2(t) = i'_2 + i''_2 = -\frac{MU}{L_1 L_2} \cdot \frac{T_{10} T_{20}}{(T' - T'')} \left(e^{-\frac{t}{T'}} - e^{-\frac{t}{T''}} \right). \quad (4-15)$$

Таким образом, при включении на постоянное напряжение принужденный ток во втором контуре, естественно, отсутствует, а начальные значения свободных токов равны и взаимно противоположны:

$$i''_{2|0|} = -i'_{2|0|}. \quad (4-16)$$

Их связь с одноименными свободными токами первого контура выражается соотношениями:

$$i'_2 = \frac{M}{L_2} \cdot \frac{T_{20}}{(T_{10} - T'')} i'_1; \quad (4-17)$$

$$i''_2 = -\frac{M}{L_2} \cdot \frac{T_{20}}{(T_{20} - T'')} i''_1. \quad (4-18)$$

Для рассматриваемого переходного процесса на рис. 4-2,а приведены кривые изменения токов и их отдельных слагающих, причем откладываемое по оси абсцисс время выражено в долях от T_{10} . Ток $i_{1(t)}$ стремится

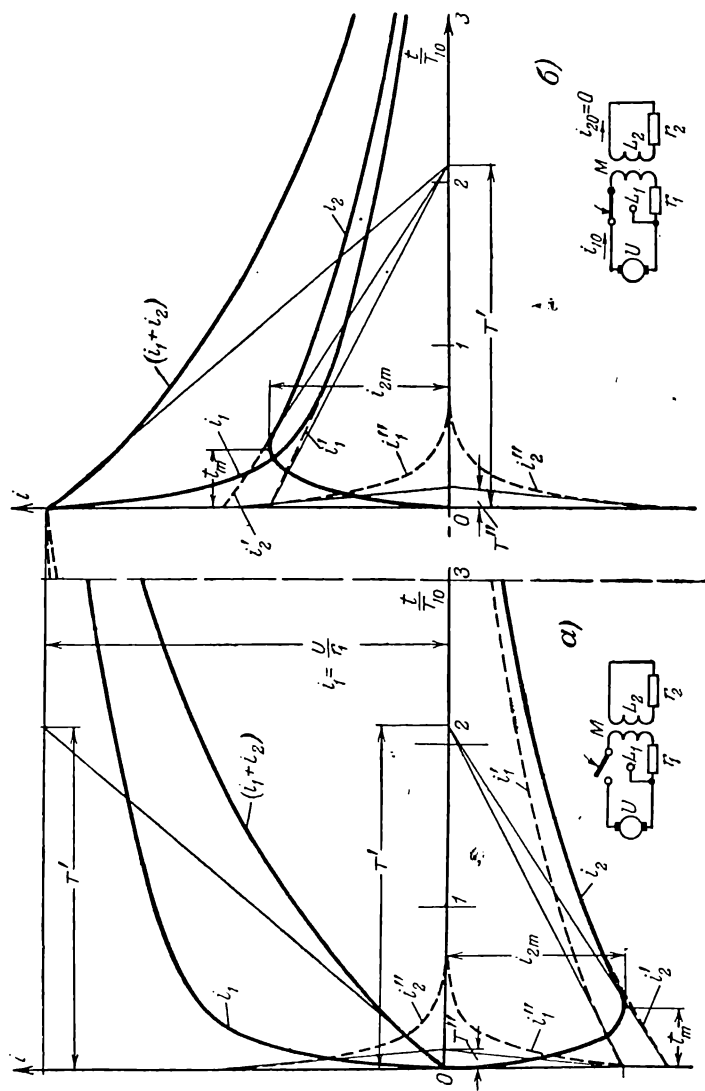


Рис. 4-2. Кривые изменения токов и отдельных составляющих их в контурах схемы рис. 4-1. а — при включении на постоянное напряжение; б — при закорачивании первого контура, предварительно питаемого от источника постоянного напряжения.

к своему принужденному значению, а ток $i_{2(t)}$ сперва возрастает до своего максимума, а затем затухает, стремясь к нулю. Момент наступления максимума легко найти из уравнения $di_2/dt=0$, откуда

$$t_m = \frac{T'T''}{T' - T''} \ln \frac{T'}{T''}; \quad (4-19)$$

подставив (4-19) в (4-15), получим:

$$i_{2m} = - \frac{MU}{L_1 L_2} \cdot \frac{T_{10} T_{20}}{(T' - T'')} \left(e^{-\frac{t_m}{T'}} - e^{-\frac{t_m}{T''}} \right). \quad (4-20)$$

В начальной стадии переходного процесса изменение токов в контурах обусловливается главным образом быстро затухающими свободными токами и в последующей — практически только медленно затухающими свободными токами. Ток намагничивания, определяемый суммой $i_1 + i_2$, практически изменяется экспоненциально с постоянной времени T' , так как сумма быстро затухающих свободных токов очень мала. Последняя равна нулю при $\sigma=0$.

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

Таким образом, магнитная связь рассматриваемого контура с другим контуром вначале убыстряет переходный процесс, а затем, напротив, замедляет его. При постоянном коэффициенте рассеяния σ это проявляется тем интенсивнее, чем больше постоянная времени влияющего контура (T_{20}). Это хорошо видно на рис. 4-3, где приведены для нескольких значений T_{20} кривые изменения $i_{1(t)}$ и $i_{2(t)}$. Кривые при $T_{20}=0$ соответствуют условию, при котором влияющий контур разомкнут или вообще отсутствует, а при $T_{20}=\infty$ — когда он является сверхпроводящим. В последнем случае наведенный свободный ток i_2 стремится к своему наибольшему значению, а затем остается неизменным, поскольку потерь в этом контуре нет.

Для сопоставления на рис. 4-2,б показаны кривые изменения токов при закорачивании первого контура,

после того как в нем наступил установившийся режим. В этом случае все величины свободных токов остаются такими же, как и при рассмотренном выше процессе включения, но их знаки меняются на обратные. При этом, разумеется, принужденные токи в обоих контурах отсутствуют.

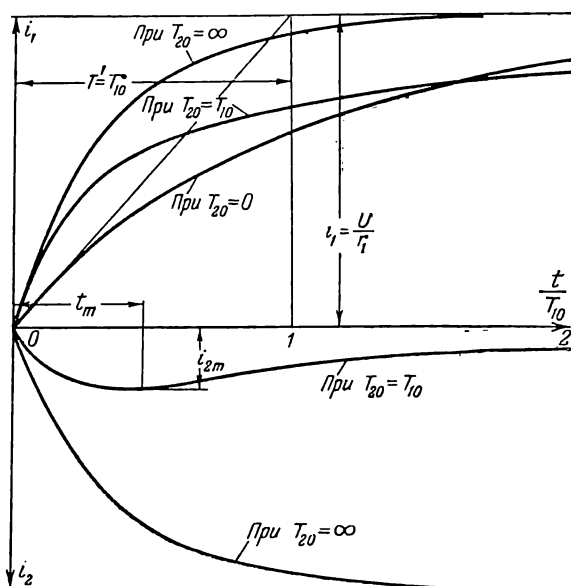


Рис. 4-3. Кривые изменения токов в обоих контурах схемы при разных значениях постоянной времени T_{20} .

Выясним теперь, как влияет рассеяние на соотношение между постоянными времени затухания свободных токов и на соотношение между начальными значениями этих токов. Для этого установим дополнительные соотношения, которые вытекают из известных свойств корней квадратного уравнения¹. Из них имеем:

$$p_1 + p_2 = -\left(\frac{1}{T'} + \frac{1}{T''}\right) = -\frac{T_{10} + T_{20}}{2T_{10}T_{20}},$$

¹ Напомним, что корни уравнения $ax^2 + bx + c = 0$ связаны следующими соотношениями: $x_1 + x_2 = -\frac{b}{a}$ и $x_1 x_2 = \frac{c}{a}$.

или

$$\frac{T' + T''}{T'T''} = \frac{T_{10} + T_{20}}{\sigma T_{10}T_{20}}; \quad (4-21)$$

помимо того,

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

т. е.

$$T'T'' = \sigma T_{10}T_{20}, \quad (4-21a)$$

или

$$\sigma = \frac{T'T''}{T_{10}T_{20}}. \quad (4-21б)$$

Используя (4-21a), из (4-21) находим важное соотношение:

$$T' + T'' = T_{10} + T_{20}. \quad (4-22)$$

Оно, в частности, показывает, что целесообразно исследовать отношения $\frac{T'}{T_{10} + T_{20}}$ и $\frac{T''}{T_{10} + T_{20}}$, сумма которых равна единице.

На основании (4-10) и (4-11) с учетом (4-9) имеем:

$$\frac{T'}{T_{10} + T_{20}} = \frac{1+q}{2} = \frac{1 + \sqrt{1 - 4\sigma \frac{m}{(1+m)^2}}}{2} \quad (4-23)$$

и

$$\frac{T''}{T_{10} + T_{20}} = \frac{1-q}{2} = \frac{1 - \sqrt{1 - 4\sigma \frac{m}{(1+m)^2}}}{2}, \quad (4-24)$$

где $m = \frac{T_{20}}{T_{10}}$.

Поскольку при $m = \frac{1}{m'}$

$$\frac{m}{(1+m)^2} = \frac{m'}{(1+m')^2},$$

величины T' и T'' остаются теми же при изменении соотношения между T_{10} и T_{20} в одно и то же число раз как в сторону увеличения, так и уменьшения.

На рис. 4-4 сплошные кривые иллюстрируют для нескольких их значений T_{20}/T_{10} изменения рассматриваемых от-

ношений в функции коэффициента рассеяния. Каждая кривая характеризует оба отношения, но для $\frac{T'}{T_{10} + T_{20}}$ шкала расположена слева, а для $\frac{T''}{T_{10} + T_{20}}$ — справа. Как видно, влияние рассеяния сильнее сказывается при сим-

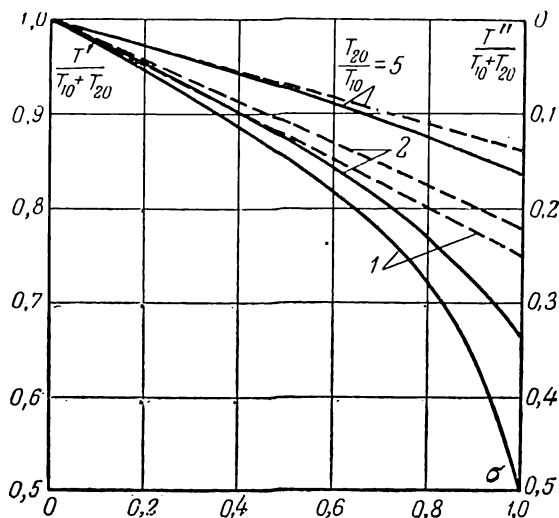


Рис. 4-4. Относительные значения постоянных времени T' и T'' в функции от коэффициента рассеяния σ при различных величинах T_{20}/T_{10} .

метричных контурах, т. е. когда их постоянные времени одинаковы ($\frac{T_{20}}{T_{10}} = 1$). По мере увеличения несимметрии контуров влияние рассеяния проявляется меньше.

Аналогично нетрудно выразить относительные начальные значения свободных токов в функции m и σ . Для первого контура имеем:

$$\frac{i'_{1|0|}}{i_{1св|0|}} = \frac{i'_{1|0|}}{i'_{1|0|} + i''_{1|0|}} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{1-m}{\sqrt{(1+m)^2 - 4\sigma m}} \right]; \quad (4-25)$$

$$\frac{i''_{1|0|}}{i_{1св|0|}} = \frac{i''_{1|0|}}{i'_{1|0|} + i''_{1|0|}} = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1-m}{\sqrt{(1+m)^2 - 4\sigma m}} \right]. \quad (4-26)$$

Для нескольких значений T_{20}/T_{10} на рис. 4-5 показаны кривые, выражающие зависимости (4-25) и (4-26) в функции σ , причем, как и в предыдущем рисунке, использовано двустороннее расположение шкал. При $T_{20}/T_{10} > 1$ рост σ приводит к снижению $i'_{1|0|}$ и, наоборот, при $T_{20}/T_{10} < 1$ — к увеличению $i'_{1|0|}$. Соответственно для $i''_{1|0|}$ получаются

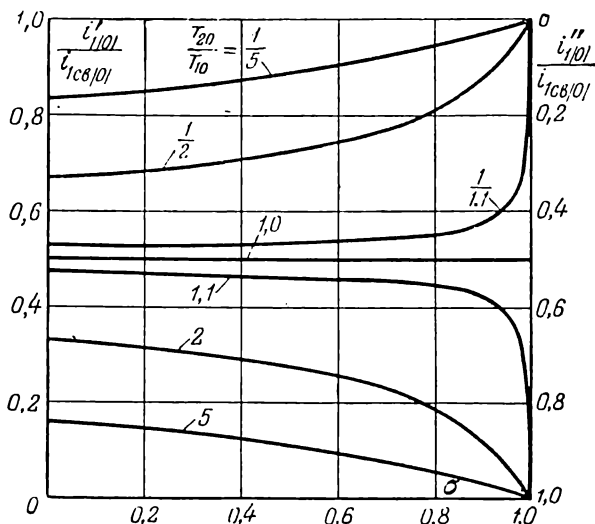


Рис. 4-5. Относительные значения начальных свободных токов в функции от коэффициента рассеяния σ при разных величинах T_{20}/T_{10} .

обратные соотношения. Достаточно заметное влияние изменения σ сказывается лишь при относительно больших значениях σ (свыше 0,5). При симметричных контурах имеет место равенство $i'_{1|0|} = i''_{1|0|}$, причем оно сохраняется вне зависимости от σ .

Пример 4-1. Для схемы рис. 4-1 известны $\sigma = 0,21$ и $T_{20}/T_{10} = 1,22$. При включении первого контура на постоянное напряжение построить кривые изменения токов в обоих контурах. Токи выразить в долях принужденного тока первого контура, а время — в долях от T_{10} .

Используя (4-9), получим:

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

а по (4-10) имеем:

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

По выражению (4-11) или, проще, из (4-22) имеем:

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

В соответствии с (4-14)

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

При заданных начальных условиях $i_{1\text{сн}|0|} = -i_1$, поэтому свободные токи первого контура будут:

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

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

Уравнение для полного тока в первом контуре будет

$$\frac{i_1(t)}{i_1} = 1 - 0,445 e^{-\frac{t}{2,1T_{10}}} - 0,555 e^{-\frac{t}{0,12T_{10}}}.$$

Примем, что коэффициент рассеяния $\sigma = 0,21$ состоит из $\sigma_1 = 0,11$ и $\sigma_2 = 0,1$. Тогда $\frac{M}{L_2} = 1 - 0,1 = 0,9$ и с учетом полученных

значений $\frac{i'_{1|0|}}{i_1}$ и $\frac{i''_{1|0|}}{i_1}$ по (4-17) и (4-18) имеем:

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

В соответствии с (4-15) уравнение для тока во втором контуре будет

$$\frac{i_2}{i_1} = -0,555 \left(e^{-\frac{t}{2,1T_{10}}} - e^{-\frac{t}{0,12T_{10}}} \right).$$

По (4-19) и (4-20) находим, что его максимум наступает при

$$\frac{t_m}{T_{10}} = \frac{2,1 \cdot 0,12}{2,1 - 0,12} \ln \frac{2,1}{0,12} = 0,363$$

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

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

4.3. ПРИБЛИЖЕННОЕ РЕШЕНИЕ

При сильной магнитной связи между контурами, т. е. когда рассеяние магнитных потоков мало, математические выкладки и соотношения для рассматриваемого электромагнитного переходного процесса могут быть значительно упрощены, если ввести некоторые дополнительные допущения. Получаемые при этом результаты по своей точности обычно вполне удовлетворяют требованиям практики.

Сущность такого приближенного решения заключается в следующем. При малом значении σ можно пренебречь вычитаемым под радикалом в (4-9). При этом

$$T'' \approx \frac{\sigma T_{10} T_{20}}{T_{10} + T_{20}} \quad (4-27)$$

и

$$T' \approx T_{10} + T_{20}. \quad (4-28)$$

Однако, коль скоро приближенное значение T'' по (4-27) уже найдено, величину T' можно определить несколько точнее, используя соотношение (4-22), т. е.

$$T' = T_{10} + T_{20} - T''. \quad (4-29)$$

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

Значительные упрощения могут быть получены и в соотношениях между начальными значениями свободных токов. Имея в виду, что при малых σ постоянная времени T'' много меньше T_{10} и T_{20} , ею можно пренебречь. Тогда согласно (4-14) найдем приближенное соотношение

$$\frac{i''_{1|0|}}{i'_{1|0|}} \approx \frac{T_{20}}{T_{10}} \quad (4-30)$$

и из (4-17) и (4-18) с учетом (4-30)

$$i'_{2|0|} \approx \frac{M}{L_2} \cdot \frac{T_{20}}{T_{10}} i'_{1|0|} = \frac{M}{L_2} i''_{1|0|} \quad (4-31)$$

и

$$i''_{2|0|} = -\frac{M}{L_2} i''_{1|0|} = -i'_{2|0|}. \quad (4-32)$$

Чтобы иметь представление об ошибке Δ приближенного определения соотношения $i''_{1|0|}/i'_{1|0|}$, на рис. 4-6,а приведены кривые изменения ошибки в зависимости от σ для нескольких значений T_{20}/T_{10} . Аналогичные кривые, характеризующие ошибки $\Delta'_2/0$ приближенного определения $i'_{2|0|}$ (т. е. полагая $T''=0$), показаны на рис. 4-6,б. Нетрудно убедиться, что ошибки Δ'_2 приближенного определения $i'_{2|0|}$ связаны с ошибками Δ''_2 приближенного определения $i''_{2|0|}$ простым соотношением:

$$\Delta''_2 = \frac{\Delta'_2}{T_{20}/T_{10}},$$

из которого следует, что кривые рис. 4-6,б дают также зависимость $\Delta''_2 = f(\sigma)$, но только для взаимно обратных значений $m = T_{20}/T_{10}$, как это указано в скобках.

Из рис. 4-6,а следует, что только при $T_{20} = T_{10}$ погрешность вообще отсутствует. При $T_{20} > T_{10}$ приближенное решение дает преуменьшение $i''_{1|0|}$ и, следовательно, преувеличение $i'_{1|0|}$. При $T_{20} < T_{10}$ имеет место обратная картина. Что касается погрешностей в токах $i'_{2|0|}$ и $i''_{2|0|}$ при приближенном определении, то, как видно из рис. 4-6,б, они всегда получаются отрицательными. При достаточно малых величинах σ все эти погрешности вполне допустимы.

Следует подчеркнуть, что при $\sigma=0$ отсутствии рассеяния возможно изменение токов в контурах скачком, однако это не противоречит неизменности результирующего потокосцепления, так как последнее определяется намагничивающим током, величина которого не претерпевает внезапных изменений. Наличие рассеяния как бы сглаживает изменение токов в контурах при внезапном нарушении режима, причем чем оно больше, тем плавнее получается переход.

В соответствии с указанным упрощением выражения для токов при включении на постоянное напряжение приобретают вид:

$$i_1 = \frac{U}{r_1} \left(1 - \frac{T_{10}}{T_{10} + T_{20}} e^{-\frac{t}{T'}} - \frac{T_{20}}{T_{10} + T_{20}} e^{-\frac{t}{T''}} \right) \quad (4-33)$$

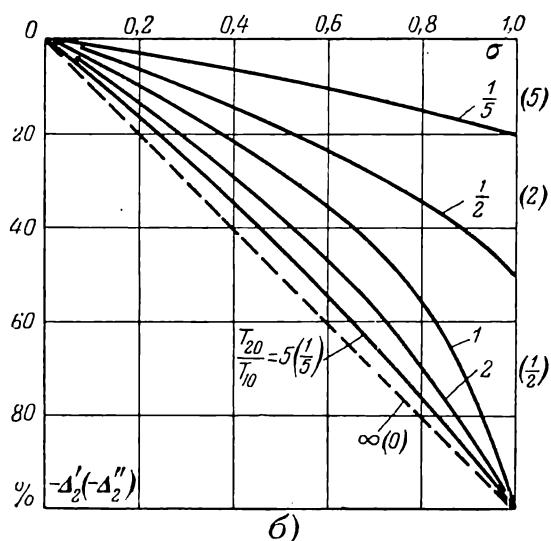
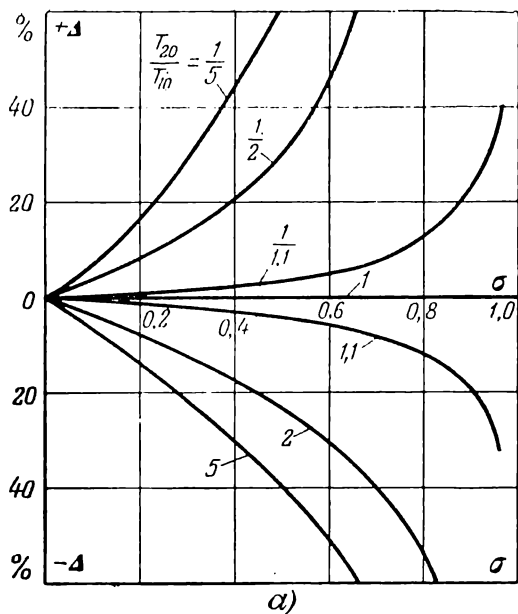


Рис. 4-6. Зависимости ошибок приближенного определения отношений свободных токов $i''_1|0|/i'_1|0|$ (а) и свободных токов $i'_2|0|/i''_2|0|$ (б) в функции от коэффициента рассеяния σ .

$$i_2 = -\frac{U}{r_1} \cdot \frac{M}{L_2} \cdot \frac{T_{20}}{(T_{10} + T_{20})} \left(e^{-\frac{t}{T'}} - e^{-\frac{t}{T''}} \right). \quad (4-34)$$

Поскольку при $\sigma \approx 0$ из (4-1) $M = \sqrt{L_1 L_2}$, в (4-34)

$$\frac{M}{L_2} \approx \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} = \frac{\omega_1}{\omega_2},$$

где ω_1 и ω_2 — числа витков соответствующих контуров.

Для приведения тока i_2 к стороне контура 1 этот ток должен быть умножен на $\omega_2/\omega_1 \approx L_2/M$. После такого приведения и суммирования токов i_1 и i_2 найдем выражение для тока намагничивания:

$$i_\mu = i_1 + i_2 = \frac{U}{r_1} \left(1 - e^{-\frac{t}{T'}} \right), \quad (4-35)$$

откуда видно, что, начинаясь с нуля, этот ток возрастает по экспоненте с постоянной времени T' .

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

По (4-27) находим:

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

и по (4-29):

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

Соотношение между начальными свободными токами по (4-30)

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

Каждый из свободных токов в долях принужденного тока первого контура будет:

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

и

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

соответственно в другом контуре

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

Максимум тока i_2 наступает при $\frac{t_m}{T_{10}} = 0,355$ (вместо 0,363) и его величина составляет $\frac{i_{2m}}{i_1} = -0,441$, т. е. практически та же, что и при точном решении.

4-4. ВНЕЗАПНОЕ КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРА

Исследование переходного процесса при внезапном коротком замыкании за трансформатором без учета насыщения его магнитопровода, вообще говоря, идентично рассмотренному в § 4-2, с той лишь разницей, что здесь включение производится не на постоянное, а на синусоидальное напряжение. Полученные выше выражения для постоянных времени затухания свободных токов полностью справедливы и в данном случае, причем, поскольку в трансформаторах рассеяние ничтожно по сравнению с общим потоком взаимной индукции, применение приближенных выражений (4-27) и (4-28) для оценки T'' и T' практически не вносит никакой ошибки.

При включении трансформатора на синусоидальное напряжение существенно меняется соотношение между начальными значениями свободных токов против полученного ранее для случая включения на постоянное напряжение. Если в схеме рис. 4-7, а напряжение фазы $Au = U_m \sin(\omega t + \alpha) = \text{Im} [U_m e^{j(\omega t + \alpha)}]$ (где α — фаза включе-

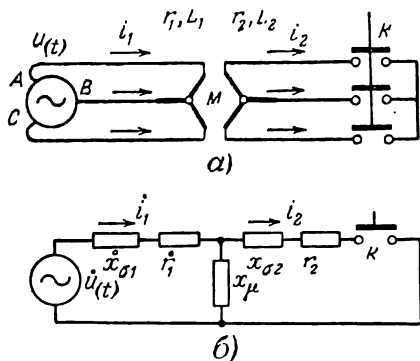


Рис. 4-7. Включение трансформатора на короткое замыкание.

а — трехлинейная схема; б — схема замещения.

ния), то, применяя формулу включения на синусоидальное напряжение:

$$i(t) = \text{Im} \left[\frac{U_m e^{j(\omega t + \alpha)}}{z(j\omega)} + \sum_{k=1}^n \frac{U_m e^{j\alpha}}{(p_k - j\omega) \left[\frac{dz(p)}{dp} \right]_{p=p_k}} e^{p_k t} \right];$$

для тока этой фазы 1-й обмотки трансформатора после несложных преобразований получим:

$$i_1(t) = i_1 + i'_1 + i''_1 = \text{Im} \left(\frac{U_m e^{j(\omega t + \alpha)} (1 + j\omega T_{20})}{r_1 (1 + j\omega T') (1 + j\omega T'')} - \frac{U_m e^{j\alpha} (T_{10} - T'')}{r_1 (1 + j\omega T') (T' - T'')} e^{-\frac{t}{T'}} - \frac{U_m e^{j\alpha} (T_{20} - T'')}{r_1 (1 + j\omega T'') (T' - T'')} e^{-\frac{t}{T''}} \right), \quad (4-36)$$

и соотношение между начальными свободными токами будет

$$\frac{i''_1|_{0|}}{i'_1|_{0|}} = \frac{(T_{20} - T'') (1 + j\omega T')}{(T_{10} - T'') (1 + j\omega T'')}. \quad (4-37)$$

Первое слагаемое в (4-36) представляет принужденный синусоидальный ток, вектор которого может быть представлен в обычной форме:

$$\dot{I}_1 = \frac{U_m (1 + j\omega T_{20})}{r_1 (1 + j\omega T') (1 + j\omega T'')} = \frac{U_m}{Z},$$

где $Z = r_1 + jx_{\sigma 1} + [(r_2^\circ + jx_{\sigma 2}^\circ) // jx_{\mu}]$ — комплекс полного сопротивления известной схемы замещения трансформатора (рис. 4-7, б).

Используя (4-5), можно получить операторное выражение для тока $I_2(p)$; после перехода к оригиналу и дополнительных преобразований получим:

$$i_2(t) = \text{Im} \left[- \frac{U_m e^{j(\omega t + \alpha)} j\omega M}{r_1 r_2^\circ (1 + j\omega T') (1 + j\omega T'')} - \frac{U_m e^{j\alpha} M e^{-\frac{t}{T'}}}{r_1 r_2^\circ (1 + j\omega T') (T' - T'')} + \frac{U_m e^{j\alpha} M e^{-\frac{t}{T''}}}{r_1 r_2^\circ (1 + j\omega T'') (T' - T'')} \right], \quad (4-38)$$

где первое слагаемое представляет принужденный ток во второй обмотке, поскольку в данном случае цепь питается от источника переменного напряжения.

Обычно у трансформаторов $r_1 \approx \overset{\circ}{r}_2$ и $L_1 \approx \overset{\circ}{L}_2$; при этом $T_{10} \approx T_{20}$ и, следовательно,

$$\frac{i''_{1|0|}}{i'_{1|0|}} = \frac{1 + j\omega T'}{1 + j\omega T''}. \quad (4-39)$$

В таком же соотношении, но лишь с обратным знаком, находятся свободные токи $i''_{2|0|}$ и $i'_{2|0|}$.

Мнимые части числителя и знаменателя в (4-39) значительно больше действительных, что позволяет пренебречь последними и получить еще более простое соотношение:

$$\frac{i''_{1|0|}}{i'_{1|0|}} \approx \frac{T'}{T''}, \quad (4-40)$$

которое с учетом (4-27), (4-28) и равенства $T_{10} = T_{20}$ можно записать как

$$\frac{i''_{1|0|}}{i'_{1|0|}} \approx \frac{4}{\sigma}.$$

Отсюда видно, что вследствие малости коэффициента рассеяния σ трансформаторов ток i'_1 ничтожен по сравнению с током i''_1 . Это объясняется тем, что ток i'_1 связан с изменением общего магнитного потока или тока намагничивания I_μ , которым обычно пренебрегают. С тем большим основанием, очевидно, можно не считаться с током i'_1 . В схеме замещения рис. 4-7,б для этого надо разорвать ветвь намагничивания, т. е. положить $x_\mu = \infty$.

Таким образом, при анализе процесса короткого замыкания в схеме с трансформаторами каждый из них практически можно рассматривать как элемент со своими r и x , приведенными к какой-либо одной ступени напряжения. Сопротивления r и x находятся по известным для данного трансформатора потерям в меди p_K и напряжению короткого замыкания u_K . Для двухобмоточного трансформатора отпадает необходимость определения параметров отдельно каждой обмотки; такой трансформатор характеризуют суммарными активным и ин-

дуктивным сопротивлениями, приведенными к одной из его сторон. Постоянная времени затухания свободного тока в цепи, состоящей только из одного трансформатора, будет

$$T = T'' = \frac{x}{\omega r}. \quad (4-41)$$

Изложенное выше в равной мере относится и к автотрансформаторам.

Пример 4-3. Двухобмоточный трансформатор характеризуется следующими номинальными данными: 240 Мва, 242/15,75 кВ; $u_k = 12,7\%$; $I_\mu = 3\%$; $p_k = 950$ кВт.

Считая трансформатор приключенным к источнику бесконечной мощности, определить при внезапном коротком замыкании за трансформатором постоянные времени затухания свободных токов и соотношение между начальными значениями этих токов.

Все величины выражаем в процентах, за исключением постоянных времени, которые выражаем в секундах.

По заданным потерям в меди находим активное сопротивление трансформатора:

$$r = p_k = \frac{950}{240 \cdot 1000} \cdot 100 = 0,4\%.$$

Практически можно считать

$$x \approx z = 12,7\%.$$

Относительная реактивность холостого хода или полная реактивность каждой из обмоток будет

$$x_1 = x_2 = \frac{100}{3} \cdot 100 = 3333\%.$$

Принимая для обмоток трансформатора, как обычно,

$$x_{\sigma 1} = x_{\sigma 2} = \frac{12,7}{2} = 6,35\% \text{ и } r_1 = r_2 = \frac{0,4}{2} = 0,2\%,$$

найдем постоянные времени каждой из них (при другой разомкнутой):

$$T_{10} = T_{20} = \frac{3333}{314 \cdot 0,2} = 53 \text{ сек.}$$

Постоянную времени T'' проще всего найти по (4-41):

$$T'' = \frac{12,7}{314 \cdot 0,4} = 0,1 \text{ сек.}$$

Соответственно для T' по (4-28) имеем:

$$T' = 53 + 53 = 106 \text{ сек.}$$

По (4-40) находим:

$$\frac{i''_{1|0|}}{i'_{1|0|}} = \frac{106}{0,1} = 1060,$$

что наглядно показывает ничтожную роль свободного тока i'_1 .

Для иллюстрации найдем коэффициент рассеяния σ этого трансформатора. По (4-1) имеем:

$$\sigma = \left[1 - \left(\frac{3333 - 6,35}{3333} \right)^2 \right] \cdot 100 = 0,36\%.$$

При этом по (4-27) получим;

$$T'' \approx \frac{0,36 \cdot 53}{100 \cdot 2} \approx 0,1 \text{ сек.},$$

т. е. ту же величину, которая была получена по (4-41).

4-5. ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. В чем заключаются принципиальные особенности протекания переходного процесса в неподвижных магнитносвязанных цепях?

2. Как сказывается рассеяние магнитносвязанных цепей на характере протекания переходного процесса в них?

3. Что называется коэффициентом магнитной связи и в какой зависимости он находится с общим коэффициентом рассеяния магнитносвязанных контуров?

4. Как выражается (точно и приближенно) общий коэффициент рассеяния двух магнитносвязанных контуров через коэффициенты рассеяния каждого контура?

5. Изменения каких магнитных потоков в основном характеризуют постоянные времени T' и T'' ?

6. Как сказывается изменение общего коэффициента рассеяния магнитносвязанных контуров на протекании свободных токов в этих контурах?

7. Как выражаются простые зависимости между постоянными времени T' и T'' и постоянными времени T_{10} и T_{20} ?

8. Провести решение примера 4-1 при условии, что $\sigma=0,1$.

9. Каково приближенное соотношение между начальными величинами свободных токов в магнитносвязанных контурах?

10. Аналогично примеру 4-2 определить приближенные значения постоянных времени и начальных свободных токов при $\sigma=0,1$.

11. В каком соотношении (точном и приближенном) находятся начальные значения свободных токов в первичной и вторичной обмотках трансформатора при внезапном коротком замыкании на его выводах?

12. Определить искомые величины примера 4-3 при условии, что потери мощности в трансформаторе составляют 500 кВт (вместо 950 кВт).

ГЛАВА ПЯТАЯ

УСТАНОВИВШИЙСЯ РЕЖИМ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

5-1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

В последних двух главах предполагалось, что рассматриваемая цепь присоединена к источнику синусоидального напряжения, амплитуда которого постоянна. При таких условиях переходный процесс в цепи характеризуется затуханием лишь свободных апериодических слагающих тока, в то время как периодическая слагающая тока при неизменности параметров элементов цепи представляет собой синусоидальный **п р и н у ж д е н н ы й** или **у с т а н о в и в ш и й с я** ток в этой цепи при изменившемся состоянии последней.

Указанное предположение в достаточной мере справедливо лишь в том случае, когда короткое замыкание происходит на относительно большой электрической удаленности от генератора. По мере приближения короткого замыкания к генератору оно, естественно, становится все менее и менее приемлемым. Увеличение реакции статора при коротком замыкании приводит к размагничиванию генератора и, следовательно, к снижению его напряжения до некоторого уровня, величина которого зависит от параметров генератора и удаленности короткого замыкания. При наличии автоматического регулирования возбуждения (АРВ) возможна частичная или даже полная компенсация этого снижения напряжения путем увеличения тока возбуждения.

Под установившимся режимом понимают ту стадию процесса короткого замыкания, когда все возникшие в начальный момент короткого свободные токи практически затухли и полностью закончен подъем тока возбуждения от действия АРВ. Практически можно считать, что он наступает уже через несколько секунд после возникновения короткого замыкания. При этом в соответствии с принятым допущением (см. § 2-1) предполагается, что скорость вращения генератора сохраняется синхронной.

Приведенное определение установившегося режима

соответствует упрощенному представлению о протекании процесса короткого замыкания, которое в достаточной мере соблюдается лишь для одного генератора. В условиях же мало-мальски сложной электрической системы протекание процесса короткого замыкания, как отмечалось выше, имеет значительно более сложный характер. Это обуславливается рядом факторов, из которых в первую очередь необходимо отметить возникновение качаний генераторов, которые иногда могут привести к выпадению их из синхронизма.

Для современных электрических систем оценка установившегося режима короткого замыкания в указанном выше смысле является весьма условной. Найденные величины для такого режима можно рассматривать лишь как теоретические пределы.

Отметим еще одно обстоятельство. До настоящего времени нагрев проводников и аппаратов при коротком замыкании практически чаще всего определяют как эквивалентный нагрев установившимся током короткого замыкания в течение так называемого фиктивного времени, для нахождения которого служат специальные кривые. Возникновение такого искусственного приема связано с прошлым, когда установившийся ток считался одной из основных величин, характеризующих процесс короткого замыкания. Сейчас представляется целесообразным перейти на иную методику определения указанного нагрева, не связывая ее с необходимостью нахождения установившегося тока короткого замыкания.

5-2. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ПАРАМЕТРЫ И СООТНОШЕНИЯ

Основными характеристиками и параметрами синхронной машины при симметричном установившемся режиме, как известно, являются:

- а) характеристика холостого хода (рис. 5-1);
- б) синхронные ненасыщенные реактивности по продольной оси x_d и по поперечной оси x_q *;

* Для турбогенераторов, т. е. для машин с гладким ротором, $x_d = x_q$.

в) реактивность рассеяния статора x_{σ}^* .

Вместо x_d может быть задано отношение короткого замыкания (ОКЗ), которое представляет собой относительный установившийся ток при трехфазном коротком замыкании на выводах и относительном токе возбуждения $I_f = 1$ (рис. 5-1):

$$ОКЗ = \frac{I_{I_f=1}}{I_n}. \quad (5-1)$$

Величина ОКЗ определяет ординату второй точки, через которую проходит прямая, представляющая характеристику трехфазного короткого замыкания машины (рис. 5-1). Связь между ОКЗ и x_d вытекает из условий короткого замыкания на выводах машины:

$$x_d = \frac{c}{ОКЗ}, \quad (5-2)$$

где c — относительное значение ненасыщенной э. д. с. E_q при $I_f = 1$.

В качестве средних значений можно указать:

для турбогенераторов $c = 1,2$ и $ОКЗ = 0,7$;
для гидрогенераторов $c = 1,06$ и $ОКЗ = 1,1$.

Для явнополюсной машины поперечная синхронная реактивность слабо зависит от насыщения; практически ее считают постоянной и приблизительно равной

$$x_q \approx 0,6x_d. \quad (5-3)$$

Напротив, насыщение заметно проявляется в продольной оси, что вызывает изменение продольной реактивности реакции статора x_{ad} , а вместе с ней и продольной синхронной реактивности $x_d = x_{\sigma} + x_{ad}$. Тем не менее,

* При использовании характеристики холостого хода эту реактивность несколько увеличивают, т. е. вводят так называемую реактивность Потье x_p .

имея в виду приближен-
ность расчета установивше-
гося режима короткого за-
мыкания, будем считать эту
реактивность также посто-
янной, что может быть толь-
ко при прямолинейной ха-
рактеристике холостого хо-
да. Вместо ненасыщенной
характеристики (рис. 5-1)
проще и целесообразнее ис-
пользовать прямую, прохо-
дящую через начало коор-
динат и точку с координата-
ми $1,1$ (рис. 5-2). При этом
получается элементарная
связь:

$$E_q = I_f, \quad (5-4)$$

т. е. равенство численных значений относительных э. д. с.
и тока возбуждения, а продольная синхронная реактив-
ность будет

$$x_d = \frac{1}{OKЗ}, \quad (5-5)$$

т. е. несколько меньше ненасыщенной реактивности
(5-2), которую обычно приводят в паспортных данных
машины.

Зная x_d и $OKЗ$, легко построить основной реактив-
ный треугольник. Положение его вершины C (рис. 5-2)
фиксируется относительным током возбуждения $I_f =$
 $= 1/OKЗ$. Поскольку при этом возбуждении ток при ко-
ротком замыкании на выводах генератора равен номи-
нальному току, точка A на характеристике холосто-
го хода определяется ординатой, представляющей отно-
сительную величину реактивности x . Третьей вершиной
 B является проекция точки A на ось тока возбуждения.
Горизонтальный катет BC треугольника, как известно,
определяет продольную реакцию, создаваемую тремя
фазами статора при протекании по ним номинального
тока, и тем устанавливает масштаб тока статора m_I на
рис. 5-2, т. е.

$$BC = m_I I_H.$$

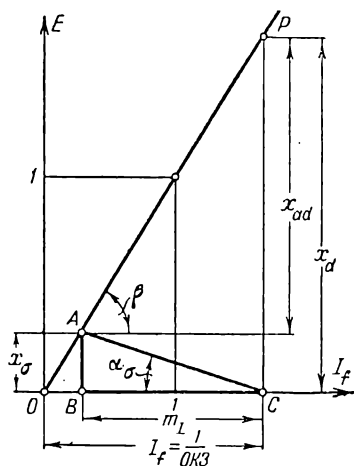


Рис. 5-2. Основной реактивный треугольник.

Пусть в рассматриваемом построении приняты масштабы: для единицы тока возбуждения m_f мм и единицы э. д. с. m_E мм. Масштаб для единицы реактивности будет $m_x = m_E/m_I$ мм, в котором тангенсы углов α_σ и β выражают соответствующие реактивности:

$$\operatorname{tg} \alpha_\sigma = m_x x_\sigma; \quad (5-6)$$

$$\operatorname{tg} \beta = m_x x_{ad}. \quad (5-7)$$

Ток возбуждения, выраженный в масштабе m_I , т. е.

$$\overset{\circ}{I}_f = \frac{m_f}{m_I} I_f, \quad (5-8)$$

назовем приведенным к статору током возбуждения.

Далее, из очевидных соотношений

$$PC = m_E E_q = OC \operatorname{tg} \beta = m_I \overset{\circ}{I}_f m_x x_{ad} = m_E \overset{\circ}{I}_f x_{ad}$$

имеем:

$$E_q = \overset{\circ}{I}_f x_{ad}, \quad (5-9)$$

или с учетом (5-4)

$$I_f = \overset{\circ}{I}_f x_{ad}. \quad (5-10)$$

Для машин, снабженных АРВ, характерным параметром является предельный ток возбуждения (или, как его иногда называют, «потолок» возбуждения) $I_{f\text{пр}}$. При электромашинном возбуждении относительная величина этого тока составляет $I_{f\text{пр}} = 3 \div 5$. Он имеет место при закороченном реостате в цепи возбуждения возбудителя.

5-3. ВЛИЯНИЕ ЯВНОПОЛЮСНОСТИ РОТОРА

Как более общий случай рассмотрим машину с явно выраженными полюсами. Выясним, в какой мере сказывается различие в ее синхронных реактивностях по продольной и поперечной осям на величины тока и напряжения при установившемся режиме.

Векторная диаграмма такой машины при ее нагрузке с отстающим током имеет знакомый вид (рис. 5-3). Из нее для абсолютной величины E_q имеем ¹:

$$E_q = I_d x_d + U_q = I_d x_d + I_d x_{BH} + I_q r_{BH} \quad (5-11)$$

И

$$I_q = I_d \operatorname{ctg} \psi = I_d \frac{r_{B\Pi}}{x_a + x_{B\Pi}}, \quad (5-12)$$

где $r_{\text{вн}} = z_{\text{вн}} \cos \varphi$ и $x_{\text{вн}} = z_{\text{вн}} \sin \varphi$ — активная и реактивная составляющие сопротивления внешней цепи $z_{\text{вн}}$.

После подстановки (5-12) в (5-11) и решения последнего относительно I_d получим:

$$I_d = \frac{E_q (x_q + x_{BH})}{(x_d + x_{BH})(x_q + x_{BH}) + r_{BH}^2}, \quad (5-13)$$

а в соответствии с (5-12)

$$I_q = \frac{E_q r_{BH}}{(x_d + x_{BH})(x_q + x_{BH}) + r_{BH}^2}. \quad (5-14)$$

Следовательно, полный ток явнополусной машины будет

$$I = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} = \frac{E_q \sqrt{(x_q + x_{BH})^2 + r_{BH}^2}}{(x_d + x_{BH})(x_q + x_{BH}) + r_{BH}^2}, \quad (5-15)$$

в то время как для машины с гладким ротором (турбогенератора), полагая $x_q = x_d$,

$$I = \frac{E_q}{V(x_d + x_{BH})^2 + r_{BH}^2}. \quad (5-16)$$

Исследуем отношение тока при $x_q \neq x_d$ к току при $x_q = x_d$. Наибольшее проявление явнополюсности ротора, очевидно, будет при $x_{\text{вн}} = 0$, т. е. когда внешняя цепь

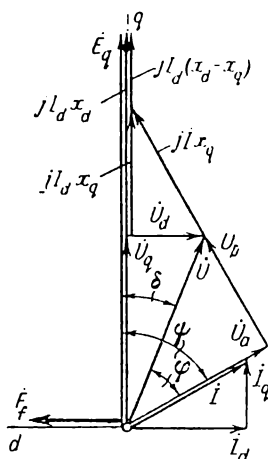


Рис. 5-3. Векторная диаграмма явнополюсного генератора, работающего с отстающим током.

¹ Активным сопротивлением обмотки статора пренебрегаем.

состоит только из активного сопротивления. При этом условии, введя дополнительно обозначения

$$x_q = ax_d$$

и

$$r_{\text{вн}} = bx_d,$$

интересующее отношение можно представить в виде

$$\lambda = \frac{I_{(x_q \neq x_d)}}{I_{(x_q = x_d)}} = \sqrt{1 + \left[\frac{(1-a)b}{(a+b^2)} \right]^2}, \quad (5-17)$$

откуда видно, что явноплюсность всегда приводит к некоторому увеличению тока ($\lambda > 1$).

При заданном значении a из $\frac{\partial \lambda}{\partial b} = 0$ находим, что максимум данного отношения наступает при $b = \sqrt{a}$ (или $r_{\text{вн}} = \sqrt{x_d x_q}$), и его величина составляет

$$\lambda_{\text{макс}} = \frac{1+a}{2\sqrt{a}}. \quad (5-18)$$

Для обычного соотношения $a = x_q/x_d = 0,6$ имеем $\lambda_{\text{макс}} = 1,03$; таким образом, различие в токах даже при самых неблагоприятных условиях составляет всего лишь 3%.

Отсюда можно сделать естественный вывод, что в расчетах установившихся токов короткого замыкания учет явноплюсности машин излишен. Для всех машин можно принимать $x_q = x_d$ и расчет вести без разделения на продольную и поперечную составляющие [т. е. по (5-16)].

5-4. ВЛИЯНИЕ И УЧЕТ НАГРУЗКИ

При установившемся режиме короткого замыкания нагрузка проявляется, с одной стороны, в том, что предварительно нагруженный генератор (с отстающим $\cos \varphi$) имеет большее возбуждение, чем генератор, работающий на холостом ходу, и, с другой — в том, что, оставаясь присоединенной к сети, она может существенно изменить величины и распределение токов в схеме.

Обратимся к простейшей схеме рис. 5-4. По ней видно, что нагрузка шунтирует поврежденную ветвь и тем

уменьшает внешнее сопротивление цепи. Это приводит к увеличению тока генератора, уменьшению его напряжения и соответственно пропорциональному уменьшению тока в месте короткого замыкания. Количественное влияние нагрузки зависит от удаленности короткого замыкания. С увеличением удаленности ее влияние сказывается сильнее. Напротив, при коротком на выводах генератора присоединенная нагрузка в установившемся режиме, очевидно, не играет никакой роли.

Перейдем теперь к оценке сопротивления нагрузки. Если бы она состояла из статических приемников с постоянными сопротивлениями, то ее учет не представлял бы каких-либо трудностей. Однако промышленная нагрузка состоит преимущественно из двигателей, главным образом асинхронных, сопротивление которых, как известно, резко зависит от скольжения. Последнее в свою очередь зависит от подведенного к двигателю напряжения, которое в рассматриваемом аварийном режиме является функцией искомого тока. Поскольку эти взаимные зависимости нелинейны, решение такой задачи встречает значительные трудности. Если для простейшего случая решение можно получить, применяя метод последовательных приближений, то для схемы с несколькими нагрузками использование этого метода бесперспективно.

Из сказанного ясно, что мало-мальски точный учет нагрузок в сложной системе при применении обычных методов расчета установившегося режима короткого замыкания практически вообще невозможен. При этом нужно подчеркнуть, что при принятых допущениях нет необходимости добиваться такого учета.

Поэтому для упрощения задачи нагрузки представляются некоторыми постоянными сопротивлениями (см. § 2-1). Отказ от учета нагрузок приводит к столь большим искажениям, что даже такой их приближенный учет следует признать обязательным.

Чтобы нагляднее выявить влияние нагрузки и наметить подход к оценке ее сопротивления, дадим уравне-

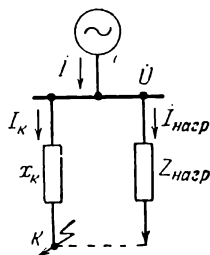


Рис. 5-4. Простейшая схема к оценке влияния нагрузки при трехфазном коротком замыкании.

нию (5-11) графическое представление. Для этого разобьем его на два уравнения, которые с учетом (5-12) можно записать в виде:

$$U_q = E_q - I_d x_d; \quad (5-19)$$

$$U_q = I_d \left(x_{вн} + \frac{r_{вн}^2}{x_q + x_{вн}} \right). \quad (5-20)$$

Первое из них выражает внешнюю характеристику [для одной составляющей напряжения $U_q = f(I_d)$], которая на рис. 5-5 представлена прямой FM^* ; второму

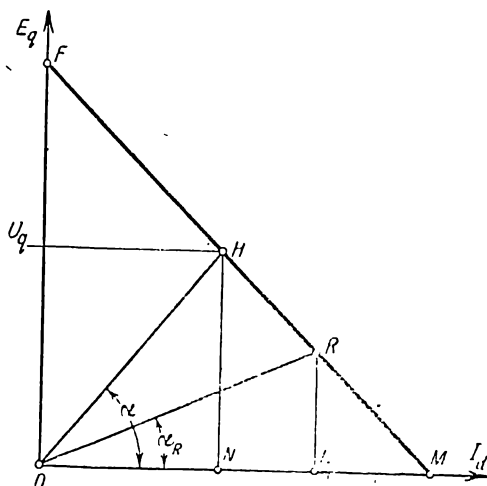


Рис. 5-5. К определению сопротивления нагрузки и иллюстрации расчета установившегося режима короткого замыкания при отсутствии АРВ.

уравнению соответствует прямая OH , наклон которой α определяется суммой сопротивлений:

$$\operatorname{tg} \alpha = x_{вн} + \frac{r_{вн}^2}{x_q + x_{вн}}, \quad (5-21)$$

где второе слагаемое можно рассматривать как реактивность x_r , действие которой эквивалентно $r_{вн}$.

* Это является следствием принятой прямолинейной характеристики холостого хода.

Следовательно, уравнение (5-11) и вытекающее из него (5-13) можно рассматривать как результат совместного решения (5-19) и (5-20), чему отвечает точка пересечения прямых FM и OH .

Если точку H считать отвечающей нагрузочному режиму, то, очевидно, ее перемещение вверх по прямой FM возможно лишь при уменьшении нагрузки с сохранением прежнего возбуждения генератора. Напротив, перемещение точки H вниз по прямой FM соответствует увеличению нагрузки или уменьшению внешнего (по отношению к генератору) сопротивления $z_{вн}$, что также имеет место при возникновении короткого замыкания в любой точке сети. Поэтому наклон прямой OR , отвечающей режиму короткого замыкания, всегда меньше наклона прямой OH , соответствующей нормальному нагрузочному режиму.

Высказанные соображения попутно поясняют причину, по которой можно отказаться от действительной характеристики холостого хода и перейти к прямолинейной. Как видно, при исследовании режима короткого замыкания достаточно знать только тот участок характеристик, где насыщение проявляется слабо.

Сопротивление нагрузки в нормальном режиме легко определить по величине и фазе ее тока (или мощности) и напряжению в месте присоединения. Но поскольку в большинстве практических расчетов коротких замыканий активными сопротивлениями пренебрегают, целесообразно нагрузку представить некоторым эквивалентным индуктивным сопротивлением, исключив тем необходимость обременительных действий с комплексными величинами. Такую замену можно осуществить, исходя из требования, чтобы при э. д. с. E_q , соответствующей заданной нагрузке, напряжение генератора при чисто индуктивном режиме сохраняло свою нормальную величину U_n . Другими словами, по (5-19) и (5-20) должны быть соблюдены равенства

$$U_n = E_q - Ix_d$$

и

$$U_n = Ix_{нагр},$$

откуда для искомой реактивности нагрузки получаем:

$$x_{нагр} = x_d \frac{U_n}{E_q - U_n}. \quad (5-22)$$

Подставляя сюда величины для типовых генераторов: для турбо-: $E_q=2,2$ и $x_d=1/0,7=1,43$ и гидро-: $E_q=1,8$ и $x_d=1/1,1=0,91$ (э. д. с. соответствуют полной нагрузке при $\cos \varphi=0,8$), найдем значение относительной реактивности нагрузки, которое после округления составляет:

$$x_{\text{нагр}}=1,2. \quad (5-23)$$

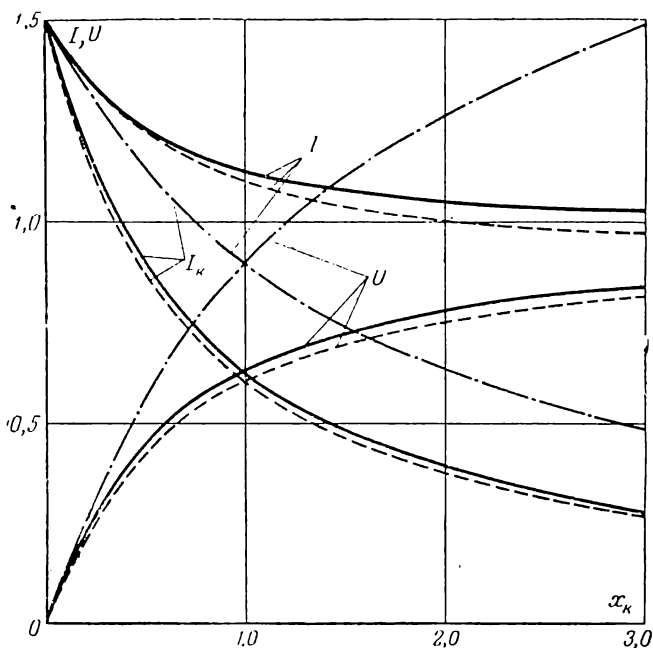


Рис. 5-6. Кривые изменения токов и напряжения в схеме рис. 5-4 в зависимости от удаленности короткого замыкания (при отсутствии АРВ).

Сплошные — при $Z_{\text{нагр}}=0,8+j0,6$; пунктирные — при $Z_{\text{нагр}}=j1,2$; пунктир с точкой — при $Z_{\text{нагр}}=\infty$.

Эта величина может быть рекомендована для практических расчетов, считая, что она отнесена к полной (Мва) рабочей мощности нагрузки и среднему номинальному напряжению ступени, где присоединена данная нагрузка.

Насколько хорошо имитирует эта реактивность полное сопротивление нагрузки, можно судить из сравнения пунктирных и сплошных кривых, приведенных на

рис. 5-6. Как видно, совпадение соответствующих кривых вполне удовлетворительное. Эти кривые построены по данным типового турбогенератора для простейшей схемы рис. 5-4. Для сопоставления на рис. 5-6 приведены также кривые для случая, когда нагрузка не учтена ($z_{\text{нагр}} = \infty$). Уже при малой удаленности короткого замыкания такое допущение вносит значительное искажение: дает преувеличенные значения тока в месте короткого замыкания и напряжения генератора и, напротив, преуменьшенные значения тока генератора.

5.5. РАСЧЕТ ПРИ ОТСУТСТВИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Расчет установившегося режима трехфазного короткого замыкания на основе принятых допущений и при отсутствии АРВ у генераторов по существу сводится к нахождению токов и напряжений в линейной схеме, для которой известны все ее элементы и приложенные к ней э. д. с.

При составлении расчетной схемы нагрузки следует объединять и присоединять в крупных узлах схемы. При аналитическом решении можно, используя известные способы преобразования, найти результирующее сопротивление схемы относительно точки короткого замыкания Z_{Σ} (в общем случае — при учете r), с приложенной за ним результирующей э. д. с. E_{Σ} . Искомая величина тока в месте короткого замыкания, очевидно, будет

$$I_k = \frac{E_{\Sigma}}{z_{\Sigma}} = \frac{E_{\Sigma}}{\sqrt{r_{\Sigma}^2 + x_{\Sigma}^2}}. \quad (5-24)$$

Разумеется, при однородной схеме (когда $r_{\Sigma} = 0$) вычисления резко упрощаются.

Если возбуждение генератора не задано и, следовательно, неизвестна его э. д. с., последнюю легко определить из выражения, которое вытекает из простейшей векторной диаграммы нагрузочного режима генератора:

$$E_q = \sqrt{(U \cos \varphi)^2 + (U \sin \varphi + I x_d)^2}, \quad (5-25)$$

где U , I , $\cos \varphi$ — соответствующие величины предшествующего режима.

Пример 5-1. Для схемы рис. 5-4, считая для генератора $E_q = 1,97$ и $x_d = 1,54$, $x_{нагр} = 1,2 \frac{1}{0,75} = 1,6$ (так как мощность нагрузки задана равной 75% номинальной мощности генератора) и $x_k = 0,5$ (отнесено к номинальной мощности генератора), определить ток в месте короткого замыкания и напряжение генератора.

Результирующая реактивность

$$x_{\Sigma} = (1,54 // 1,6) + 0,5 = 0,79 + 0,5 = 1,29;$$

результирующая э. д. с.

$$E_{\Sigma} = \frac{1,97 \cdot 1,6}{1,54 + 1,6} = 1.$$

Искомые величины будут:

$$I_k = \frac{1}{1,29} = 0,78 \text{ и } U = 0,5 \cdot 0,78 = 0,39.$$

Ток генератора

$$I = \frac{1,97 - 0,39}{1,54} = 1,03.$$

Если реактивность x_k заменить активным сопротивлением той же величины $r_k = 0,5$, то результирующее сопротивление будет

$$z_{\Sigma} = \sqrt{0,79^2 + 0,5^2} = 0,935$$

и искомые величины

$$I_k = \frac{1}{0,935} = 1,07 \text{ и } U = 0,5 \cdot 1,07 = 0,535.$$

Оценим еще, какой величины должно быть x_k , чтобы напряжение генератора сохранилось на уровне $U = 0,7$. Для этого, очевидно, ток I_k должен быть

$$I_k = \frac{1 - 0,7}{0,79} = 0,38$$

и, следовательно, искомая величина реактивности

$$x_k = \frac{0,7}{0,38} = 1,84.$$

Нетрудно также найти то возбуждение генератора, которое обеспечивает $U = 0,7$ при $x_k = 0,5$. Предоставляем это сделать читателю.

Пример 5-2. При коротком замыкании в точке K схемы рис. 5-7 определить ток в реакторе $P-I$, ток и напряжение генератора $G-I$.

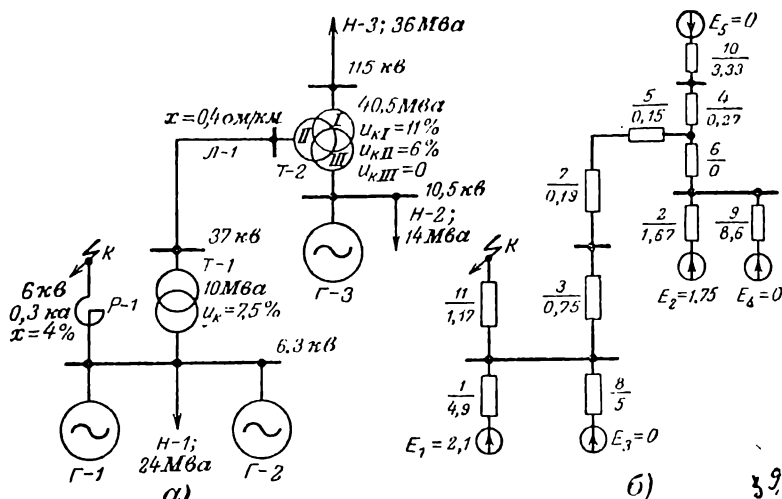


Рис. 5-7. К примеру 5-2.

а — исходная схема; б — схема замещения.

Турбогенераторы $\Gamma-1$ и $\Gamma-2$ одинаковы; параметры каждого: 15 Mva, 6,3 кВ, $OKЗ=0,68$; работают с $I_f=2,1$;

Гидрогенератор $\Gamma-3$: 60 Mva, 10,5 кВ, $OKЗ=1$; работает с $I_f=1,75$.

Номинальные напряжения трансформаторов принимаются равными средним номинальным напряжениям соответствующих ступеней.

Данные всех остальных элементов приведены на рис. 5-7,а.

Расчет проводим в относительных единицах при $S_6=100$ Mva и $U_6=U_{ср}$, соответственно чему на стороне 6,3 кВ $I_6=9,2$ ка.

Схема замещения показана на рис. 5-7,б, где генераторы $\Gamma-1$ и $\Gamma-2$ объединены в один мощностью 30 Mva.

Значения э. д. с. и реактивностей при базисных условиях:

$$E_1 = 2,1; E_2 = 1,75; x_1 = \frac{1}{0,68} \cdot \frac{100}{30} = 4,9; x_2 = \frac{1}{1} \cdot \frac{100}{60} = 1,67;$$

$$x_3 = \frac{7,5}{100} \cdot \frac{100}{10} = 0,75; x_4 = \frac{11}{100} \cdot \frac{100}{40,5} = 0,27; x_5 = \frac{6}{100} \cdot \frac{100}{40,5} = 0,15;$$

$$x_6 = 0; x_7 = 0,4 \cdot 6,5 \cdot \frac{100}{37^2} = 0,19; x_8 = 1,2 \cdot \frac{100}{24} = 5; x_9 = 1,2 \cdot \frac{100}{14} = 8,6;$$

$$x_{10} = 1,2 \cdot \frac{100}{36} = 3,33; x_{11} = \frac{4}{100} \cdot \frac{9,2}{0,3} \cdot \frac{6}{6,3} = 1,17.$$

Постепенным преобразованием схемы замещения находим:

$$x_{12} = 0,15 + 0,19 + 0,75 = 1,09; \quad x_{13} = 8,6 // (3,33 + 0,27) = 2,54;$$

$$x_{14} = 2,54 // 1,67 = 1,01; \quad E_6 = \frac{1,75 \cdot 2,54}{2,54 + 1,67} = 1,06;$$

$$x_{15} = 1,09 + 1,01 = 2,1; \quad x_{16} = 5 // 4,9 = 2,48; \quad x_{17} = 2,48 // 2,1 = 1,13$$

$$E_7 = \frac{2,1 \cdot 5}{4,9 + 5} = 1,06$$

Следовательно,

$$E_\Sigma = E_6 // E_7 = 1,06 \text{ и } x_\Sigma = 1,13 + 1,17 = 2,3.$$

Искомый ток в месте короткого замыкания

$$I_K = \frac{1,06}{2,3} = 0,46, \text{ или } I_K = 0,46 \cdot 9,2 = 4,24 \text{ ка.}$$

Напряжение генератора Г-1

$$U = 0,46 \cdot 1,17 = 0,54$$

и его ток

$$I = 0,5 \frac{2,1 - 0,54}{4,9} = 0,16, \text{ или } I = 0,16 \cdot 9,2 = 1,47 \text{ ка.}$$

5-6. ВЛИЯНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Рассмотрим влияние АРВ на величины токов и напряжений при установившемся режиме короткого замыкания. Коль скоро при коротком замыкании АРВ увеличивает возбуждение генераторов, то можно заранее предвидеть, что величины токов и напряжений в этих условиях всегда больше, чем при отсутствии АРВ. Степень этого увеличения зависит от удаленности короткого замыкания и параметров самих генераторов.

В самом деле, при относительно удаленном коротком замыкании для восстановления напряжения генератора до нормального достаточно лишь немного увеличить возбуждение. По мере уменьшения удаленности для достижения этой цели, очевидно, требуется соответственно все большее возбуждение. Однако рост последнего, как указывалось в § 5-2, у генератора ограничен определенным пределом («потолком») $I_{j\text{пр}}$.

Следовательно, для каждого значения аргумента φ_z внешней цепи можно установить наименьшую величину ее сопротивления, при коротком замыкании за которым генератор при предельном возбуждении обеспечит нормальное напряжение на своих выводах. Такое сопротивление назовем критическим сопротивлением $z_{кр}$ при данном аргументе φ_z . Если внешнее сопротивление меньше критического, то, несмотря на то, что генератор будет иметь предельное возбуждение, его напряжение все равно останется ниже нормального. В пределе, при коротком замыкании на выводах генератора, его напряжение равно нулю независимо от величины возбуждения.

Таким образом, при установившемся режиме короткого замыкания генератор с АРВ в зависимости от внешнего сопротивления работает либо с предельным возбуждением, либо с возбуждением меньше предельного, но при этом его напряжение достигает нормальной величины. Критерием для оценки имеющих место условий служит величина критического сопротивления $z_{кр}$ при данном аргументе φ_z .

Если $z_{вп} \leq z_{кр}$ (при том же φ_z), то генератор работает в режиме предельного возбуждения и его ток можно определять из обычного выражения

$$I = \frac{E_{q \text{ пр}}}{\sqrt{r_{вп}^2 + (x_d + x_{вп})^2}}, \quad (5-26)$$

где $E_{q \text{ пр}}$ — э. д. с. при предельном возбуждении $I_{f \text{ пр}}$ (в относительных единицах $E_{q \text{ пр}}^* = I_{f \text{ пр}}^*$).

Если $z_{вп} \geq z_{кр}$ (при том же φ_z), то генератор работает в режиме нормального напряжения. Величина его э. д. с. зависит от искомого тока. Однако последний можно определить, исходя из уже известного напряжения генератора, т. е.

$$I = \frac{U_{п}}{z_{вп}}, \quad (5-27)$$

Из определения критического сопротивления $z_{кр}$ следует, что при нем одновременно соблюдаются условия обоих режимов; для оценки величины этого сопротивле-

ния, очевидно, нужно, положив $r_{вн} = z_{кр} \cos \varphi_z$ и $x_{вн} = z_{кр} \sin \varphi_z$, приравнять правые части выражений (5-26) и (5-27):

$$\frac{E_{q \text{ пр}}}{\sqrt{(z_{кр} \cos \varphi_z)^2 + (x_d + z_{кр} \sin \varphi_z)^2}} = \frac{U_n}{z_{кр}},$$

откуда

$$z_{кр} = x_d \frac{\sin \varphi_z + \sqrt{\sin^2 \varphi_z + \left(\frac{E_{q \text{ пр}}^2}{U_n^2} - 1 \right)}}{\left(\frac{E_{q \text{ пр}}^2}{U_n^2} - 1 \right)}. \quad (5-28)$$

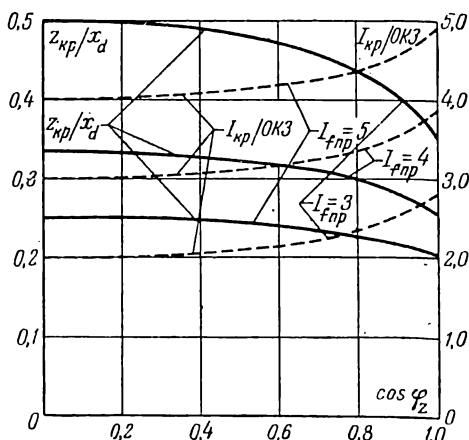


Рис. 5-8. Кривые изменения $z_{кр}/x_d = f(\cos \varphi_z)$ и $I_{кр}/ОКЗ = f(\cos \varphi_z)$ при разных значениях предельного тока возбуждения.

Соответствующий этому сопротивлению ток

$$I_{кр} = \frac{U_n}{z_{кр}} \quad (5-29)$$

по аналогии будем называть критическим током при данном аргументе φ_z .

Следует обратить внимание, что, хотя $z_{кр}$ характеризует внешнюю цепь, при заданном φ_z величина его опре-

деляется только параметрами генератора. На рис. 5-8 приведены кривые изменения

$$\frac{z_{кр}}{x_d} = f(\cos \varphi_z) \text{ и } \frac{I_{кр}}{ОКЗ} = f(\cos \varphi_z)$$

при нескольких значениях $I_{f \text{ пр.}}$.

Из (5-28) имеем:

для чисто активной внешней цепи, т. е. $\sin \varphi_z = 0$,

$$z_{кр} = r_{кр} = \frac{x_d}{\sqrt{(E_{q \text{ пр.}}^2 / U_H^2) - 1}}; \quad (5-30)$$

для чисто индуктивной цепи, т. е. $\sin \varphi_z = 1$,

$$z_{кр} = x_{кр} = \frac{x_d}{(E_{q \text{ пр.}} / U_H) - 1}, \quad (5-31)$$

которое, как и нужно было ожидать, тождественно (5-22), где E_q лишь надо заменить на $E_{q \text{ пр.}}$.

Высказанные соображения и полученные выражения можно наглядно иллюстрировать построением, аналогичным рис. 5-5. Для простоты ограничимся рассмотрением чисто индуктивной цепи. Пусть прямая $F_H M_H$ на рис. 5-9

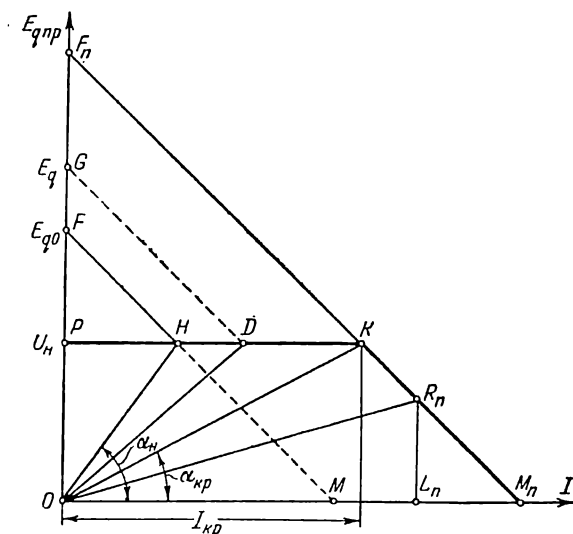


Рис. 5-9. К определению критической реактивности и иллюстрации расчета при наличии АРВ.

соответствует внешней характеристике генератора при его предельном возбуждении. На уровне нормального напряжения проведем горизонталь до пересечения с $F_{\text{н}}M_{\text{н}}$. Положение точки K соответствует одновременному выполнению условий режима предельного возбуждения и режима нормального напряжения.

Из построения непосредственно следует, что наклон прямой OK , т. е. $\text{tg } \alpha_{\text{кр}}$, пропорционален $x_{\text{кр}}$, а отрезок PK в принятом для построения масштабе дает значение критического тока.

Если удаленность короткого замыкания $x_{\text{вн}} < x_{\text{кр}}$, т. е. $\alpha < \alpha_{\text{кр}}$, то остаточное напряжение генератора характеризуется ординатами прямой $KM_{\text{н}}$, например $L_{\text{н}}R_{\text{н}}$, и соответствующий ему ток — отрезком $OL_{\text{н}}$. При $x_{\text{вн}} > x_{\text{кр}}$ напряжение сохраняется нормальным, а ток в этом случае будет выражаться, например, отрезком PD . Величину э. д. с. E_q , которая при этом будет у генератора, легко найти, суммируя $U_{\text{н}}$ и Ix_d , или графически, проведя $GD \parallel F_{\text{н}}M_{\text{н}}$ до пересечения с осью ординат. Наибольшее значение α , как и ранее, очевидно, определяется $x_{\text{нагр}}$.

Для большей наглядности сведем в таблицу все соотношения, характеризующие два возможных режима генератора при известном значении аргумента φ_z .

Таблица 5-1

Соотношения, характеризующие режимы генератора с АРВ

Режим предельного возбуждения	Режим нормального напряжения
$z_{\text{вн}} \leq z_{\text{кр}}$ $I_f = I_{f \text{ нр}}$ $U \leq U_{\text{н}}$ $I = \frac{E_{q \text{ нр}}}{\sqrt{r_{\text{вн}}^2 + (x_d + x_{\text{вн}})^2}} \geq I_{\text{кр}}$	$z_{\text{вн}} \geq z_{\text{кр}}$ $I_f \leq I_{f \text{ нр}}$ $U = U_{\text{н}}$ $I = \frac{U_{\text{н}}}{z_{\text{вн}}} \leq I_{\text{кр}}$

Чтобы иметь представление о количественном влиянии АРВ, на рис. 5-10 приведены кривые изменения токов ротора и статора и напряжения статора в зависимости от $x_{\text{вн}}$. Там же для сравнения приведены аналогичные кривые при отсутствии АРВ¹. Все кривые

¹ Построены по данным типового турбогенератора.

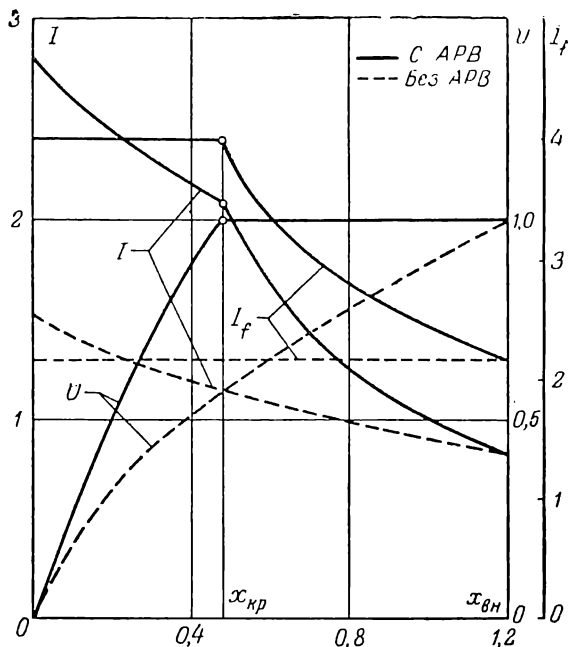


Рис. 5-10. Кривые изменения токов и напряжения в зависимости от реактивности внешней цепи при наличии и отсутствии АРВ.

при наличии АРВ имеют характерный перелом при $x_{вн} = x_{кр}$; на этой границе генератор из одного режима переходит в другой. Наибольшее относительное различие величин за счет АРВ имеет место при $x_{кр}$. В данном случае оно составляет около 80%.

5-7. РАСЧЕТ ПРИ НАЛИЧИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ

В предыдущем параграфе было показано, что критерием для однозначной оценки возможного режима генератора с АРВ является сопоставление сопротивления внешней цепи $z_{вн}$ с критическим сопротивлением при том же аргументе φ_z . Такое сопротивление легко сделать, когда в схеме участвует один генератор. В условиях же сложной схемы понятие внешнего сопротивления по отношению к каждому генератору уже теряет

свой смысл. Поэтому решение приходится вести путем последовательного приближения, задаваясь для каждого генератора с АРВ в зависимости от его положения относительно места короткого замыкания либо режимом предельного возбуждения (т. е. вводя его в схему своими $E_{qпр}$ и x_d), либо режимом нормального напряжения (т. е. вводя его в схему $E_q = U_H$ и $x = 0$) и делая затем проверку выбранных режимов. Последняя состоит в сопоставлении найденных для этих генераторов токов с их крити-

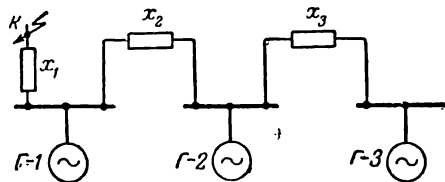


Рис. 5-11. К оценке возможного режима работы генератора с АРВ при коротком замыкании.

ческими токами (при том же аргументе φ_z). Для режима предельного возбуждения должно быть $I \geq I_{кр}$, а для режима нормального напряжения $I \leq I_{кр}$. Режим предельного возбуждения может быть проверен также не по току, а по напряжению генератора, которое должно быть $U \leq U_H$.

Если в результате проверки оказалось, что режимы некоторых генераторов выбраны неверно, то после их замены нужно сделать повторный расчет с последующей проверкой.

При использовании расчетной модели такие вычисления выполняются очень быстро. Однако и при аналитическом решении в большинстве случаев можно с первого раза правильно выбрать режимы генераторов с АРВ. Для этого нужно внимательно проанализировать заданную схему в отношении условий работы отдельных генераторов при рассматриваемом коротком замыкании. Такой анализ, разумеется, гораздо проще проводить для чисто индуктивной цепи. Так, например, если в схеме рис. 5-11 x_1 меньше $x_{кр}$ генератора Г-1, то для последнего независимо от того, имеются ли в схеме еще и другие генераторы, следует принять режим предельного возбуждения. В справедливости этого нетрудно убедить-

ся, предположив иной режим, т. е. режим нормального напряжения. При таком условии участие генераторов $\Gamma-2$ и $\Gamma-3$, очевидно, будет совсем исключено и ток в месте короткого замыкания должен будет посылать только генератор $\Gamma-1$; но при заданном значении x_1 этот ток получится больше $I_{кр}$, что противоречит режиму нормального напряжения генератора $\Gamma-1$. Если сумма $x_1 + x_2$ близка или больше $x_{кр}$ генератора $\Gamma-2$, то для этого генератора следует принять режим нормального напряжения, который, тем более, будет обеспечен участием генератора $\Gamma-1$. При другом соотношении, когда $x_1 + x_2$ значительно меньше $x_{кр}$ генератора $\Gamma-2$, целесообразно задаться для этого генератора режимом предельного возбуждения, а для генератора $\Gamma-3$ как более удаленного — режимом нормального напряжения. Однако в этом случае выбранные режимы должны быть непременно проверены.

Рассмотренный пример показывает, что в первую очередь нужно выбрать режим ближайшего к месту короткого замыкания генератора, и если оказывается, что для него должен быть принят режим предельного возбуждения, то следует перейти к оценке возможных режимов других генераторов (или станций), рассматривая их поочередно в порядке увеличения их удаленности. Как только выявлен генератор (или станция), находящийся в режиме нормального напряжения, все приключенные к нему элементы, которые не образуют пути для тока к месту короткого, могут быть отброшены; это упрощает схему.

Нагрузки увеличивают проводимость приключенной к генератору цепи и могут повлиять на режим его работы в условиях короткого замыкания. Это обстоятельство нужно учитывать при оценке возможного режима генераторов с АРВ.

Если в системе имеются генераторы без АРВ, то они должны быть введены в схему своими x_d и э. д. с. E_q , которые у них были в предыдущем режиме.

При учете активных сопротивлений расчет становится более громоздким и трудоемким. Это обуславливается не только необходимостью оперировать с комплексными числами. Дело в том, что при принятом допущении о совпадении по фазе э. д. с. генераторов напряжения всех точек чисто индуктивной схемы также

совпадают по фазе с э. д. с. Поэтому при таких условиях для генератора, работающего в режиме нормального напряжения, фаза этого напряжения заранее известна. Иное положение имеет место в схеме с активными сопротивлениями. Здесь для полной характеристики режима нормального напряжения генератора нужно знать и фазу его напряжения, но она становится известной лишь в результате выполненного расчета. В данном случае решение проще достичь подбором э. д. с. генератора, чтобы его напряжение было нормальным. При этом для быстроты расчета можно использовать линейную интерполяцию. В отдельных случаях для такого решения целесообразно использовать принцип наложения.

Пример 5-3. Для условий примера 5-1 определить те же величины, считая, что генератор снабжен АРВ и его $I_{f \text{ нр}} = 3,8$.

Критическая реактивность по (5-31) будет

$$x_{кр} = \frac{1,54}{3,8 - 1} = 0,55.$$

Поскольку x_k (даже без параллельного сложения с $x_{нагр}$) меньше $x_{кр}$, генератор будет работать в режиме предельного возбуждения. Результирующая э. д. с. составит

$$E_\Sigma = \frac{3,8 \cdot 1,6}{1,54 + 1,6} = 1,94$$

и искомые величины будут:

$$I_k = \frac{1,94}{1,29} = 1,5 \text{ и } U = 1,5 \cdot 0,5 = 0,75,$$

т. е. в 1,94 раза больше, чем при отсутствии АРВ.

Как и в примере 5-1, найдем те же величины при условии, если вместо x_k принять $r_k = 0,5$.

В данном случае

$$Z_{вн} = \frac{0,5 \cdot j1,6}{0,5 + j1,6} = 0,46 + j0,14 = 0,48 \angle 17^\circ;$$

$$\cos \varphi_z = \frac{0,46}{0,48} = 0,96.$$

По рис. 5-8* для $I_{f \text{ нр}} = 3,8$ и $\cos \varphi_z = 0,96$, интерполируя, на-

* Или по выражению (5-28).

ходим $\frac{z_{кр}}{x_d} = 0,3$. Следовательно, $z_{кр} = 0,3 \cdot 1,54 = 0,46$ и $I_{кр} = \frac{1}{0,46} = 2,18$.

Так как $z_{вн} = 0,48 > z_{кр} = 0,46$, генератор работает в режиме нормального напряжения. Поэтому ток в месте короткого замыкания будет

$$I_k = \frac{1}{0,5} = 2,$$

а ток генератора

$$I = 2 + \frac{1}{j1,6} = 2 - j0,63,$$

модуль которого (2,1), как и должно быть в данных условиях, меньше $I_{кр} = 2,18$.

Пример 5-4. Решение примера 5-2 провести для условий, когда все генераторы заданной схемы (см. рис. 5-7) имеют АРВ. Предельный ток возбуждения принять: для генераторов Г-1 и Г-2 $I_{фпр1} = 4$; для генератора Г-3 $I_{фпр2} = 3,1$.

При выбранных ранее базисных условиях имеем: предельные значения э. д. с. генераторов Г-1 и Г-2 $E_{фпр1} = 4$ и генератора Г-3 $E_{фпр2} = 3,1$; критические реактивности

$$x_{кр1} = \frac{4,9}{4-1} = 1,63 \text{ и } x_{кр2} = \frac{1,67}{3,1-1} = 0,8$$

и соответственно критические токи

$$I_{кр1} = \frac{1}{1,63} = 0,62 \text{ и } I_{кр2} = \frac{1}{0,8} = 1,25.$$

Для генераторов Г-1 и Г-2 следует принять режим предельного возбуждения, так как если бы они работали в режиме нормального напряжения, то их ток был бы $I_1 = \frac{1}{1,17} + \frac{1}{5} = 1,05$, т. е. больше $I_{кр1} = 0,62$.

При отсутствии Г-1 и Г-2 внешняя реактивность схемы по отношению к Г-3 была бы $x_{вн2} = \{(1,17 // 5) + 1,09\} // 2,54 = 1,13$, т. е. больше $x_{кр2} = 0,8$. Следовательно, Г-3 работает в режиме нормального напряжения, который тем более обеспечивается участием Г-1 и Г-2.

В соответствии с этими режимами генераторов схема замещения имеет вид рис. 5-12, где нагрузки Н-2 и Н-3 отброшены, так как при $x_6 = 0$ напряжение $U_{н1} = 1$ приложено за x_5 (рис. 5-7,б).

Для этой схемы находим:

$$E_{\Sigma} = \frac{\frac{1}{1,09} + \frac{4}{4,9}}{\frac{1}{1,09} + \frac{1}{4,9} + \frac{1}{5}} = 1,31$$

и

$$x_{\Sigma} = (4,9 // 1,09 // 5) + 1,17 = 1,93.$$

Ток в месте короткого замыкания

$$I_K = \frac{1,31}{1,93} = 0,68, \text{ или } I_K = 0,68 \cdot 9,2 = 6,25 \text{ ка.}$$

Напряжение и ток генератора Г-1:

$$U = 0,68 \cdot 1,17 = 0,8$$

и

$$I = 0,5 \frac{4 - 0,8}{4,9} = 0,33, \text{ или } I = 0,33 \cdot 9,2 \approx 3 \text{ ка.}$$

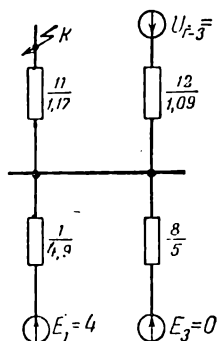


Рис. 5-12. Схема замещения к примеру 5-4.

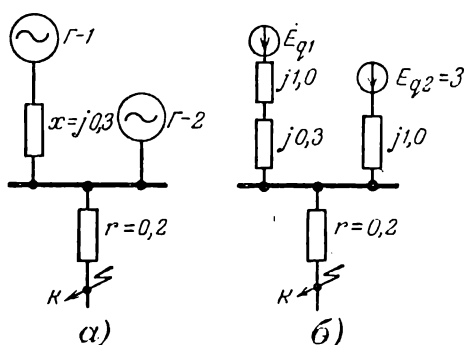


Рис. 5-13. К примеру 5-5.
а — исходная схема; б — схема замещения.

Правильность выбранного режима этого генератора подтверждается уже тем, что $U=0,8 < 1$.

Ввиду полной очевидности проверку режима генератора Г-3 делать не нужно. Однако для иллюстрации покажем ее выполнение.

Ток в ветви 12 будет

$$I_{12} = \frac{1 - 0,8}{1,09} = 0,18;$$

ток нагрузок Н-2 и Н-3

$$I_{13} = 1/2,54 = 0,39$$

и, следовательно, ток Г-3

$$I = 0,18 + 0,39 = 0,57,$$

т. е. он меньше $I_{кр2}=1,25$, что подтверждает правильность выбора режима генератора Г-3.

Сравнение с результатами расчета в примере 5-2 показывает, что наличие АРВ сказалось в увеличении I_K на 48% (на столько же возросло U) и $I_{Г-1}$ на 104%.

Пример 5-5. Для схемы рис. 5-13,а определить токи возбуждения генераторов, которые у них установятся под действием АРВ при коротком замыкании в точке К.

Генераторы одинаковы: $x_d=1$ и $I_{f \text{ нр}}=3$. Указанные на схеме значения x и r даны в относительных единицах при номинальной мощности генератора.

По (5-30) находим:

$$r_{\text{кр}} = \frac{1}{\sqrt{3^2 - 1}} = 0,354;$$

поскольку $r = 0,2 < r_{\text{кр}} = 0,354$, генератор Г-2, несомненно, имеет предельное возбуждение и его э. д. с. $E_{q \text{ нр}} = 3$.

Если бы генератор Г-1 работал один, то внешнее сопротивление его цепи было бы $z_{\text{вн}} = \sqrt{0,3^2 + 0,2^2} = 0,36$ и $\cos \varphi_z = 0,2/0,36 = 0,56$. При таком $\cos \varphi_z$ и $I_{f \text{ нр}} = 3$ по рис. 5-8 найдем $z_{\text{кр}} = 0,48$; следовательно, при таких условиях генератор Г-1 также имел бы предельное возбуждение. Однако наличие генератора Г-2 может изменить режим генератора Г-1.

Допустим, что Г-1 работает в режиме нормального напряжения. Найдем, какая при этом будет его э. д. с. E_{q1} .

Исходя из схемы замещения рис. 5-13,б, определяем: собственное сопротивление

$$Z_{11} = \frac{0,2 \cdot j1}{0,2 + j1} + j(1 + 0,3) = 0,2 + j1,34;$$

взаимное сопротивление

$$Z_{12} = j1,3 + j1 + \frac{j1,3 \cdot j1}{0,2} = -6,5 + j2,3.$$

Считая, что $\dot{E}_{q1}$ и $\dot{E}_{q2}$ направлены по оси положительных действительных величин, для напряжения генератора Г-1 имеем:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{Г-1} &= \frac{E_{q1}(0,2 + j0,34)}{0,2 + j1,34} + \frac{3j1}{-6,5 + j2,3} = \\ &= (0,15 + 0,27E_{q1}) - j(0,41 + 0,11E_{q1}). \end{aligned}$$

В соответствии с принятым предположением модуль напряжения $U_{Г-1} = 1$. Следовательно, модуль записанного комплекса будет

$$1^2 = \sqrt{(0,15 + 0,27E_{q1})^2 + (0,41 + 0,11E_{q1})^2},$$

откуда после преобразования имеем:

$$E_{q1}^2 + 2E_{q1} - 9,67 = 0.$$

Из этого уравнения $E_{q1} = 2,27$, т. е. меньше $I_{f \text{ нр}} = 3$, как и должно быть для принятого режима генератора.

Таким образом, искомые относительные токи возбуждения генераторов составляют: у Г-1 $I_f = 2,27$ и у Г-2 $I_f = I_{f \text{ нр}} = 3$.

Введя в схему рис. 5-13,б найденное значение E_{q1} , можно найти токи и напряжения в ней, которые составляют:

$$I_{\kappa} = 1,49 - j4,2 = 4,45 \angle -70,5^{\circ};$$

$$I_{Г-1} = 0,65 - j1,5 = 1,64 \angle -66,5^{\circ};$$

$$I_{Г-2} = 0,84 - j2,7 = 2,83 \angle -72,5^{\circ};$$

$$\dot{U}_{Г-1} = 0,76 - j0,65 = 1,0 \angle -41^{\circ};$$

$$\dot{U}_{Г-2} = 0,30 - j0,84 = 0,89 \angle -70,5^{\circ}.$$

5-8. ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. Что понимается под установившимся режимом короткого замыкания?

2. Чем обусловлено различие синхронных реактивностей по продольной и поперечной осям синхронной машины с явно выраженными полюсами?

3. Что называется отношением короткого замыкания и как оно связано с реактивностью x_d ?

4. Как находят значение тока возбуждения, приведенное к статору?

5. Как влияет явнополюсность ротора на величину тока при коротком замыкании?

6. Каково влияние нагрузки на величины токов в отдельных ветвях при установившемся режиме короткого замыкания?

7. В чем состоит приближенный учет нагрузки при расчете установившегося режима короткого замыкания?

8. Провести решение примера 5-1 при условии, что нагрузка представлена не индуктивным, а активным сопротивлением $r_{нагр} = 1,6$; остальные данные сохранить без изменения.

9. В чем проявляется действие АРВ при установившемся режиме короткого замыкания?

10. Какие режимы возможны при наличии АРВ и чем они характеризуются?

11. Что называется критическим сопротивлением и от чего оно зависит?

12. Какими соображениями следует руководствоваться при выборе возможного режима генератора с АРВ?

13. При коротком замыкании на шинах 115 кВ схемы рис. 5-7,а определить установившийся ток генераторов Г-1 и Г-2, считая, что все генераторы снабжены АРВ. Исходные данные использовать те же, что и в примерах 5-2 и 5-4.

14. Провести решение примера 5-5 при условии, что мощность генератора Г-1 в 2 раза больше мощности генератора Г-2. Соответственно этому относительная реактивность генератора Г-1, приведенная к мощности генератора Г-2, составляет $x = j0,5$. Сопротивления всех остальных элементов сохранить прежними.

НАЧАЛЬНЫЙ МОМЕНТ ВНЕЗАПНОГО НАРУШЕНИЯ РЕЖИМА

6-1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Прежде чем перейти к выводу общих уравнений электромагнитного переходного процесса синхронной машины, остановимся на рассмотрении начального момента такого процесса. Само собой разумеется, все величины в начальный момент внезапного нарушения режима можно получить из упомянутых общих уравнений как их частное решение для $t=0$. Более того, коль скоро индуктивности цепей исключают внезапное изменение тока, то значение последнего в начальный момент переходного процесса, вообще говоря, является известным: оно сохраняется тем же, что и в конце заданного предшествующего режима. Однако при изменившихся условиях этот ток состоит уже из новых слагающих, которые возникают в данном переходном процессе.

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

Исследование начального момента переходного процесса проще и нагляднее вести на основе принципа инерции магнитного потока или, точнее, принципа сохранения первоначального потокосцепления. В самом деле, коль скоро поток, сцепленный с ротором, в момент внезапного нарушения режима сохраняется неизменным, то соответствующая ему э. д. с., наведенная в статоре, в тот же момент также остается постоянной. Следовательно, для синхронной машины условия в начальный момент переходного процесса аналогичны тем же условиям для трансформатора, питаемого источником синусоидального напряжения (см. § 4-4).

Таким образом, можно предвидеть, что при переходном процессе ток статора синхронной машины состоит по меньшей мере из двух слагающих, а именно: периодической, которая вызывается э. д. с., наводимой

потоком ротора, и аperiodической, обусловленной изменением потока статора.

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

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

а) продольную составляющую тока статора положительной, когда создаваемая ею н. с. совпадает по направлению с н. с. тока возбуждения;

б) поперечную составляющую тока статора положительной, когда создаваемая ею н. с. отстает на 90° (электрических) от н. с. тока возбуждения; при наличии на роторе поперечного контура это же направление принимается положительным для его магнитной оси.

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

6-2. ПЕРЕХОДНЫЕ Э. Д. С. И РЕАКТИВНОСТИ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

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

Рассмотрим, как изменится этот баланс, если предположить внезапное увеличение потока продольной реакции статора на $\Delta \dot{\Phi}_{ad|0|}$.

При этом будем считать, что, кроме обмотки возбуждения, никаких других контуров в продольной оси ротора не имеется. В соответствии с законом Ленца приращение

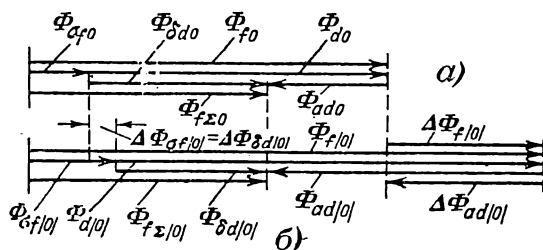


Рис. 6-1. Баланс магнитных потоков в продольной оси ротора.
а — в предшествующем режиме; б — в момент внезапного изменения режима.

потока $\Delta \dot{\Phi}_{ad|0|}$ вызовет ответную реакцию обмотки возбуждения $\Delta \dot{\Phi}_{f|0|}$, причем приращения потокосцеплений $\Delta \dot{\Psi}_{ad|0|}$ и $\Delta \dot{\Psi}_{f|0|}$ должны компенсировать друг друга, т. е.

$$\Delta \dot{\Psi}_{ad|0|} + \Delta \dot{\Psi}_{f|0|} = 0; \quad (6-1)$$

считая потокосцепления выраженными в относительных единицах и величины ротора приведенными к статору, это равенство можно записать так:

$$\Delta \dot{I}_{ad|0|} x_{ad} + \Delta \dot{I}_{f|0|} (x_{af} + x_{ad}) = 0, \quad (6-2)$$

откуда видно, что приращения токов статора $\Delta \dot{I}_{ad|0|}$ и ротора $\Delta \dot{I}_{f|0|}$ связаны между собой простым соотношением и различие в их величинах обусловлено только рассеянием обмотки возбуждения.

В ненасыщенной машине поток $\dot{\Phi}_{af}$ составляет некоторую постоянную долю потока $\dot{\Phi}_f$, которая характеризуется

коэффициентом рассеяния обмотки возбуждения

$$\sigma_f = \frac{\Phi_{\sigma f}}{\Phi_f} = \frac{x_{\sigma f}}{x_{\sigma f} + x_{ad}} = \frac{x_{\sigma f}}{x_f}. \quad (6-3)$$

С увеличением потока $\dot{\Phi}_f$ от $\dot{\Phi}_{f0}$ до $\dot{\Phi}_{f|0|}$ пропорционально ему увеличивается поток $\dot{\Phi}_{\sigma f0}$ до $\dot{\Phi}_{\sigma f|0|}$, что приводит к уменьшению потока $\dot{\Phi}_{\delta d0}$ до $\dot{\Phi}_{\delta d|0|}$. Однако результирующий поток $\dot{\Phi}_{f\sum|0|}$, сцепленный с обмоткой возбуждения, как видно из рис. 6-1,б, сохраняет свое предшествующее значение $\dot{\Phi}_{f\sum0}$.

Таким образом, рассеяние у обмотки возбуждения не позволяет характеризовать машину в начальный момент переходного процесса реактивностью рассеяния статора x_σ и э. д. с. $E_{\delta q|0|}$, наводимой потоком $\dot{\Phi}_{\delta d|0|}$, так как последний претерпевает изменение от приращения тока $\Delta I_{\delta|0|}$, величина которого еще подлежит определению. Для решения задачи, очевидно, следует использовать неизменность потока $\dot{\Phi}_{f\sum|0|}$, сцепленного с обмоткой возбуждения, или, иными словами, результирующего потокосцепления этой обмотки $\dot{\Psi}_{f\sum|0|}$. Зная коэффициент рассеяния σ_f , нетрудно определить ту часть от $\dot{\Psi}_{f\sum0}$, которая связана со статором, т. е.

$$\dot{\Psi}'_d = (1 - \sigma_f) \dot{\Psi}_{f\sum}. \quad (6-4)$$

Именно это потокосцепление $\dot{\Psi}'_d$ и обусловленная им э. д. с. в обмотке статора $\dot{E}'_q$ сохраняют в начальный момент переходного процесса свои предшествующие значения.

Придадим выражению (6-4) более наглядный вид, т. е.

$$\begin{aligned} \dot{\Psi}'_d &= (1 - \sigma_f) \dot{\Psi}_{f\sum} = (1 - \sigma_f) (\dot{\Psi}_f + \dot{\Psi}_{ad}) = \\ &= \frac{x_{ad}}{x_{\sigma f} + x_{ad}} [\dot{I}_f (x_{\sigma f} + x_{ad}) + \dot{I}_d x_{ad}] = \\ &= \dot{I}_f x_{ad} + \dot{I}_d \frac{x_{ad}^2}{x_{\sigma f} + x_{ad}}. \end{aligned}$$

Пото́к сцепле́ния Ψ'_d соответствует э. д. с.

$$\begin{aligned} \dot{E}'_q &= \dot{E}_q - jI_d \frac{x_{ad}^2}{x_{\sigma f} + x_{ad}} = \dot{U}_q + jI_d \left(x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_{\sigma f} + x_{ad}} \right) = \\ &= \dot{U}_q + jI_d x'_d. \end{aligned} \quad (6-5)$$

Электродвижущую силу $\dot{E}'_q$ называют поперечной переходной э. д. с., а реактивность

$$x'_d = x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_{\sigma f} + x_{ad}} \quad (6-6)$$

— продольной переходной реактивностью, которая является характерным параметром машины и величина которой обычно задается заводом-изготовителем.

Начальное значение переходной э. д. с. $\dot{E}'_q|_{0|}$ легко определяется из известных условий предшествующего режима, для чего в (6-5) достаточно ввести те величины $\dot{U}_{q0}$ и $\dot{I}_{d0}$, с которыми машина работала до нарушения режима.

На рис. 6-2 приведена векторная диаграмма явнополусной машины при нагрузке ее с отстающим током. Вектор $\dot{E}'_q$ по направлению совпадает с вектором $\dot{E}_q$ и меньше его на $I_d(x_d - x'_d)$. Оставаясь неизменной в начальный момент внезапного нарушения режима, переходная э. д. с. $\dot{E}'_q$ позволяет связать предшествующий режим с новым (от внезапного изменения) режимом машины, в чем собственно и заключается ее особая практическая ценность. С этой точки зрения сам термин „переходная“ нужно относить к тому, что эта э. д. с. вместе с x'_d позволяют оценить внезапный переход от одного режима к другому. Ошибочно думать, что $\dot{E}'_q$ возникает в момент нарушения режима. Из предыдущего ясно, что ее можно представить при любом установившемся режиме, но практически использовать ее для исследования такого режима нельзя, так как она сама является функцией $\dot{U}_q$ и $\dot{I}_d$ этого режима.

Величину э. д. с. $\dot{E}'_q$ в общем случае измерить нельзя. Поэтому эту э. д. с. часто называют расчетной или

условной. Выражениям (6-5) и (6-6) можно придать иной вид, введя в них коэффициент рассеяния σ_f :

$$\dot{E}'_q = \dot{E}_q - jI_d \frac{x_{ad}^2}{x_{\sigma f} + x_{ad}} = \dot{E}_q + (1 - \sigma_f) \dot{E}_{aq} = \dot{E}_{tq} - \sigma_f \dot{E}_{aq} \quad (6-7)$$

и

$$x'_d = x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_{\sigma f} + x_{ad}} = x_d - (1 - \sigma_f) x_{ad} = x_{\sigma} + \sigma_f x_{ad}, \quad (6-8)$$

откуда, в частности, видно, что учет рассеяния обмотки возбуждения отражен как в $\dot{E}'_q$, так и в x'_d . Для боль-

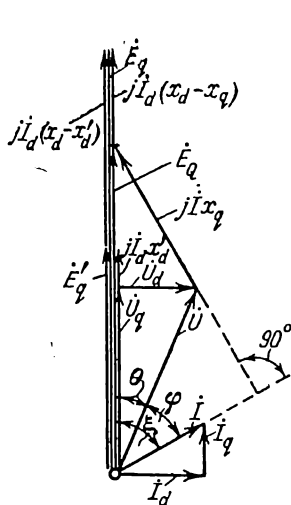


Рис. 6-2. Векторная диаграмма явнополюсной машины.

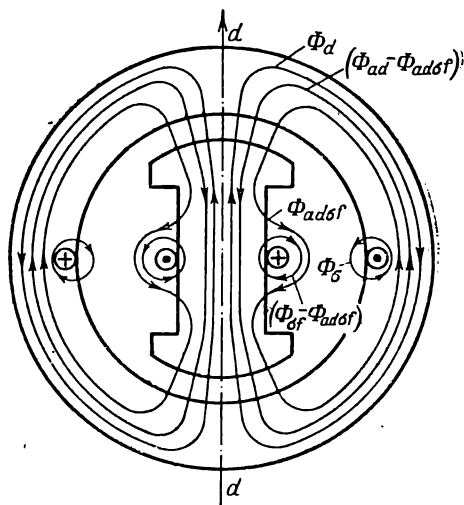


Рис. 6-3. Магнитные потоки в продольной оси ротора без демпферных обмоток.

шей наглядности на рис. 6-3 показаны магнитные потоки, которые определяют $\dot{E}'_q$ и x'_d . Здесь из потока Φ_{ad} выделена та его часть $\Phi_{ad\sigma f}$, которая вытесняется из ротора частью его потока рассеяния, создаваемой приращением тока $\Delta I_{f\sigma f}$. В соответствии с (6-7) э. д. с. $\dot{E}'_q$ определяется совокупностью потоков Φ_d и $(\Phi_{ad} - \Phi_{ad\sigma f})$, а x'_d по (6-8) — совокупностью потоков Φ_{σ} и $\Phi_{ad\sigma f}$. Использо-

ние E'_q и x'_d по существу эквивалентно замене машины с рассеянием обмотки возбуждения машиной, у которой рассеяние обмотки возбуждения не сказывается на статоре, но соответственно увеличено рассеяние обмотки статора (за счет потока $\Phi_{ad\sigma f}$ или $\sigma_f x_{ad}$).

Поток $\Phi_{ad\sigma f}$ нетрудно также определить, исходя из н. с. F_{ad} и магнитной проводимости пути, по которому проходит данный поток. Если магнитные проводимости пути взаимоиндукции между статором и ротором λ_{ad} и пути рассеяния обмотки возбуждения $\lambda_{\sigma f}$, то для рассматриваемого потока имеем:

$$\Phi_{ad\sigma f} = F_{ad} \frac{1}{\frac{1}{\lambda_{ad}} + \frac{1}{\lambda_{\sigma f}}},$$

а обусловленное им потокоцепление с обмоткой статора (имея в виду, что магнитные проводимости пропорциональны соответствующим реактивностям) будет

$$\Psi_{ad\sigma f} = I_d \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{\sigma f}}} = I_d \frac{x_{\sigma f} x_{ad}}{x_{\sigma f} + x_{ad}}.$$

Прибавив его к потокоцеплению от Φ_σ , получим:

$$\Psi_\sigma + \Psi_{ad\sigma f} = I_d x_\sigma + I_d \frac{x_{\sigma f} x_{ad}}{x_{\sigma f} + x_{ad}},$$

откуда для x'_d имеем уже знакомое выражение

$$x'_d = \frac{\Psi_\sigma + \Psi_{ad\sigma f}}{I_d} = x_\sigma + \frac{x_{\sigma f} x_{ad}}{x_{\sigma f} + x_{ad}} = x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_{\sigma f} + x_{ad}}.$$

Непосредственно из структуры выражения (6-8) следует, что продольная переходная реактивность x'_d представляет собой результирующую реактивность статорной обмотки при закороченной обмотке возбуждения. Эту реактивность можно выразить через общий коэффициент рассеяния σ машины:

$$x'_d = x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_{\sigma f} + x_{ad}} = x_d \left(1 - \frac{x_{ad}^2}{x_f x_d} \right) = \sigma x_d, \quad (6-9)$$

где

$$\sigma = 1 - \frac{x_{ad}^2}{x_f x_d}. \quad (6-10)$$

Э. д. с. $\dot{E}_{qf}$, отвечающая результирующему потоко-
сцеплению $\Psi_{f\sigma}$, должна быть введена в схему (рис. 6-4)

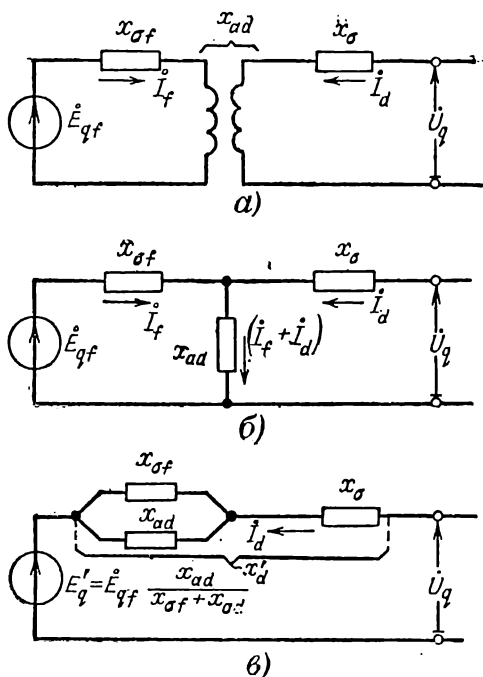


Рис. 6-4. Схема замещения машины в продольной оси ротора при отсутствии демпферных обмоток.

последовательно с $x_{\sigma f}$. После замены ветвей $x_{\sigma f}$ и x_{ad} одной эквивалентной, получим схему рис. 6-4,в, где, как и следовало ожидать, машина представлена своими E'_q и x'_d .

При отсутствии у ротора замкнутых контуров в поперечной оси поток поперечной реакции статора Φ_{aq} при переходных процессах может изменяться беспрепятственно. Поэтому внезапное изменение поперечной реакции статора можно учитывать как падение напряже-

ния от тока I_q в реактивности x_{aq} . Другими словами, у такой машины

$$E'_d = 0 \text{ и } x'_q = x_q.$$

Последнее равенство для турбогенераторов несправедливо, так как стальной массив (бочка) ротора играет роль замкнутой обмотки. Вопрос о количественной оценке x'_q для таких машин находится в стадии исследования.

Пример 6-1. Для гидрогенератора известны относительные реактивности: $x_d = 0,57$, $x_f = 0,63$ и $x_g = 0,09$. Определить x'_d и коэффициент рассеяния статорной обмотки σ_a , обмотки возбуждения σ_f и общий коэффициент рассеяния σ .

Реактивность продольной реакции (она же реактивность взаимной индукции между статором и ротором)

$$x_{ad} = 0,57 - 0,09 = 0,48.$$

Из (6-6) имеем:

$$x'_d = 0,57 - \frac{0,48^2}{0,63} = 0,204,$$

Коэффициенты рассеяния:

$$\sigma_a = 0,09/0,57 = 0,158;$$

$$\sigma_f = (0,63 - 0,48)/0,63 = 0,238$$

и по (6-9)

$$\sigma = 0,204/0,57 = 0,358$$

или, иначе, по (4-1)

$$\sigma = 0,158 + 0,238 - 0,158 \cdot 0,238 = 0,358.$$

6-3. СВЕРХПЕРЕХОДНЫЕ Э. Д. С. И РЕАКТИВНОСТИ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

Аналогично предыдущему установим э. д. с. и реактивности, которыми можно характеризовать в начальный момент переходного процесса синхронную машину, ротор которой имеет не только обмотку возбуждения, но и демпферные обмотки. Наличие последних еще не обеспечивает магнитной симметрии ротора, что вынуждает определять параметры машины отдельно в продольной и поперечной осях ее ротора.

Как и ранее, условимся, что все величины выражены в относительных единицах, причем величины ротора приведены к статору. Для простоты примем, что обмотка

статора и обе обмотки ротора в его продольной оси связаны между собой общим потоком взаимной индукции Φ_{ad} , который определяет реактивность продольной реакции x_{ad} .

В такой машине внезапное приращение потока $\Delta\dot{\Phi}_{ad|0|}$ вызовет ответную реакцию ротора $\Delta\dot{\Phi}_{rd|0|}$, которая образуется из приращений потока обмотки возбуждения $\Delta\dot{\Phi}_{f|0|}$ и потока продольной демпферной обмотки $\Delta\dot{\Phi}_{ld|0|}$. Баланс результирующих потоков, сцепленных с этими обмотками, или потокосцеплений должен сохраниться неизменным, т. е. должны быть соблюдены следующие равенства:

для обмотки возбуждения

$$\Delta\dot{I}_{f|0|}(x_{\sigma f} + x_{ad}) + \Delta\dot{I}_{ld|0|}x_{ad} + \Delta\dot{I}_{d|0|}x_{ad} = 0; \quad (6-11)$$

для продольной демпферной обмотки

$$\Delta\dot{I}_{ld|0|}(x_{\sigma ld} + x_{ad}) + \Delta\dot{I}_{f|0|}x_{ad} + \Delta\dot{I}_{d|0|}x_{ad} = 0, \quad (6-12)$$

где $\Delta\dot{I}_{ld|0|}$ и $x_{\sigma ld}$ — начальный ток, наведенный в продольной демпферной обмотке, и ее реактивность рассеяния.

Приравняв левые части (6-11) и (6-12), получим простую связь между наведенными токами $\Delta\dot{I}_{f|0|}$ и $\Delta\dot{I}_{ld|0|}$, т. е.

$$\Delta\dot{I}_{f|0|}x_{\sigma f} = \Delta\dot{I}_{ld|0|}x_{\sigma ld}, \quad (6-13)$$

откуда следует, что чем меньше рассеяние обмотки, тем больше наведенный в ней ток и тем соответственно больше ее участие в создании ответной реакции ротора.

Компенсация продольного потока в воздушном зазоре от приращения потока реакции статора $\Delta\dot{\Phi}_{ad|0|}$ при наличии продольной демпферной обмотки, очевидно, будет полнее, чем при отсутствии такой обмотки.

Совместную ответную реакцию двух обмоток в начальный момент переходного процесса, вообще говоря, можно

заменить аналогичной реакцией от суммарного тока $(\Delta \dot{I}_{f|0|} + \Delta \dot{I}_{1d|0|}) = \Delta \dot{I}_{rd|0|}$ в одной эквивалентной обмотке по продольной оси ротора с реактивностью рассеяния $x_{\sigma rd}$, т. е.

$$\begin{aligned} \Delta \dot{I}_{d|0|} x_{ad} &= \Delta \dot{I}_{rd|0|} (x_{\sigma rd} + x_{ad}) = \\ &= (\Delta \dot{I}_{f|0|} + \Delta \dot{I}_{1d|0|}) (x_{\sigma rd} + x_{ad}). \end{aligned} \quad (6-14)$$

Используя (6-13) и (6-11), последнее равенство можно привести к виду

$$(x_{\sigma f} + x_{ad}) + \frac{x_{\sigma f}}{x_{\sigma 1d}} x_{ad} = \left(1 + \frac{x_{\sigma f}}{x_{\sigma 1d}}\right) (x_{\sigma rd} + x_{ad}), \quad (6-15)$$

откуда после простых преобразований найдем, что реактивность рассеяния эквивалентной обмотки в продольной оси ротора должна быть следующей

$$x_{\sigma rd} = \frac{x_{\sigma f} x_{\sigma 1d}}{x_{\sigma f} + x_{\sigma 1d}}, \quad (6-16)$$

т. е. она определяется как эквивалентная реактивность двух параллельных ветвей с $x_{\sigma f}$ и $x_{\sigma 1d}$.

Зная коэффициенты рассеяния обмотки возбуждения σ_f и продольной демпферной обмотки σ_{1d} , из (6-16) нетрудно получить выражение для коэффициента рассеяния σ_{rd} эквивалентной обмотки в продольной оси ротора:

$$\sigma_{rd} = \frac{\sigma_f \sigma_{1d}}{\sigma_f + \sigma_{1d} - \sigma_f \sigma_{1d}}. \quad (6-17)$$

Здесь знаменатель представляет общий коэффициент рассеяния двух обмоток [см. (4-1)]. При малых значениях σ_f и σ_{1d} их произведением в знаменателе можно пренебречь, после чего структура (6-17) будет такой же, как и (6-16).

Произведенная замена позволила рассматриваемую задачу свести к той, которая уже решена (см. § 6-2).

Следовательно, для получения искомой реактивности в продольной оси ротора достаточно в выражения для x'_{ad} вместо $x_{\sigma f}$ или σ_f ввести соответственно $x_{\sigma rd}$ или σ_{rd} .

Сделав такую подстановку, найдем так называемую продольную сверхпереходную реактивность

$$\begin{aligned} x''_d &= x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_{rd}} = x_d - \frac{x_{ad}^2}{(x_{\sigma rd} + x_{ad})} = \\ &= x_{\sigma} + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{\sigma f}} + \frac{1}{x_{\sigma ld}}}, \end{aligned} \quad (6-18)$$

или, иначе,

$$x''_d = \sigma_d x_d, \quad (6-19)$$

где

$$\sigma_d = 1 - \frac{x_{ad}^2}{x_d x_{rd}} \quad (6-20)$$

— общий коэффициент рассеяния в продольной оси ротора.

В поперечной оси ротора, где имеется только демпферная обмотка, по аналогии с выкладками § 6-2 легко найти так называемую поперечную сверхпереходную реактивность

$$x''_q = x_q - \frac{x_{aq}^2}{x_{1q}} = x_{\sigma} + \sigma_{1q} x_{aq} = x_{\sigma} + \frac{x_{\sigma 1q} x_{aq}}{x_{\sigma 1q} + x_{aq}}, \quad (6-21)$$

или, в ином виде,

$$x''_q = \sigma_q x_q, \quad (6-22)$$

где

$$\sigma_q = 1 - \frac{x_{aq}^2}{x_q x_{1q}} \quad (6-23)$$

— общий коэффициент рассеяния в поперечной оси ротора.

Электродвижущие силы за этими реактивностями или так называемые сверхпереходные э. д. с. E''_d и E''_q соответственно в продольной и поперечной осях сохраняют свои значения неизменными в начальный момент внезапного нарушения режима. Их величины находят из следующих очевидных равенств:

$$\dot{E}''_{d|0|} = \dot{U}_{d0} + j \dot{I}_{q0} x''_q = \dot{E}''_{d0}; \quad (6-24)$$

$$\dot{E}''_{q|0|} = \dot{U}_{q0} + j\dot{I}_{d0}x''_d = \dot{E}''_{q0}, \quad (6-25)$$

где $\dot{U}_{d0}$, $\dot{U}_{q0}$, $\dot{I}_{d0}$, $\dot{I}_{q0}$ — составляющие напряжения и тока предшествующего режима машины.

На рис. 6-5 показаны магнитные потоки, определяющие собой э. д. с. E''_q и E''_d и реактивности x''_d и x''_q . В частности, часть потока, вытесняемая наведенными

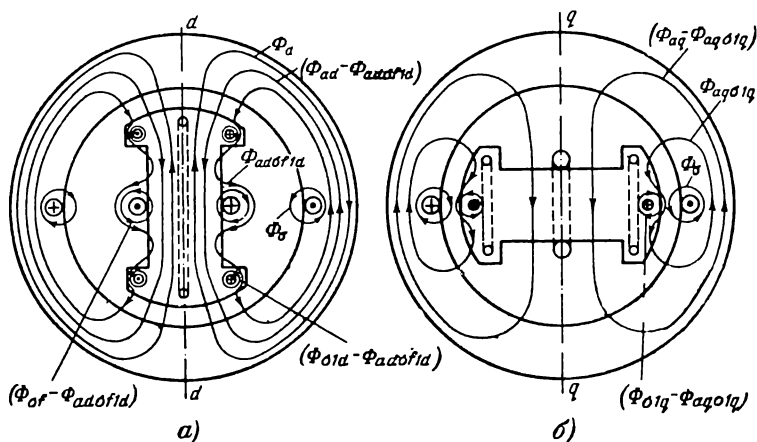


Рис. 6-5. Магнитные потоки явнополюсной машины с демпферными обмотками.

а — в продольной оси; б — в поперечной оси.

токами ротора на пути рассеяния его обмоток в продольной оси, т. е. $\Phi_{ad\delta f1d}$ (рис. 6-5, а), на участке ротора встречает магнитную проводимость

$$\lambda_{ard} = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_{af}} + \frac{1}{\lambda_{a1d}}} = \frac{\lambda_{af}\lambda_{a1d}}{\lambda_{af} + \lambda_{a1d}},$$

величина которой при выражении в относительных единицах совпадает с (6-16), как этого и следовало ожидать.

Для явнополюсной машины, работающей с отстающим током, на рис. 6-6 приведена векторная диаграмма, где указаны продольная и поперечная сверхпереходные э. д. с. и полная величина этой э. д. с. Как и переходная

э. д. с., сверхпереходные э. д. с. являются расчетными, условными величинами.

Таким образом, для машины с демпферными обмотками реактивности x''_d и x''_q вместе с э. д. с. E''_q и E''_d позволяют перейти от одного режима, изменившегося

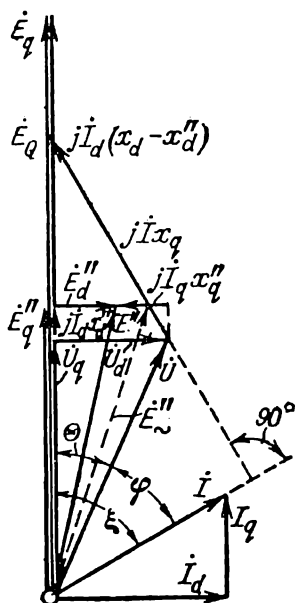


Рис. 6-6. Векторная диаграмма явнополюсной машины с демпферными обмотками.

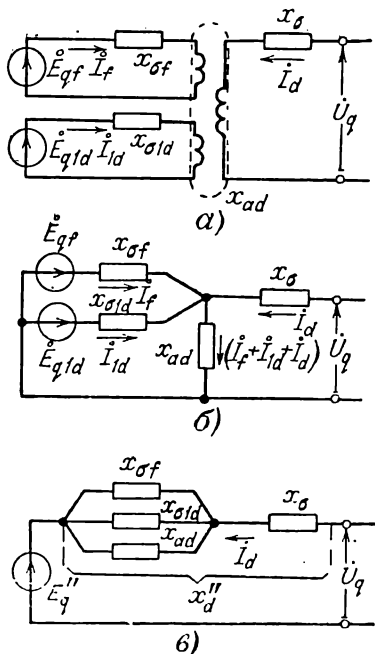


Рис. 6-7. Схема замещения машины в продольной оси ротора при наличии демпферных обмоток.

скачком, к другому. Приставка «сверх» в термине «сверхпереходные» подчеркивает, что данные параметры и величины учитывают влияние демпферных обмоток.

Реактивности x_d'' и x_q'' являются характерными параметрами машины и наряду с другими реактивностями обычно задаются заводом-изготовителем.

Три магнитносвязанные обмотки в продольной оси ротора (рис. 6-7,а) могут быть представлены эквивалентной схемой замещения (рис. 6-7,б), как для трехобмоточного трансформатора. Здесь э. д. с. $\dot{E}_{qf}$ и $\dot{E}_{q1d}$ отвечают результирующим потокоцеплениям соответственно обмотки

возбуждения и продольной демпферной обмотки. Упрощение этой схемы (рис. 6-7, в) приводит к E''_d и x''_d .

В поперечной оси ротора, где имеется магнитная связь между обмоткой статора и поперечной демпферной обмоткой (рис. 6-8, а), схема замещения машины будет той же, что и для двухобмоточного трансформатора (рис. 6-8, б). После упрощения ее (рис. 6-8, в) она дает E''_d и x''_q .

Схемы замещения машины наглядно показывают взаимную связь между приведенными токами отдельных обмоток. При отсутствии в них активных сопротивлений они отражают только начальный момент переходного процесса.

Нетрудно убедиться, что при отсутствии демпферных обмоток, т. е. при $x_{\sigma 1d} = x_{\sigma 1q} = \infty$, полученные выражения для x''_d и x''_q и схемы замещения переходят в те, которые были установлены в § 6-2.

Пример 6-2. Определить значение x''_d для гидрогенератора, рассмотренного в примере 6-1, считая, что в продольной оси ротора создана демпферная обмотка с реактивностью $x_{1d} = 0,54$.

Коэффициент рассеяния продольной демпферной обмотки $\sigma_{1d} = (0,54 - 0,48) / 0,54 = 0,111$.

По (6-17) находим:

$$\sigma_{rd} = \frac{0,238 \cdot 0,111}{0,238 + 0,111 - 0,238 \cdot 0,111} = 0,082.$$

Общий коэффициент рассеяния машины в продольной оси

$$x_d = 0,158 + 0,082 - 0,158 \cdot 0,082 = 0,227.$$

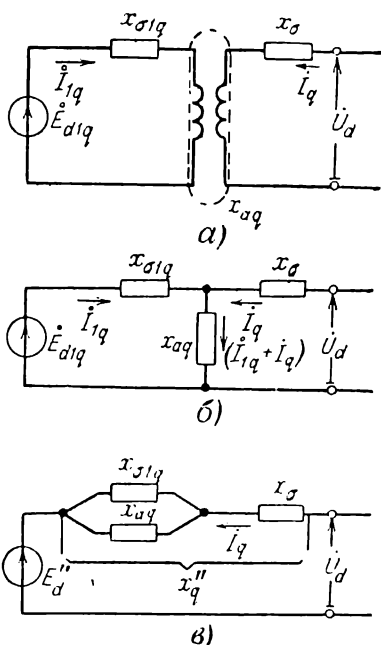


Рис. 6-8. Схема замещения машины в поперечной оси ротора при наличии демпферных обмоток.

По (6-19) имеем:

$$x''_d = 0,227 \cdot 0,57 = 0,13,$$

или, иначе, из (6-18)

$$x''_d = 0,09 + \frac{1}{\frac{1}{0,48} + \frac{1}{0,15} + \frac{1}{0,06}} = 0,13,$$

где

$$x_{\sigma f} = 0,63 - 0,48 = 0,15 \text{ и } x_{\sigma 1d} = 0,54 - 0,48 = 0,06.$$

Соотношение между начальными наведенными токами в обмотках ротора по продольной его оси при внезапном нарушении режима генератора в соответствии с (6-13) будет

$$\frac{\Delta \overset{\circ}{I}_{1d|0|}}{\Delta \overset{\circ}{I}_{f|0|}} = \frac{x_{\sigma f}}{x_{\sigma 1d}} = \frac{0,15}{0,06} = 2,5,$$

т. е. в начальный момент $\left(\frac{2,5}{1 + 2,5} \right) \cdot 100 = 71,5\%$ ответной реакции ротора создает продольная демпферная обмотка.

Пример 6-3. Определить, какую реактивность должна иметь поперечная демпферная обмотка у генератора, рассмотренного в предыдущем примере, чтобы при $x_q = 0,37$ было $x''_q = x_d'' = 0,13$.

Находим:

$$x_{\sigma q} = 0,37 - 0,09 = 0,28.$$

$$\text{Далее, по (6-21) } 0,13 = 0,37 - \frac{0,28^2}{x_{1q}},$$

откуда $x_{1q} = 0,327$.

Коэффициент рассеяния этой обмотки должен быть

$$\sigma_{1q} = (0,327 - 0,28) / 0,327 = 0,144,$$

и общий коэффициент рассеяния машины в поперечной оси ее ротора

$$\sigma_q = 0,158 + 0,144 = 0,302.$$

6-4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ И НАГРУЗКИ

Изложенное выше относится, конечно, не только к синхронным генераторам, но и к синхронным двигателям; последние в начальный момент внезапного нарушения режима также характеризуются в общем случае своими сверхпереходными реактивностями в продольной и поперечной осях ротора с приложенными за

ними соответствующими сверхпереходными э. д. с. Что касается величин этих э. д. с., то, как теперь известно, они зависят от предшествующего режима двигателей. У перевозбужденного синхронного двигателя (или синхронного компенсатора) сверхпереходная э. д. с. всегда выше подведенного напряжения. Поэтому при любом резком снижении напряжения посылаемый двигателем в сеть реактивный ток непременно возрастет. Этого нельзя сказать в отношении синхронного двигателя, работающего с недовозбуждением, поскольку при таком режиме его сверхпереходная э. д. с. ниже подведенного напряжения. Здесь, в зависимости от степени снижения напряжения возможно как продолжение потребления реактивного тока из сети (при $E''_0 < U_{j0}$), так и генерирование реактивного тока (при $E''_0 > U_{j0}$). Лишь в частном случае, когда $E''_0 = U_{j0}$, в начальный момент переходного процесса ток в двигателе будет отсутствовать.

Обратимся теперь к асинхронным двигателям, которые обычно составляют основную часть промышленной нагрузки. В нормальном режиме они работают с малым скольжением, порядка 2—5%. Проведенный Н. Н. Щедриным [Л. 13] анализ показал, что практически можно пренебречь столь малым скольжением и асинхронный двигатель в начале переходного процесса рассматривать как недовозбужденный синхронный двигатель.

Исходя из неизменности потокосцепления с обмотками ротора (имея в виду в общем случае двигатель с двойной обмоткой на роторе) в начальный момент внезапного нарушения режима, для асинхронного двигателя можно установить сверхпереходные реактивности и э. д. с. Благодаря полной симметрии ротора здесь отпадает необходимость разложения величин по отдельным осям. Сверхпереходная реактивность может быть получена из схемы замещения, аналогичной схеме рис. 6-7,б, где вместо $x_{\sigma f}$ и $x_{\sigma ld}$ нужно ввести реактивности рассеяния обмоток ротора двигателя, а x_{ad} заменить реактивностью взаимоиндукции между его статором и ротором. Непосредственно из такой схемы замещения следует, что сверхпереходная реактивность асинхронного двигателя x'' представляет собой реактивность короткого замыкания (т. е. когда двигатель за-

торможен, $s=100\%$). Относительную величину этой реактивности практически можно определять как

$$x''_* = \frac{1}{I_{\text{пуск}}_*}, \quad (6-26)$$

где $I_{\text{пуск}}_*$ — относительный пусковой ток двигателя (при пуске без реостата).

В зависимости от типа и мощности двигателя относительная величина его сверхпереходной реактивности находится в пределах

$$x''_* = 0,2 \div 0,35.$$

Начальное значение сверхпереходной э. д. с. $E''_{|0|}$ двигателя определяется из его предшествующего режима, как показано на векторной диаграмме рис. 6-9, из которой следует, что

$$E''_{|0|} = E''_0 = \sqrt{(U_0 \cos \varphi_0)^2 + (U_0 \sin \varphi_0 - I_0 x'')^2}, \quad (6-27)$$

или приближенно, принимая E''_0 равной проекции ее на U_0 ,

$$E''_0 \approx U_0 - I_0 x'' \sin \varphi_0, \quad (6-28)$$

где U_0 , I_0 и φ_0 — предшествующие напряжение, ток и угол сдвига между ними.

При номинальной предшествующей нагрузке асинхронного двигателя с $\cos \varphi_0 = 0,8$, считая его $x'' = 0,2$, имеем $E''_0 = 0,9$.

Участие асинхронного двигателя, так же как и недовозбужденного синхронного двигателя, в начальный момент внезапного нарушения режима определяется соотношением между его э. д. с. E''_0 и изменившимся скачком напряжением в месте присоединения его к сети. При $E''_0 > U_{|0|}$ он является генератором реактивного тока.

При рассмотрении переходного процесса в достаточно сложных схемах индивидуальный учет каждого двигателя не только чрезмерно сложен, но практически даже невыполним из-за отсутствия сведений о составе, схеме присоединения и режиме работы всех потребите-

лей. К тому же столь скрупулезный подход к решению не соответствовал бы остальным принимаемым допущениям. Поэтому в практических расчетах начального момента переходного процесса обычно учитывают отдельно лишь крупные двигатели, от которых можно ожидать существенного влияния. Все же остальные двигатели вместе с другими токоприемниками целесообразно учитывать в виде обобщенных нагрузок крупных узлов системы (подстанций и т. п.), характеризуя такие нагрузки средними параметрами, полученными для типового состава потребителей промышленного района и типовой схемы питающей его сети.

Исходя из указанных соображений, установлено, что в начальный момент переходного процесса такую обобщенную нагрузку можно приближенно характеризовать сверхпереходными реактивностью и э. д. с., относительные величины которых при полной рабочей мощности нагрузки ($M_{ва}$) и среднем номинальном напряжении той ступени, где она присоединена, составляют примерно

$$x''_{нагр} = 0,35 \text{ и } E''_{нагр0} = 0,85.$$

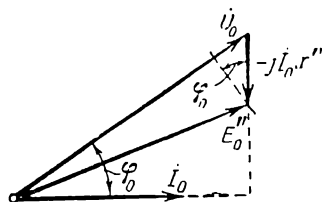


Рис. 6-9. Векторная диаграмма асинхронного двигателя.

6-5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАЧАЛЬНЫХ ПЕРЕХОДНОГО И СВЕРХПЕРЕХОДНОГО ТОКОВ

Аналогично установленным наименованиям э. д. с. и реактивностей синхронной машины в начальный момент внезапного нарушения ее режима значения периодической слагающей тока в тот же момент называют:

при отсутствии демпферных обмоток — начальным переходным током $I''_{|0|}$;

при наличии демпферных обмоток — начальным сверхпереходным током $I''_{|0|}$.

Как общий случай рассмотрим машину с демпферными обмотками в обеих осях ротора, причем $x''_d \neq x''_q$. При предшествующем режиме с отстающим по фазе то-

ком (см. рис. 6-6) для абсолютных величин составляющих сверхпереходной э. д. с. имеем:

$$E''_{d0} = U_{d|0|} - I''_{q|0|} x''_q; \quad (6-29)$$

$$E''_{q0} = U_{q|0|} + I''_{d|0|} x''_d, \quad (6-30)$$

где $U_{d|0|}$, $U_{q|0|}$, $I''_{d|0|}$ и $I''_{q|0|}$ — величины, подлежащие определению.

При изолированной работе генератора сопротивления $r_{вн}$ и $x_{вн}$ его внешней цепи (при любых изменениях в ней) известны. Поэтому согласно той же векторной диаграмме можно написать еще два уравнения:

$$U_{d|0|} = I''_{d|0|} r_{вн} - I''_{q|0|} x_{вн}; \quad (6-31)$$

$$U_{q|0|} = I''_{d|0|} x_{вн} + I''_{q|0|} r_{вн}. \quad (6-32)$$

После подстановки их в (6-29) и (6-30) и решения последних относительно токов получим:

$$I''_{d|0|} = \frac{E''_{d|0|} r_{вн} + E''_{q|0|} (x''_q + x_{вн})}{(x''_d + x_{вн})(x''_q + x_{вн}) + r_{вн}^2}; \quad (6-33)$$

$$I''_{q|0|} = \frac{E''_{q|0|} r_{вн} - E''_{d|0|} (x''_d + x_{вн})}{(x''_d + x_{вн})(x''_q + x_{вн}) + r_{вн}^2}, \quad (6-34)$$

и, следовательно,

$$\begin{aligned} I''_{|0|} &= \sqrt{I'^{'2}_{d|0|} + I'^{'2}_{q|0|}} = \\ &= \frac{\sqrt{E'^{'2}_{d|0|} [r_{вн}^2 + (x''_d + x_{вн})^2] + E'^{'2}_{q|0|} [r_{вн}^2 + (x''_d + x_{вн})^2]}}{(x''_d + x_{вн})(x''_q + x_{вн}) + r_{вн}^2}. \end{aligned} \quad (6-35)$$

При отсутствии поперечной демпферной обмотки ($x''_q = x_q$) э. д. с. $E''_{d|0|} = 0$ и (6-33) — (6-35) приобретают уже знакомый вид (5-13) — (5-15), где вместо E_q и x_d нужно ввести соответственно $E''_{q|0|}$ и x''_d . Наконец, когда отсутствует также и продольная демпферная обмотка ($x''_d = x'_d$), токи $I'_{d|0|}$, $I'_{q|0|}$ и $I'_{|0|}$ могут быть определены по (5-13) — (5-15), заменив в них E_q и x_d соответственно $E'_{q|0|}$ и x'_d .

Из структуры (6-35) следует, что различие между величинами x''_d и x''_q , обусловленное несимметрией ротора, усложняет определение начального сверхпереходного тока. Оценим, в какой мере неравенство $x''_d \neq x''_q$ влияет на величину этого тока, для чего исследуем отношение

$$\lambda'' = \frac{I''_{|0|(x''_d \neq x''_q)}}{I''_{|0|(x''_d = x''_q)}}. \quad (6-36)$$

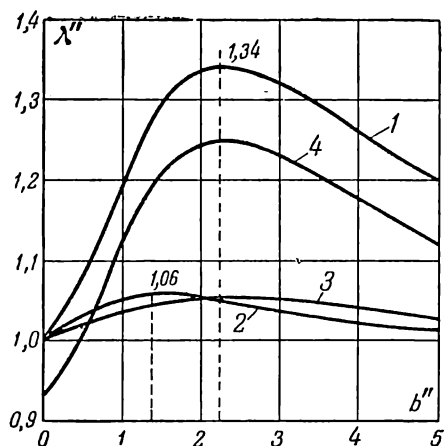


Рис. 6-10. Кривые к оценке приближенного определения начального сверхпереходного тока.

Наибольшее отклонение данного отношения от единицы, очевидно, будет при $x_{\text{вн}} = 0$ и наибольшем различии между x''_d и x''_q . Последнее имеет место в том случае, когда ротор снабжен только одной продольной демпферной обмоткой, т. е. когда в поперечной оси $x''_q = x_q$, а в продольной машина характеризуется x''_d . При таких условиях $E''_{a|0} = 0$ и выражение для λ'' приобретает вид (5-17), где a и b должны быть соответственно заменены

$$a'' = \frac{x_q}{x''_d}$$

и

$$b'' = \frac{r_{\text{вн}}}{x''_q}.$$

У явнополюсных машин значение a'' достигает примерно 5. На рис. 6-10 приведена зависимость $\lambda'' = f(b'')$ при $a'' = 5$ (кривая 1). Для сравнения там же приведены аналогичные кривые при $a'' = 2$ (кривая 2) и при $a'' = 5$ и $x_{вн} = r_{вн}$ (кривая 3). Как видно, уменьшение a'' путем ли изменения параметров машины или введения внешней реактивности $(a'' = \frac{x_q + x_{вн}}{x''_d + x_{вн}})$ резко снижает отношение λ'' . В последних случаях λ'' не выходит за пределы 1,06.

Наконец, нужно отметить еще одно обстоятельство. Если принято $x''_q = x''_d$, то определение I''_{q0} , естественно, следует производить не по E''_{q0} , а по э. д. с. $E''_{0\sim}$ (см. рис. 6-6):

$$E''_{0\sim} = \sqrt{(U_0 \cos \varphi_0)^2 + (U_0 \sin \varphi_0 + I_0 x''_d)^2}. \quad (6-37)$$

Поэтому при нахождении λ'' в (5-17) нужно ввести поправку $\kappa = \frac{E''_{q0}}{E''_{0\sim}} < 1$, величина которой тем меньше, чем больше предшествующая нагрузка и выше ее коэффициент мощности. Так, при полной нагрузке с $\cos \varphi_0 = 0,9$, $x''_d = 0,2$ и $a'' = 5$ эта поправка составляет $\kappa = 0,93$. Соответственно этому зависимость $\lambda'' = f(b'')$ на рис. 6-10 будет выражаться не кривой 1, а кривой 4. Аналогичное снижение будет и кривых 2 и 3.

Таким образом, в подавляющем числе практических случаев приближенное определение начального сверхпереходного тока, исходя из равенства $x''_q = x''_d$, дает погрешность в рамках $\pm 5\%$, что позволяет широко использовать его. Аналогичное приближенное определение начального переходного тока (т. е. при допущении $x_q = x'_d$) связано с еще меньшей ошибкой, так как $\frac{x_q}{x'_d} < \frac{x_q}{x''_d}$.

Дополнительные указания к расчету начального сверхпереходного тока в сложных схемах, включая учет двигателей и нагрузок, приведены в § 11-2.

Пример 6-4. Синхронный генератор, параметры которого: $x''_d = 0,20$, $x''_q = 0,35$, $x'_d = 0,30$, $x_g = 0,12$, $x_d = 1,00$, $x_q = 0,65$, работает с номинальным током и напряжением при $\cos \varphi_0 = 0,85$.

Определить величины сверхпереходного тока генератора и его напряжения в момент внезапного сброса активной или реактивной

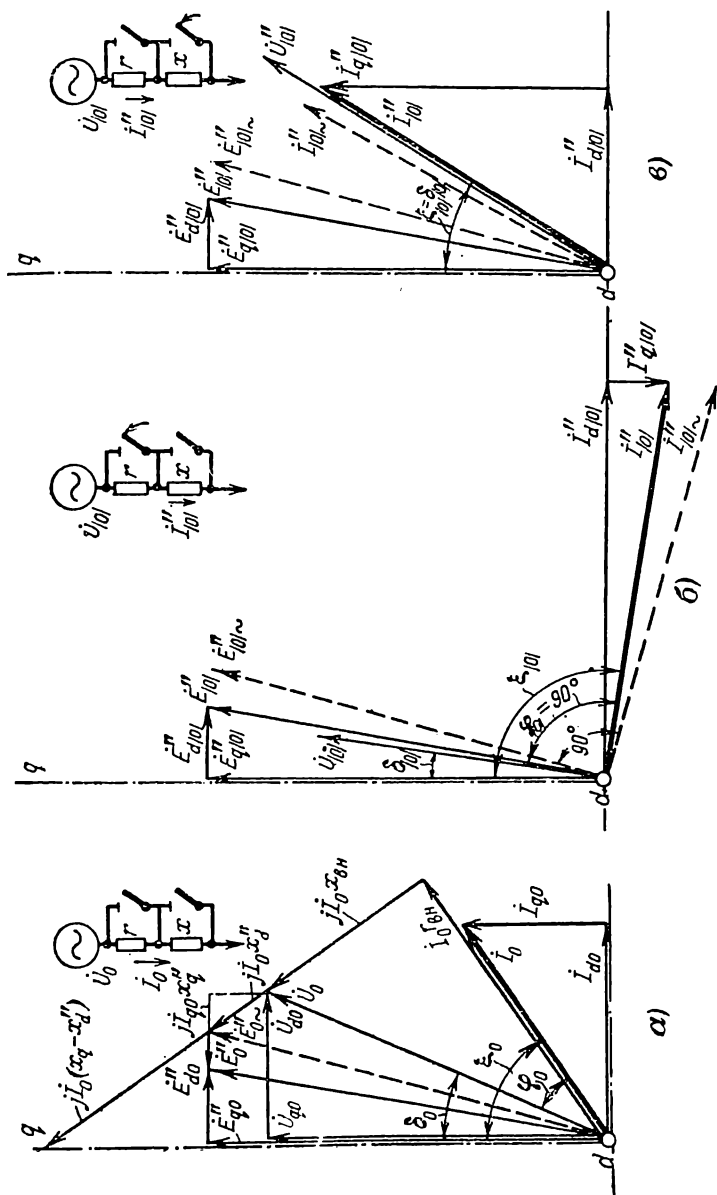


Рис. 6-11. Векторные диаграммы к примеру 6-4.
 а — при нормальном предшествующем режиме; б — при закорачивании активного сопротивления внешней цепи;
 в — при закорачивании индуктивного сопротивления внешней цепи.

нагрузки (т. е. в момент закорачивания активного или реактивного сопротивления внешней цепи генератора).

Расчет проводим в относительных единицах, принимая номинальные условия генератора за базисные.

а) Нормальный предшествующий режим

При заданных условиях составляющие внешнего сопротивления будут:

$$r_{вн} = z_{вн} \cos \varphi_0 = 1 \cdot 0,85 = 0,85;$$

$$x_{вн} = z_{вн} \sin \varphi_0 = 1 \sqrt{1 - 0,85^2} = 0,53$$

и угол сдвига

$$\varphi_0 = 32^\circ.$$

В соответствии с рис. 6-11,а находим:

$$\operatorname{tg} \xi_0 = \frac{x_q + x_{вн}}{r_{вн}} = \frac{0,65 + 0,53}{0,85} = 1,39,$$

откуда $\xi_0 = 54^\circ 20'$ и, следовательно, $\delta_0 = 54^\circ 20' - 32^\circ = 22^\circ 20'$; при этом продольные и поперечные составляющие тока и напряжения будут:

$$I_{d0} = I_0 \sin 54^\circ 20' = 1 \cdot 0,81 = 0,81;$$

$$I_{q0} = I_0 \cos 54^\circ 20' = 1 \cdot 0,58 = 0,58;$$

$$U_{d0} = U_0 \sin 22^\circ 20' = 1 \cdot 0,38 = 0,38 \quad (\text{или } U_{d0} = 0,58 \cdot 0,65 = 0,38);$$

$$U_{q0} = U_0 \cos 22^\circ 20' = 1 \cdot 0,93 = 0,93.$$

Значения э. д. с.:

$$E''_{d0} = 0,38 - 0,58 \cdot 0,35 = 0,18 \quad \text{и} \quad E''_{q0} = 0,93 + 0,81 \cdot 0,20 = 1,09.$$

Приближенное значение э. д. с. $E''_{0\sim}$ (при $x''_q = x''_d = 0,2$) по (6-37)

$$E''_{0\sim} = \sqrt{0,85^2 + (0,53 + 1 \cdot 0,2)^2} = 1,12.$$

б) Закорачивание активного сопротивления внешней цепи

Суммарные реактивности в этом случае будут:

$$x''_{d\Sigma} = 0,2 + 0,53 = 0,73 \quad \text{и} \quad x''_{q\Sigma} = 0,35 + 0,53 = 0,88.$$

Составляющие сверхпереходного тока в начальный момент:

$$I''_{d|0|} = \frac{1,09}{0,73} = 1,49 \quad \text{и} \quad I''_{q|0|} = \frac{0,18}{0,88} = 0,20$$

и его полное значение $I''_{|0|} = \sqrt{1,49^2 + 0,2^2} = 1,5.$

Напряжение генератора $U_{|0|} = 0,53 \cdot 1,5 = 0,8.$

Приближенное значение начального сверхпереходного тока

$$I''_{|0|\sim} = \frac{E''_{0\sim}}{x''_{d\Sigma}} = \frac{1,12}{0,73} = 1,53, \quad \text{т. е. на } 2\% \text{ больше,}$$

На рис. 6-11,б показана векторная диаграмма для рассматриваемых условий. Следует обратить внимание на то, что хотя цепь является чисто индуктивной, но благодаря $x''_q \neq x''_d$ угол между $I''_{|0|}$ и $\dot{E}''_{|0|}$ не равен 90° .

в) *Закорачивание индуктивного сопротивления внешней цепи*

По (6-33) и (6-34) для данного случая найдем:

$$I''_{d|0|} = \frac{1,09 \cdot 0,35 + 0,18 \cdot 0,85}{0,20 \cdot 0,35 + 0,85^2} = 0,68;$$

$$I''_{q|0|} = \frac{1,09 \cdot 0,85 - 0,18 \cdot 0,20}{0,2 \cdot 0,35 + 0,85^2} = 1,13$$

и по (6-35)

$$I''_{|0|} = \sqrt{0,68^2 + 1,13^2} = 1,32.$$

Напряжение генератора

$$U_{|0|} = 1,32 \cdot 0,85 = 1,11.$$

Приближенное значение этого тока

$$I''_{|0|} = \frac{1,12}{\sqrt{0,85^2 + 0,2^2}} = 1,29, \text{ т. е. на } 2,3\% \text{ меньше.}$$

Векторная диаграмма для данного случая представлена на рис. 6-11,в.

Пример 6-5. Для условий предыдущего примера составить схему замещения генератора и определить начальные значения свободных токов, наведенных в обмотках ротора.

По заданным параметрам найдем реактивности элементов схемы замещения.

В продольной оси:

$$x_{ad} = 1,00 - 0,12 = 0,88;$$

$$x_f = \frac{x_{ad}^2}{x_d - x'_d} = \frac{0,88^2}{1,0 - 0,3} = 1,11; \quad x_{af} = 1,11 - 0,88 = 0,23;$$

$$x_{rd} = \frac{x_{ad}^2}{x_d - x''_d} = \frac{0,88^2}{1,0 - 0,12} = 0,97; \quad x_{ard} = 0,97 - 0,88 = 0,09;$$

$$x_{a1d} = \frac{x_{af} x_{ard}}{x_{af} - x_{ard}} = \frac{0,23 \cdot 0,09}{0,23 - 0,09} = 0,15.$$

В поперечной оси:

$$x_{aq} = 0,65 - 0,12 = 0,53;$$

$$x_{1q} = \frac{x_{aq}^2}{x_q - x''_q} = \frac{0,53^2}{0,65 - 0,35} = 0,94;$$

$$x_{a1q} = 0,94 - 0,53 = 0,41.$$

Найдем значения токов, напряжений и э. д. с. в отдельных ветвях и точках схемы замещения в различных режимах.

а) Нормальный предшествующий режим

Относительный ток возбуждения

$$I_{f0} = E_{q0} = U_{q0} + I_{d0} x_d = 0,93 + 0,81 \cdot 1,0 = 1,74$$

и его приведенное к статору значение

$$\overset{\circ}{I}_{f0} = \frac{1,74}{0,88} = 1,98.$$

Электродвижущая сила, наводимая в статоре потоком Φ_{id0} , она же э. д. с., соответствующая результирующему потокоцеплению продольной демпферной обмотки,

$$E_{id0} = E_{q1d0} = 0,93 + 0,12 \cdot 0,81 = 1,03.$$

Электродвижущая сила, соответствующая результирующему потокоцеплению обмотки возбуждения,

$$E_{qf0} = 1,03 + 0,23 \cdot 1,98 = 1,48,$$

или, иначе,

$$E_{qf0} = \overset{\circ}{I}_{f0} x_f - I_{d0} x_{ad} = 1,98 \cdot 1,11 - 0,81 \cdot 0,88 = 1,48.$$

Электродвижущая сила, наводимая в статоре потоком Φ_{iq0} , она же э. д. с., соответствующая результирующему потокоцеплению поперечной демпферной обмотки,

$$E_{id0} = E_{d1q0} = 0,38 - 0,58 \cdot 0,12 = 0,31.$$

Схемы замещения генератора в продольной и поперечной осях с указанием реактивностей и величин токов и э. д. с. при нормальном предшествующем режиме приведены на рис. 6-12, а и б.

б) Закорачивание активного сопротивления внешней цепи

Приращение продольного тока статора

$$\Delta I_{d|0|} = -1,49 - (-0,81) = -0,68.$$

Приращение тока в эквивалентной обмотке ротора по его продольной оси

$$\Delta \overset{\circ}{I}_{rd|0|} = -\Delta I_{d|0|} \frac{x_{ad}}{x_{rd}} = 0,68 \frac{0,88}{0,97} = 0,62;$$

соответственно в обмотке возбуждения и продольной демпферной обмотке

$$\Delta \overset{\circ}{I}_{f|0|} = 0,62 \frac{0,15}{0,15 + 0,23} = 0,24 \text{ и } \Delta \overset{\circ}{I}_{1d|0|} = 0,62 \frac{0,23}{0,15 + 0,23} = 0,38.$$

Следовательно, токи в отдельных ветвях

$$\dot{I}_{f|c|} = 1,98 + 0,24 = 2,2 \text{ и } \dot{I}_{1d|0|} = 0,38.$$

Легко убедиться, что в новых условиях результирующие потоко-
сцепления обмоток в продольной оси ротора сохранились преж-

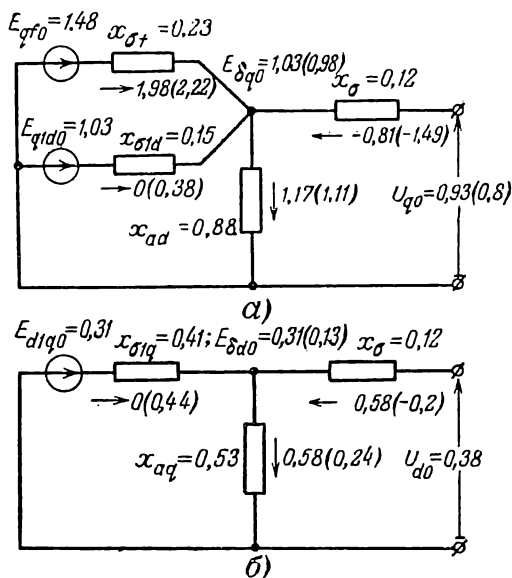


Рис. 6-12. Схемы замещения генера-
тора для примера 6-5.

а — в продольной оси; б — в поперечной
оси.

ними. Так, например, приращение потоко-
сцепления обмотки воз-
буждения по (6-11)

$$\Delta \Psi_{f\bar{z}} = 0,24 \cdot 1,11 + 0,38 \cdot 0,88 - 0,68 \cdot 0,88 \approx 0.$$

Приращение поперечного тока статора

$$\Delta \dot{I}_{q|0|} = -0,2 - 0,58 = -0,78.$$

Ток в поперечной демпферной обмотке

$$\dot{I}_{1q|0|} = \Delta \dot{I}_{q|0|} = 0,78 \frac{0,53}{0,53 + 0,41} = 0,44.$$

Начальные значения величин для рассматриваемого переход-
ного процесса указаны на рис. 6-12 в скобках.

Отметим, что объединение ветвей $x_{\sigma f}$, $x_{\sigma ld}$ и x_{ad} в схеме рис. 6-12, а приводит к E''_{q0} и x''_d , т. е.

$$E''_{q0} = \frac{\frac{1,48}{0,23} + \frac{1,03}{0,15}}{\frac{1}{0,23} + \frac{1}{0,15} + \frac{1}{0,88}} = 1,09$$

и

$$x''_d = 0,12 + \frac{1}{\frac{1}{0,23} + \frac{1}{0,15} + \frac{1}{0,88}} = 0,2.$$

Аналогичное объединение ветвей $x_{\sigma lq}$ и x_{aq} в схеме рис. 12,б дает также известные значения $E''_{d0} = 0,18$ и $x''_q = 0,35$.

Для иллюстрации найдем еще токи, которые были бы при отсутствии демпферных обмоток.

В этом случае

$$E'_{q0} = 0,93 + 0,81 \cdot 0,3 = 1,17 \quad \left(\text{или, иначе, } E'_{q0} = \frac{E_{qf0} x_{ad}}{x_{\sigma f} + x_{ad}} = \frac{1,48 \cdot 0,88}{0,23 + 0,88} = 1,17 \right).$$

Абсолютная величина начального переходного тока

$$I'_{d|0|} = I_{|0|} = \frac{E'_{q0}}{x'_d + x_{вн}} = \frac{1,17}{0,3 + 0,53} = 1,41.$$

Приращение тока в обмотке возбуждения

$$\Delta \overset{\circ}{I}_{f|0|} = -(I'_{d|0|} - I_{d0}) \frac{x_{ad}}{x_f} = -(-1,41 + 0,81) \cdot \frac{0,88}{1,11} = 0,48 \quad (\text{вместо } 0,24 \text{ при наличии продольной демпферной обмотки})$$

и полное значение его

$$\overset{\circ}{I}_{f|0|} = 1,98 + 0,48 = 2,46.$$

Соответственно этому синхронная э. д. с. $E_{q|0|}$ в момент нарушения режима будет

$$E_{q|0|} = \overset{\circ}{I}_{f|0|} x_{ad} = 2,46 \cdot 0,88 = 2,16 = I_{f|0|},$$

в то время как в предшествующем нормальном режиме она была

$$E_{q0} = 1,74.$$

6-6. ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. Как связаны начальные приращения токов статора и ротора при отсутствии и наличии демпферных обмоток в обеих осях ротора?
2. В силу каких причин поток в воздушном зазоре машины в начальный момент нарушения режима претерпевает изменение?
3. Что называется переходной э. д. с. и каким свойством она обладает?
4. Что называется переходной реактивностью машины и от каких факторов зависит ее величина?
5. Определить коэффициенты рассеяния для условий примера 6-1, если значение реактивности x_σ было бы в 2 раза больше (т. е. 0,18).
6. Что называется сверхпереходными э. д. с. и реактивностями?
7. Вывести выражение (6-17).
8. Определить, какую реактивность должна иметь продольная демпферная обмотка у генератора, параметры которого приведены в примере 6-1, чтобы его продольная сверхпереходная реактивность была $x''_d = 0,15$.
9. При какой реактивности продольной демпферной обмотки в примере 6-2 начальные наведенные токи в обмотках ротора по его продольной оси будут одинаковы? Какая при этом будет продольная сверхпереходная реактивность генератора?
10. Как практически оценивается сверхпереходная реактивность асинхронного двигателя?
11. Как сказывается неравенство продольной и поперечной сверхпереходных реактивностей генератора на величине начального сверхпереходного тока?
12. Провести решение примера 6-5 для случая, когда произойдет внезапное закорачивание индуктивного сопротивления внешней цепи.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

ОБЩИЕ УРАВНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

7-1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ И ДОПУЩЕНИЯ

Ранее уже отмечалось, что аналитическое исследование электромагнитного переходного процесса синхронной машины с учетом всех влияющих на него факторов представляет чрезвычайно сложную и трудоемкую задачу. Чтобы несколько упростить ее, приходится вводить ряд допущений, придавая машине некоторые свойства и качества, которыми она в действительности не обладает, т. е. рассматривать в известной мере «идеализиро-

ванную» машину. Несомненно, это вносит погрешности в оценку отдельных величин, однако, как показывает сопоставление получаемых величин с экспериментальными данными, обычно погрешности находятся в практически допустимых пределах. Следует особо подчеркнуть, что возможность использования тех или иных конкретных допущений зависит главным образом от характера проводимого исследования или решаемой задачи.

В § 2-1 были изложены основные допущения, принимаемые в практических расчетах электромагнитных переходных процессов и, в частности, в расчетах коротких замыканий. Здесь представляется полезным повторить некоторые из них и привести часть дополнительных допущений, на базе которых проводится весь дальнейший анализ рассматриваемых переходных процессов.

К таким допущениям нужно отнести следующие:

1. Магнитная система машины ненасыщена, в силу чего индуктивности машины не зависят от н. с. (или токов); величины самих индуктивностей при этом определяются для некоторого значения магнитной проницаемости стали магнитопровода.

2. Вместо действительных кривых распределения н. с. и индукции в воздушном зазоре по расточке статора принимают только их основные, первые гармонические, соответственно чему наведенные в статоре э. д. с. выражаются синусоидами основной частоты.

3. В магнитной системе машины отсутствуют какие-либо потери.

4. Конструктивное выполнение машины обеспечивает полную симметрию фазных обмоток статора. Равным образом ротор также симметричен относительно своих продольной и поперечной осей.

5. Предполагается, что как специально созданная продольная демпферная обмотка, так и все прочие естественные демпферные контуры, которые могут быть в продольной оси ротора, заменены одной эквивалентной продольной демпферной обмоткой; аналогично предполагается, что в поперечной оси ротора также имеется только одна эквивалентная демпферная обмотка¹.

¹ Для турбогенераторов при более точных исследованиях требуется учет нескольких демпферных контуров в каждой оси ротора.

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

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

Рассматривая машину с демпферными обмотками, получаем более общее решение, которое при отсутствии этих обмоток переходит в частный случай (для этого достаточно сопротивления данных обмоток положить бесконечно большими). Однако математические выкладки при учете демпферных обмоток значительно сложнее и за громоздкостью получающихся выражений труднее понять их физический смысл. Поэтому составление основных уравнений и преобразование их к виду, более удобному для решения, будем вести применительно к общему случаю, когда машина снабжена демпферными обмотками. Что же касается непосредственного решения этих уравнений применительно к поставленной задаче, то здесь целесообразно сначала рассматривать машину без демпферных обмоток, а затем дополнительно учитывать их влияние, что представляет уже развитие решенной задачи.

7-2. ИСХОДНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Принципиальная схема синхронной машины, ротор которой имеет явно выраженные полюсы и снабжен продольной и поперечной демпферными обмотками, представлена на рис. 7-1, где стрелками указаны принятые положительные направления токов и напряжений в обмотках статора и ротора. Соответственно этому, когда ток в обмотке статора или ротора положителен, создаваемый им магнитный поток также принимается положительным. На рис. 7-1 показаны положительные направления магнитных осей фазных обмоток статора (A, B, C) и обмоток ротора (d, q).

Дифференциальные уравнения равновесия э. д. с. и падений напряжений в каждой из обмоток¹ будут:

$$\left. \begin{aligned} u_{\eta} &= -\frac{d\Psi_{\eta}}{dt} - r i_{\eta} \quad (\eta = A, B, C); \\ u_f &= \frac{d\Psi_f}{dt} + r_f i_f; \\ 0 &= \frac{d\Psi_j}{dt} + r_j i_j \quad (j = 1d, 1q), \end{aligned} \right\} \quad (7-1)$$

где r , r_f и r_j — активные сопротивления соответственно контуров каждой фазы, цепи возбуждения и демпферных обмоток;

Ψ_{η} , Ψ_f и Ψ_j — результирующие потокосцепления соответствующих обмоток (включая их потокосцепления рассеяния).

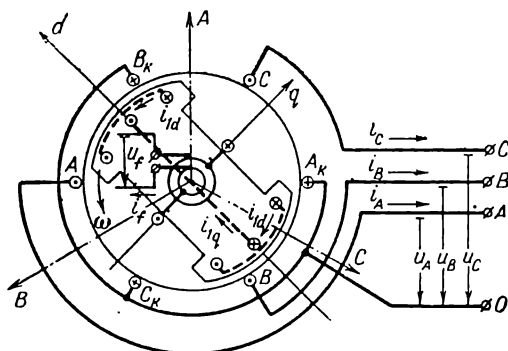


Рис. 7-1. Принципиальная схема явнополюсной синхронной машины.

Раскроем выражения для потокосцеплений, которые при принятых допущениях представляют собой линейные зависимости от тока данного контура и токов магнитносвязанных с ним других контуров. Коэффициентами пропорциональности при этом будут индуктивность L рассматриваемого контура и его взаимондуктивно-

¹ Для демпферных обмоток принята установившаяся в последнее время система обозначений; порядковый номер указывает на наличие нескольких таких обмоток в каждой оси ротора.

сти M с другими контурами. Естественно, поскольку поперечная демпферная обмотка расположена перпендикулярно по отношению к обмотке возбуждения и продольной демпферной обмотке, магнитная связь между ними отсутствует ($M_{f1q} = M_{1d1q} = 0$). Введя у L и M индексы соответствующих обмоток, можно написать:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_A &= L_A i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C + M_{Af} i_f + \\ &\quad + M_{A1d} i_{1d} + M_{A1q} i_{1q}; \\ \Psi_B &= M_{BA} i_A + L_B i_B + M_{BC} i_C + M_{Bf} i_f + \\ &\quad + M_{B1d} i_{1d} + M_{B1q} i_{1q}; \\ \Psi_C &= M_{CA} i_A + M_{CB} i_B + L_C i_C + M_{Cf} i_f + \\ &\quad + M_{C1d} i_{1d} + M_{C1q} i_{1q}; \\ \Psi_f &= M_{fA} i_A + M_{fB} i_B + M_{fC} i_C + L_f i_f + \\ &\quad + M_{f1d} i_{1d} + 0; \\ \Psi_{1d} &= M_{1dA} i_A + M_{1dB} i_B + M_{1dC} i_C + \\ &\quad + M_{1df} i_f + L_{1d} i_{1d} + 0; \\ \Psi_{1q} &= M_{1qA} i_A + M_{1qB} i_B + M_{1qC} i_C + 0 + \\ &\quad + 0 + L_{1q} i_{1q}. \end{aligned} \right\} \quad (7-2)$$

Число различных значений M в действительности в 2 раза меньше, так как по принципу взаимности $M_{AB} = M_{BA}$, $M_{Bf} = M_{fB}$, $M_{1dC} = M_{C1d}$ и т. д.

Если бы все L и M оставались неизменными, то система (7-1) состояла бы из линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами и решение ее не представляло бы принципиальных трудностей. Однако во вращающейся машине это не имеет места. Почти все индуктивности машины зависят от положения ротора относительно обмоток статора и, следовательно, являются функциями времени. Последнее обуславливает переменность коэффициентов в (7-1), что резко усложняет решение.

Обратимся к выяснению закономерностей изменения индуктивностей обмоток синхронной машины.

7-3. ИНДУКТИВНОСТИ ОБМОТОК СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

Благодаря полной симметрии статора индуктивность обмотки возбуждения L_f и индуктивности обеих демпферных обмоток L_{1d} и L_{1q} постоянны (при отсутствии насыщения). Также неизменна взаимная индуктивность

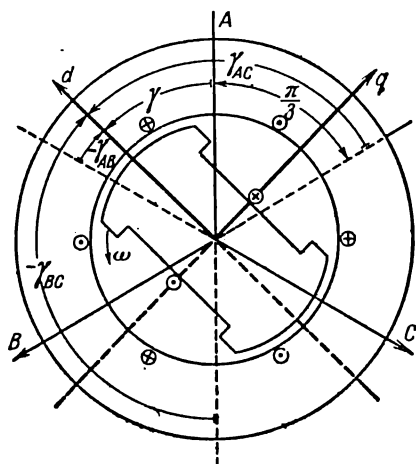


Рис. 7-2. К определению пространственного положения ротора.

M_{f1d} между обмоткой возбуждения и продольной демпферной обмоткой, поскольку эти обмотки неподвижны друг относительно друга. Взаимные индуктивности между поперечной демпферной обмоткой и обмотками, расположенными по продольной оси ротора, как уже отмечалось, вообще отсутствуют, т. е. $M_{f1d} = M_{1d1q} = 0$. Все остальные индуктивности машины в общем случае зависят от положения ротора, которое

условимся фиксировать

углом $\gamma = f(t)$ между магнитной осью фазы A и продольной осью d ротора (рис. 7-2).
Принятое допущение о синусоидальности наводимых в статоре э. д. с. холостого хода, что практически обеспечивается в современных синхронных машинах, предопределяет закон изменения взаимных индуктивностей между обмоткой возбуждения и каждой фазной обмоткой статора. Очевидно, он выражается синусоидальной функцией с периодом 2π (для двухполюсной машины это соответствует одному обороту ротора), максимум которой M_d наступает при совпадении магнитных осей этих обмоток. Следовательно, для взаимной индуктивности между обмоткой возбуждения и обмоткой, например, фазы A имеем:

$$M_{fA} = M_{Af} = M_d \cos \gamma. \quad (7-3)$$

В дальнейшем для упрощения (но с достаточной для практики точностью) будем считать, что при совпадении

магнитной оси фазной обмотки с осью d ротора приведенные к статору взаимные индуктивности между двумя любыми обмотками, расположенными по этой оси (т. е. фазная обмотка, обмотка возбуждения и продольная демпферная обмотка), одинаковы и составляют M_d . Поэтому для взаимной индуктивности между продольной демпферной обмоткой и обмоткой, в частности, фазы A по аналогии с (7-3) имеем:

$$M_{IdA} = M_{A1d} = M_d \cos \gamma. \quad (7-4)$$

Подобная закономерность может быть принята также для взаимной индуктивности между поперечной демпферной обмоткой и обмоткой фазы A :

$$M_{1qA} = M_{A1q} = M_q \cos \left(\gamma - \frac{\pi}{2} \right) = M_q \sin \gamma, \quad (7-5)$$

где M_q — значение этой индуктивности при совпадении магнитных осей рассматриваемых обмоток.

Для определения по (7-3) — (7-5) индуктивностей между контурами ротора и обмоткой фазы B или фазы C нужно в указанные выражения согласно рис. 7-2 вместо γ ввести соответственно $\gamma - \frac{2\pi}{3}$ или $\gamma + \frac{2\pi}{3}$.

Изменения индуктивностей фазных обмоток и взаимных индуктивностей между этими обмотками обусловлены вращением явнополюсного ротора, так как при этом непрерывно меняется сопротивление магнитным потокам, определяющим данные индуктивности. Они происходят гармонически с периодом π , т. е. в 2 раза меньшим, так как при повороте ротора на π повторяется предыдущий цикл изменения магнитного сопротивления; при этом, разумеется, безразлично, в какую сторону происходит вращение ротора.

Высказанные соображения позволяют утверждать, что при разложении действительных кривых изменения рассматриваемых индуктивностей в ряд Фурье последних, помимо постоянной составляющей — соответственно I_0 и m_0 , должен содержать только четные гармоники (коль скоро период функции равен π), изменяющиеся по закону косинуса (поскольку функция не зависит от знака угла γ).

В большинстве практических расчетов ограничиваются учетом только первых двух членов такого разложения. Тогда для индуктивности обмотки фазы A имеем:

$$L_A = l_0 + l_2 \cos 2\gamma \quad (7-6)$$

и для взаимной индуктивности между обмотками, например, фаз A и B ,

$$M_{AB} = m_0 + m_2 \cos 2\gamma_{AB} = m_0 + m_2 \cos 2\left(\gamma - \frac{\pi}{3}\right), \quad (7-7)$$

где l_2 и m_2 — амплитуды вторых гармоник соответствующих индуктивностей.

В (7-7) введен угол γ_{AB} (рис. 7-2) между отрицательным направлением магнитной оси обмотки фазы C (по отношению к которой обмотки фаз A и B расположены симметрично) и продольной осью ротора. Этот угол затем выражен через γ , т. е. $\gamma_{AB} = \gamma - \frac{\pi}{3}$.

Выражения (7-6) и (7-7) легко распространить на другие фазы, для чего согласно рис. 7-2 в качестве аргумента в них следует ввести:

для индуктивности обмотки фазы B — угол $2\left(\gamma + \frac{4\pi}{3}\right)$ или $2\gamma + \frac{2\pi}{3}$, обмотки фазы C — угол $2\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right)$ или $2\gamma - \frac{2\pi}{3}$, взаимной индуктивности между обмотками фаз A и C — угол $2\gamma_{AC} = 2\left(\gamma + \frac{\pi}{3}\right) = 2\gamma + \frac{2\pi}{3}$, а между обмотками фаз B и C — угол $2\gamma_{BC} = 2(\pi + \gamma)$ или 2γ .

Выразим l_0 , l_2 , m_0 и m_2 через индуктивности, которыми обычно характеризуется синхронная машина.

В установившемся режиме при протекании по статору токов нулевой последовательности

$$i_A = i_B = i_C = I_m \cos \omega t$$

потокосцепление обмотки фазы A будет¹ [с учетом (7-6) и (7-7)]

¹ Токи нулевой последовательности не создают магнитного поля, сцепляющегося с обмотками ротора.

$$\begin{aligned}\Psi_A &= L_A i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C = \left\{ l_0 + l_2 \cos 2\gamma + m_0 + \right. \\ &+ m_2 \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + m_0 + m_2 \cos \left(2\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \Big\} I_m \cos \omega t = \\ &= \{ (l_0 + 2m_0) + (l_2 - m_2) \cos 2\gamma \} I_m \cos \omega t, \quad (7-8)\end{aligned}$$

и, следовательно, индуктивность нулевой последовательности, определяемая как величина данного потокосцепления на единицу тока, составит

$$L_0 = \frac{\Psi_A}{I_m \cos \omega t} = l_0 + 2m_0 + (l_2 - m_2) \cos 2\gamma. \quad (7-9)$$

Отсюда видно, что L_0 изменяется с двойной частотой относительно своего среднего значения $(l_0 + 2m_0)$. Однако эти изменения настолько малы, что ими практически можно пренебречь; это равносильно допущению равенства

$$l_2 = m_2. \quad (7-10)$$

Тогда вместо (7-9) получим упрощенное выражение

$$L_0 = l_0 + 2m_0. \quad (7-11)$$

Равенство (7-10), вообще говоря, является следствием ранее принятого допущения, что индукция в воздушном зазоре распределена строго синусоидально. При таких условиях результирующий магнитный поток нулевой последовательности в расточке статора отсутствует, и поэтому вращение явнополюсного ротора не влияет на L_0 .

Аналогично найдем потокосцепление фазной обмотки при протекании по статору установившихся токов прямой последовательности. Вращающийся магнитный поток, создаваемый этими токами, как известно, зависит от его положения по отношению к вращающемуся синхронно с ним ротору. При совпадении с продольной осью ротора он достигает своего наибольшего значения и создаваемое им потокосцепление отвечает продольной синхронной индуктивности. Следовательно, при тсках

$$i_A = I_m \cos \gamma, \quad i_B = I_m \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right), \quad i_C = I_m \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right),$$

учитывая (7-6) и (7-7), имеем:

$$\begin{aligned} \Psi_A = & [l_0 + l_2 \cos 2\gamma] I_m \cos \gamma + \left[m_0 + m_2 \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) \right] \times \\ & \times I_m \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + \left[m_0 + m_2 \cos \left(2\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \times \\ & \times I_m \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) = \left[l_0 - m_0 + \frac{3}{2} l_2 \right] I_m \cos \gamma^* \end{aligned} \quad (7-12)$$

и

$$L_d = \frac{\Psi_A}{I_m \cos \gamma} = l_0 - m_0 + \frac{3}{2} l_2. \quad (7-13)$$

Соответственно при токах

$$i_A = I_m \sin \gamma, \quad i_B = I_m \sin \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right), \quad i_C = I_m \sin \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right)$$

для поперечной синхронной индуктивности получим:

$$L_q = \frac{\Psi_A}{I_m \sin \gamma} = l_0 - m_0 - \frac{3}{2} l_2. \quad (7-14)$$

Из совместного решения (7-11), (7-13) и (7-14) находим:

$$l_0 = \frac{1}{3} (L_d + L_q + L_0); \quad (7-15)$$

$$l_2 = m_2 = \frac{1}{3} (L_d - L_q); \quad (7-16)$$

$$m_0 = \frac{1}{3} \left(L_0 - \frac{L_d + L_q}{2} \right), \quad (7-17)$$

Из последнего выражения следует, что $m_0 < 0$, так как всегда $\frac{L_d + L_q}{2} > L_0$; физически это объясняется тем, что сдвиг между фазными обмотками превышает 90° .

* При преобразовании использованы тождества:

$$\begin{aligned} & \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) = -\cos \gamma; \\ & \cos 2\gamma \cos \gamma + \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + \\ & + \cos \left(2\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) = \frac{3}{2} \cos \gamma. \end{aligned}$$

Пример 7-1. Для синхронной машины известны ее относительные реактивности: $x_d=1,0$; $x_q=0,6$ и $x_0=0,05$. Построить кривые изменения L_A , M_{AB} и M_{AC} в зависимости от положения ротора, т. е. от угла γ .

По (7-15) — (7-17) находим:

$$l_0 = \frac{1}{3} (1,0 + 0,6 + 0,05) = 0,55.$$

$$l_2 = m_2 = \frac{1,0 - 0,6}{3} = 0,133.$$

$$m_0 = \frac{1}{3} \left[0,05 - \frac{1,0 + 0,6}{2} \right] = -0,25.$$

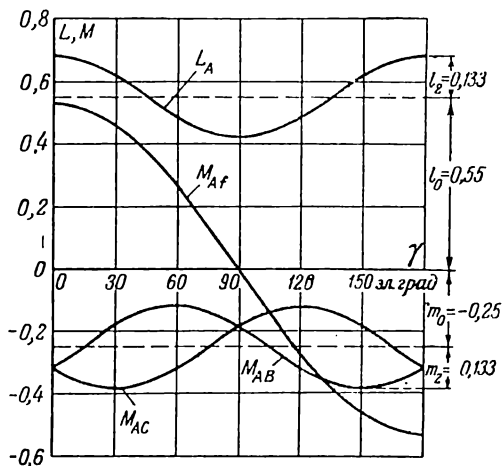


Рис. 7-3. К примеру 7-1. Кривые изменения индуктивностей машины в зависимости от положения ротора.

Искомые зависимости по (7-6) и (7-7) будут:

$$L_A = 0,55 + 0,133 \cos 2\gamma;$$

$$M_{AB} = -0,25 + 0,133 \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3} \right);$$

$$M_{AC} = -0,25 + 0,133 \cos \left(2\gamma + \frac{2\pi}{3} \right).$$

На рис. 7-3 они представлены кривыми. Для сопоставления там же приведена кривая $M_{Af} = f(\gamma)$, которая соответствует $\dot{M}_d^* = x_{ad}^* = 0,8$ (см. § 7-6).

7.4. ОБОБЩЕННЫЙ ВЕКТОР ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ

Симметрия трехфазной машины достигается простейшим размещением фазных обмоток статора строго под углом 120° (электрических) друг относительно друга. Если принять, что ось времени каждой фазы

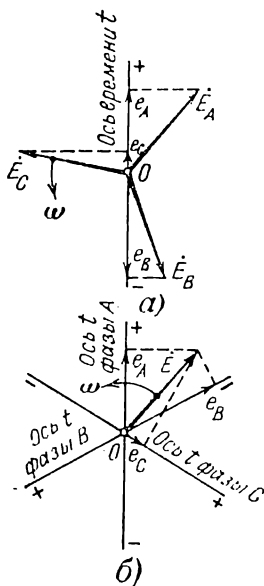


Рис. 7-4. Определение мгновенных значений фазных э. д. с. в трехфазной системе.

а — через векторы э. д. с. каждой фазы; б — через обобщенный вектор э. д. с.

совпадает с магнитной осью ее обмотки, то мгновенные значения любых синусоидально изменяющихся величин (токов, напряжений, потокосцеплений, э. д. с. и др.) в каждой фазе могут быть получены как проекции соответствующего вектора на эти оси времени. Следовательно, вместо обычного представления каких-либо величин трехфазной системы симметричной звездой векторов, проекции которых на единую ось времени дают мгновенные значения этих величин в фазах (рис. 7-4,а), те же мгновенные значения можно получить, проектируя единый вектор на три оси времени (рис. 7-4,б). Такой вектор называется обобщенным (или изображающим) вектором трехфазной системы. При его вращении в ту же сторону, что и системы трех векторов, чередование осей времени фаз нужно изменить на противоположное. При симметричном установившемся режиме конец обобщенного вектора описывает с постоянной скоростью окружность, а его величина равна амплитуде рассматриваемой величины.

Представление об обобщенном векторе можно в значительной степени расширить. Таким вектором, оказывается, можно характеризовать фазные переменные величины, изменяющиеся в общем случае по произвольному закону, лишь бы соблюдалось един-

ственное условие, а именно чтобы сумма мгновенных значений фазных величин равнялась нулю, т. е.

$$\dot{f}_A + \dot{f}_B + \dot{f}_C = 0, \quad (7-18)$$

где под $\dot{f}$ можно понимать любую физическую величину, изменение которой рассматривается в данном переходном процессе.

В самом деле, при заданных значениях $\dot{f}_A$, $\dot{f}_B$, $\dot{f}_C$ величина искомого обобщенного вектора $\dot{f}$ может быть определена, исходя из следующих очевидных равенств (рис. 7-5):

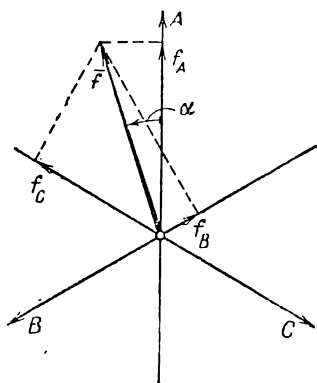


Рис. 7-5. Обобщенный вектор трехфазной системы.

$$\left. \begin{aligned} \dot{f}_A &= \dot{f} \cos \alpha; \\ \dot{f}_B &= \dot{f} \cos \left(\frac{2\pi}{3} - \alpha \right) = \dot{f} \cos \left(\alpha - \frac{2\pi}{3} \right); \\ \dot{f}_C &= \dot{f} \cos \left(\frac{4\pi}{3} - \alpha \right) = \dot{f} \cos \left(\alpha + \frac{2\pi}{3} \right); \end{aligned} \right\} \quad (7-19)$$

для этого достаточно возвести их в квадрат и просуммировать¹:

$$\dot{f}_A^2 + \dot{f}_B^2 + \dot{f}_C^2 = \frac{3}{2} \dot{f}^2,$$

откуда

$$\dot{f} = \sqrt{\frac{2}{3} (\dot{f}_A^2 + \dot{f}_B^2 + \dot{f}_C^2)}. \quad (7-20)$$

Исходное положение этого вектора относительно любой из фазных осей времени определяется соответствующим равенством из (7-19). Так, относительно оси времени фазы A имеем (рис. 7-5):

$$\alpha = \arccos \frac{\dot{f}_A}{\dot{f}}. \quad (7-21)$$

¹ Имея в виду, что $\cos^2 \alpha + \cos^2 \left(\alpha - \frac{2\pi}{3} \right) + \cos^2 \left(\alpha + \frac{2\pi}{3} \right) = \frac{3}{2}$.

Конец такого вектора описывает в общем случае сложную кривую, и при возникновении качаний синхронной машины скорость вращения его относительно полюса вращения переменна.

Возможность представления трехфазной системы векторов обобщенным вектором существенно упрощает выражение связи между статором и ротором, что в свою очередь позволяет в дифференциальных уравнениях переходного процесса освободиться от переменных коэффициентов. При этом заметим, что ограничение, выраженное равенством (7-18), как будет показано далее, не влияет на общность решения.

Пример 7-2. Мгновенные значения фазных величин удовлетворяют условию (7-18). Определить, при каком соотношении между мгновенными значениями этих величин представляющий их обобщенный вектор имеет минимальную величину.

Примем $f_B = n f_A$; тогда из (7-18) получим $f_C = -(1+n)f_A$.

Модуль обобщенного вектора согласно (7-20) будет

$$f = \sqrt{\frac{2}{3} [f_A^2 + n^2 f_A^2 + (1+n)^2 f_A^2]} = \frac{2}{\sqrt{3}} f_A \sqrt{1 + n + n^2}.$$

Из $df/dn = 0$, т. е.

$$2n + 1 = 0,$$

находим, что экстремум наступает при $n = -0,5$, причем, как легко

убедиться, при этом значении n вторая производная $\frac{d^2 f}{dn^2} > 0$, т. е.

функция имеет свое наименьшее значение.

Таким образом, модуль искомого обобщенного вектора составляет

$$f = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{1 - 0,5 + (-0,5)^2} f_A = f_A$$

и начальный угол этого вектора относительно оси времени фазы A , очевидно [что следует также из (7-21)], $\alpha = 0$, т. е. в рассматриваемый момент обобщенный вектор совпадает с осью времени фазы A .

7-5. ЗАМЕНА ПЕРЕМЕННЫХ

При решении сложных математических задач часто используют известный способ замены переменных некоторыми другими, обычно связанными с ними линейными зависимостями. При удачном выборе такой замены решение в новых переменных может быть выполнено проще. Равным образом и обратный переход к исходным

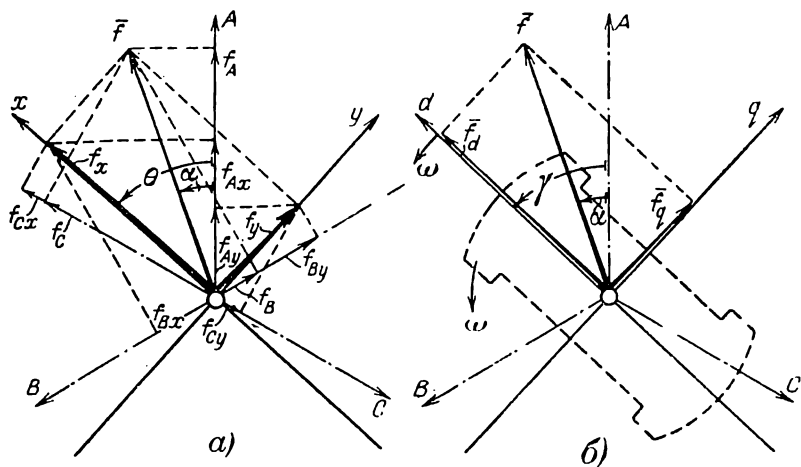


Рис. 7-6. Преобразование координат.

a — неподвижные в пространстве координаты x, y ; *b* — координаты d, q , жестко связанные с ротором.

переменным не встречает трудностей. Очевидно, по этому пути следует направить поиски в упрощении решения системы уравнений (7-1).

На рис. 7-5 обобщенный вектор $\vec{f}$ определен в трехосной системе координат (фазные оси времени). Тот же вектор можно выразить также в произвольной двухосной системе координат. В качестве последней удобнее всего выбрать декартовы ортогональные координаты, например x, y , как показано на рис. 7-6, *a*. Такое преобразование координат по существу математических операций соответствует замене переменных.

Новые переменные, т. е. проекции $\vec{f}$ на оси x, y , будут:

$$\left. \begin{aligned} f_x &= f \cos(\theta - \alpha); \\ f_y &= f \sin(\theta - \alpha) \end{aligned} \right\} \quad (7-22)$$

и их связь с фазными переменными определится равенствами:

$$\left. \begin{aligned} f_A &= f_x \cos \theta + f_y \sin \theta; \\ f_B &= f_x \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + f_y \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right); \\ f_C &= f_x \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + f_y \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right). \end{aligned} \right\} \quad (7-23)$$

Нетрудно убедиться, что определитель этой системы не равен нулю и вне зависимости от θ остается постоянным и равным $-\frac{3}{2}$, что указывает на однозначность выражения одних переменных через другие.

Решив (7-23) относительно новых переменных, найдем:

$$f_x = \frac{2}{3} \left[f_A \cos \theta + f_B \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + f_C \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right]; \quad (7-24)$$

$$f_y = \frac{2}{3} \left[f_A \sin \theta + f_B \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + f_C \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right]. \quad (7-25)$$

До сих пор предполагалось, что трехфазная система удовлетворяет условию (7-18). Естественно возникает вопрос: возможны ли подобные преобразования, когда это условие не соблюдено?

Если сумма фазных переменных не равна нулю, то целесообразно выразить ее через третье, новое, переменное f_0 следующим образом:

$$f_A + f_B + f_C = 3f_0,$$

откуда

$$f_0 = \frac{1}{3} (f_A + f_B + f_C). \quad (7-26)$$

Назовем f_0 нулевой составляющей, которая в известной мере тождественна составляющей нулевой последовательности метода симметричных составляющих (см. П-12), за исключением того, что она представляет мгновенное (а не векторное) значение, определяемое по мгновенным фазным значениям данной физической величины, изменение которой во времени может происходить по любому закону. Поскольку нулевая составляющая f_0 (так же как и составляющая нулевой последовательности) во всех фазах одинакова, естественно, она не влияет ни на обобщенный вектор $\vec{f}$, ни на его составляющие f_x и f_y независимо от того, как ориентированы оси x , y относительно фазных осей. В этом легко убедиться, подставив в (7-24) и (7-25) вместо f_A , f_B , f_C соответственно $(f_A - f_0)$, $(f_B - f_0)$, $(f_C - f_0)$, которые удовлетворяют условию (7-18).

Таким образом, три переменные в координатах A , B , C можно однозначно заменить другими тремя перемен-

ными в координатах $x, y, 0$. При этом в общем случае при переходе к фазным переменным необходимо в каждом из равенств (7-23) прибавить нулевую составляющую, т. е.

$$\left. \begin{aligned} f_A &= f_x \cos \theta + f_y \sin \theta + f_0; \\ f_B &= f_x \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + f_y \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + f_0; \\ f_C &= f_x \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) + f_y \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) + f_0. \end{aligned} \right\} \quad (7-23a)$$

Переход от трехосной к двухосной системе координат по существу соответствует тому, что трехфазная машина заменена эквивалентной двухфазной. Выбранное значение угла θ (рис. 7-6,а) определяет пространственное положение магнитных осей обеих обмоток такой машины. В частности, совместив оси обмоток x и A , получим систему координат (ее принято называть системой α, β), значения переменных которой находят по (7-24) и (7-25) при $\theta = 0$. При решении ряда задач такая система координат вносит известные упрощения.

Однако применение новой, но все же неподвижной системы координат хотя и сокращает число коэффициентов в исходных уравнениях вида (7-1), тем не менее главные трудности решения при этом все еще остаются, так как указанные уравнения по-прежнему содержат переменные коэффициенты. Значительного упрощения можно достичь, используя преобразование, впервые предложенное Блонделем для установившегося режима явнополюсной синхронной машины и впоследствии развитое Р. Х. Парком (R. H. Park) [Л. 50] и А. А. Горевым [Л. 19] для условий переходного процесса.

Сущность последнего состоит в том, что двухосная система координат предполагается жестко связанной с ротором, что равносильно замене неподвижной трехфазной обмотки статора двухфазной обмоткой, вращающейся вместе с ротором. При этом, чтобы ротор был расположен симметрично относительно обмоток этих двух фаз, их оси совмещают соответственно с продольной и поперечной осями ротора. Такую систему координат сокращенно называют и обозначают d, q (рис. 7-6,б). Здесь угол $\gamma = \omega t + \gamma_0$ является функцией времени и отражает вращение ротора с угловой скоростью ω , которая

может быть переменной. В общем случае, когда не соблюдается условие (7-18), к координатам d, q добавляется третья координата 0, которая определяет нулевую составляющую переменных величин.

Коль скоро фазные обмотки, расположенные в осях d и q , неподвижны относительно ротора, все индуктивности такой машины постоянны (при отсутствии насыщения магнитной цепи). Именно по этой причине выгодно перейти от переменных в координатах A, B, C к переменным в координатах $d, q, 0$; это позволяет уравнения (7-1) преобразовать в соответствующие уравнения с постоянными коэффициентами. При этом все соотношения между исходными и новыми переменными полностью определяются выражениями (7-23) — (7-26), в которых для рассматриваемого преобразования нужно только заменить индексы x и y соответственно на d и q , а угол θ — на $\gamma = \omega t + \gamma_0$.

Помимо указанных систем координат, при исследовании переходных процессов электрических машин используют также некоторые другие. Выбор их диктуется главным образом условиями поставленной задачи и особенностями участвующих машин. Иногда целесообразно переходить к прямоугольным координатам, вращающимся с постоянной синхронной скоростью ω_c . В других случаях вводят комплексную плоскость, соответственно чему обобщенные векторы выражают комплексными величинами, сводя, таким образом, задачу к решению уравнений с комплексными переменными.

Пример 7-3. В координатах A, B, C фазные переменные величины заданы:

а) синусоидальными функциями

$$f_A = f_m \cos(\omega t + \alpha_0); f_B = f_m \cos\left(\omega t + \alpha_0 - \frac{2\pi}{3}\right);$$

$$f_C = f_m \cos\left(\omega t + \alpha_0 + \frac{2\pi}{3}\right);$$

б) неизменными значениями

$$f_A = f; f_B = f_C = -0,5f.$$

Для обоих случаев определить закономерность изменения соответствующих им переменных величин в координатах d, q .

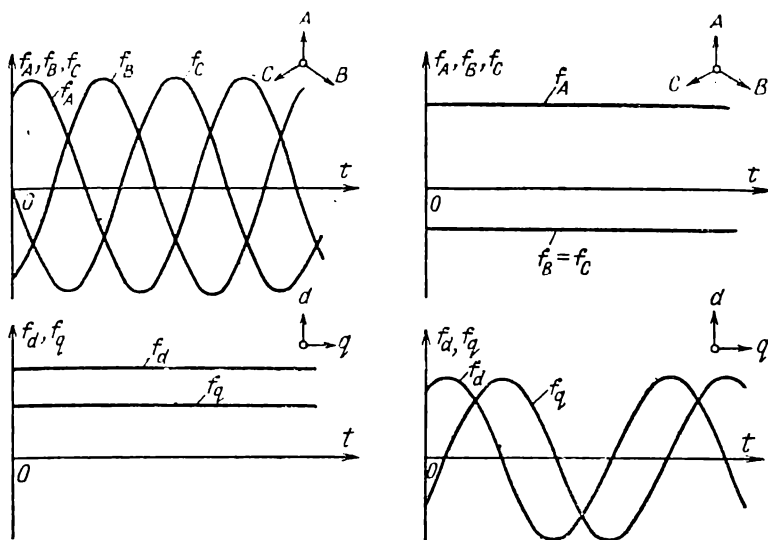


Рис. 7-7. К примеру 7-3. Преобразование синусоидально изменяющихся и постоянных величин в координатах A, B, C к эквивалентным величинам в координатах d, q .

Подставив в (7-24) и (7-25) заданные синусоидальные функции, после ряда тригонометрических преобразований найдем:

$$\begin{aligned} f_d &= f_m \cos(\gamma_0 - \alpha_0); \\ f_q &= f_m \sin(\gamma_0 - \alpha_0), \end{aligned}$$

т. е. синусоидально изменяющиеся в координатах A, B, C величины при переходе к вращающимся координатам d, q становятся соответствующими постоянными величинами.

Аналогично после подстановки в (7-24) и (7-25) заданных неизменных значений величин получим:

$$\begin{aligned} f_d &= f \cos \gamma = f \cos(\omega t + \gamma_0); \\ f_q &= f \sin \gamma = f \sin(\omega t + \gamma_0), \end{aligned}$$

т. е. неизменные в координатах A, B, C величины при переходе к координатам d, q превращаются в соответствующие синусоидально изменяющиеся величины.

Произведенное преобразование иллюстрируют кривые рис. 7-7.

7-6. ПОТОКОСЦЕПЛЕНИЯ И Э. Д. С., ИХ СОСТАВЛЯЮЩИЕ В КООРДИНАТАХ $d, q, 0$

Прежде чем перейти к преобразованию уравнений (7-1), остановимся на выяснении связи между обобщенными векторами потокосцеплений и э. д. с., а также

между их отдельными составляющими в координатах d, q , что весьма важно для понимания дальнейшего.

Пусть обобщенный вектор потокосцепления $\bar{\Psi}$ ориентирован относительно оси фазы A (рис. 8-8), т. е.

$$\bar{\Psi} = \Psi e^{j\alpha}. \quad (7-27)$$

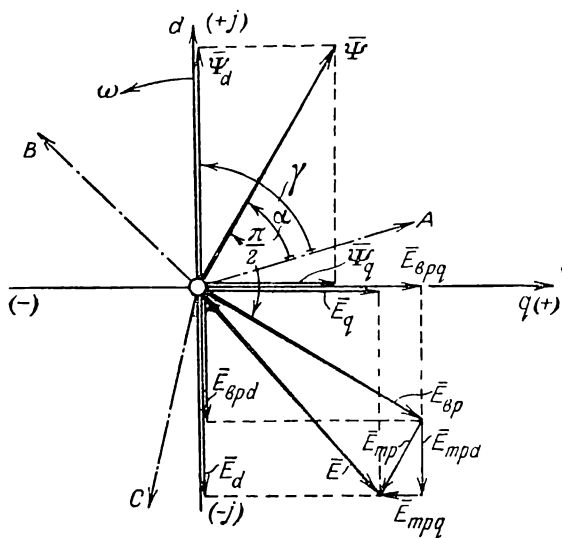


Рис. 7-8. Обобщенные векторы потокосцепления и э. д. с. и их разложение на составляющие в координатах d, q .

В отличие от установившегося режима при переходном процессе величина данного вектора и—в общем случае—скорость вращения его не постоянны, а являются функциями времени. Поэтому при определении обобщенного вектора э. д. с. нужно вектор $\bar{\Psi}$ дифференцировать по t как сложную функцию, т. е.

$$\begin{aligned} \bar{E} = - \frac{d\bar{\Psi}}{dt} = - \frac{d(\Psi e^{j\alpha})}{dt} = - \frac{d\Psi}{dt} e^{j\alpha} - \\ - j\Psi e^{j\alpha} \frac{d\alpha}{dt} = \bar{E}_{\text{ТР}} + \bar{E}_{\text{ВР}}. \end{aligned} \quad (7-28)$$

Таким образом, вектор э. д. с. $\bar{E}$ (рис. 7-8) состоит из:

$\bar{E}_{\text{тр}} = -\frac{d\Psi}{dt} e^{j\alpha}$ — вектора э. д. с. трансформации, вызываемой изменением величины Ψ , причем в зависимости от знака этого изменения данный вектор либо совпадает с вектором $\bar{\Psi}$, либо противоположен ему;

$\bar{E}_{\text{вр}} = -j\bar{\Psi} \frac{d\alpha}{dt}$ — вектора э. д. с. вращения, вызываемой вращением $\bar{\Psi}$, причем этот вектор отстает на 90° от вектора $\bar{\Psi}$.

В стационарном режиме существует только э. д. с. вращения $E_{\text{вр}}$ постоянной амплитуды; $E_{\text{тр}} = 0$.

Примем, что с системой координат d, q совмещена комплексная плоскость, причем положительные вещественные величины направлены по оси q , а положительные мнимые — по оси d . Тогда обобщенный вектор $\bar{\Psi}$, ранее ориентированный относительно оси фазы A , будет (рис. 7-8)

$$\bar{\Psi} = \bar{\Psi}_q + j\bar{\Psi}_d = (\Psi_q + j\Psi_d) e^{j\left(\gamma - \frac{\pi}{2}\right)}. \quad (7-29)$$

Соответственно для обобщенного вектора э. д. с. $\bar{E}$ получим:

$$\begin{aligned} \bar{E} &= -\frac{d\bar{\Psi}}{dt} = -\frac{d(\Psi_q + j\Psi_d) e^{j\left(\gamma - \frac{\pi}{2}\right)}}{dt} = \\ &= -\left(\frac{d\Psi_q}{dt} + j\frac{d\Psi_d}{dt}\right) e^{j\left(\gamma - \frac{\pi}{2}\right)} - j(\Psi_q + j\Psi_d) e^{j\left(\gamma - \frac{\pi}{2}\right)} \frac{d\gamma}{dt} = \\ &= \left(\Psi_d \frac{d\gamma}{dt} - \frac{d\Psi_q}{dt}\right) e^{j\left(\gamma - \frac{\pi}{2}\right)} - j\left(\Psi_q \frac{d\gamma}{dt} + \frac{d\Psi_d}{dt}\right) e^{j\left(\gamma - \frac{\pi}{2}\right)}. \end{aligned} \quad (7-30)$$

Как видно, продольная и поперечная составляющие этого вектора, т. е.

$$\bar{E}_d = -j\left(\Psi_q \frac{d\gamma}{dt} + \frac{d\Psi_d}{dt}\right) e^{j\left(\gamma - \frac{\pi}{2}\right)} = \bar{E}_{\text{вр}d} + \bar{E}_{\text{тр}d}; \quad (7-31)$$

$$\bar{E}_q = \left(\Psi_d \frac{d\gamma}{dt} - \frac{d\Psi_q}{dt}\right) e^{j\left(\gamma - \frac{\pi}{2}\right)} = \bar{E}_{\text{вр}q} + \bar{E}_{\text{тр}q} \quad (7-32)$$

в свою очередь состоят из соответствующих векторов э. д. с. вращения и трансформации (рис. 7-8).

Потокосцепление (а, следовательно, и э. д. с.) в общем случае может содержать, помимо продольной и поперечной составляющих, еще нулевую составляющую. Последняя определяется из общего равенства (7-26).

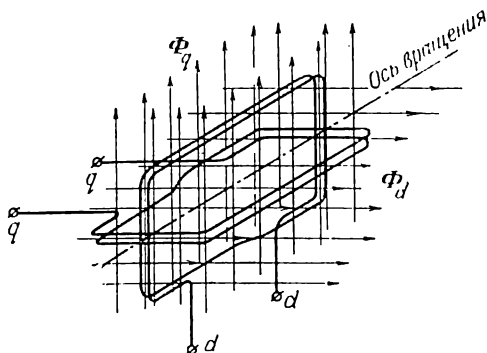


Рис. 7-9. Принципиальная модель преобразованной синхронной машины.

Выражения (7-31) и (7-32) можно иллюстрировать с помощью условной модели преобразованной машины (рис. 7-9). Здесь две обмотки d — d и q — q , сдвинутые друг относительно друга на 90° , жестко связаны между собой и имеют общую с ротором ось вращения. Каждая из этих обмоток пронизывается своим магнитным потоком, т. е. соответственно Φ_d и Φ_q .

При изменении величин этих потоков, что имеет место в переходном процессе, в обмотках наводятся э. д. с. трансформации, причем изменение Φ_d вызывает э. д. с. трансформации только в обмотке d — d , а изменение Φ_q — только в обмотке q — q , как это и отражено в (7-31) и (7-32).

Что касается э. д. с. вращения, то на приведенной модели ее можно показать лишь частично. Дело в том, что при синхронном вращении обмоток и магнитных потоков, очевидно, никаких э. д. с. вращения в этих обмотках нет. Только при перемещении обмоток относительно синхронно вращающихся магнитных потоков, что в общем случае также имеет место при переходном про-

цессе, когда положение продольной оси ротора характеризуется углом

$$\gamma = \omega_c t + \theta,$$

где $\theta = f(t)$ и, следовательно, $\frac{d\gamma}{dt} = \omega_c + \frac{d\theta}{dt}$, в обмотках наводятся дополнительные э. д. с. вращения (или э. д. с. скольжения): в обмотке $d - d \Psi_d \frac{d\theta}{dt}$ и в обмотке $q - q \Psi_q \frac{d\theta}{dt}$.

Полностью э. д. с. вращения можно отразить на модели, построенной по принципу коллекторной машины (см., например, [Л. 21]).

Во избежание ошибочных представлений необходимо подчеркнуть следующее весьма важное обстоятельство.

В предыдущих главах продольная и поперечная составляющие, например, тока статора являлись результатом разложения некоторого синусоидального тока на два синусоидальных тока с амплитудами I_{dm} и I_{qm} , сдвинутыми друг относительно друга на 90° (электрических); при этом i_d и i_q можно было рассматривать как соответствующие мгновенные значения этих токов.

Теперь, с переходом к системе координат d, q , жестко связанной с осями ротора, токи i_d и i_q имеют уже иной смысл. Они представляют собой соответствующие проекции обобщенного вектора тока статора $\vec{i}$, изменение которого в общем случае может иметь произвольный характер (лишь бы соблюдалось единственное ограничение, что сумма фазных величин в каждый момент времени равна нулю).

Найдем теперь выражения результирующих потокоцеплений обмоток статора в координатах $d, q, 0$. Для этого в (7-24) — (7-26) фазные потокоцепления должны быть представлены согласно (7-2), где в свою очередь фазные токи следует выразить в соответствии с (7-23а) и все индуктивности — согласно (7-3) — (7-7) с использованием (7-11), (7-13) и (7-14). Такой обычный путь математического преобразования принципиально несложен, но он требует большого числа алгебраических и тригонометрических преобразований, что делает его весьма трудоемким и утомительным.

Значительно проще ту же задачу можно решить, используя физическую сущность перехода к координатам $d, q, 0$. В самом деле, ранее уже отмечалось, что переход к осям d, q по существу означает замену действительных фазных обмоток статора двумя обмотками, вращающимися вместе с ротором и расположенными по осям его магнитной симметрии (d и q). Следовательно, по оси d расположены три неподвижные относительно друг друга обмотки (т. е. обмотка возбуждения, продольная демпферная обмотка и продольная обмотка статора), которые связаны между собой общей взаимной индуктивностью M_d , а по оси q — две неподвижные относительно друг друга обмотки (т. е. поперечная демпферная обмотка и поперечная обмотка статора), связанные взаимной индуктивностью M_q . Поскольку оси d и q взаимно перпендикулярны, никакой магнитной связи между обмотками, расположенными по разным осям, не имеется.

В соответствии с изложенным можно сразу написать выражения для результирующих потокосцеплений продольной и поперечной обмоток статора преобразованной машины:

$$\Psi_d = M_d i_f + M_d i_{1d} + L_d i_d; \quad (7-33)$$

$$\Psi_q = M_q i_{1q} + L_q i_q, \quad (7-34)$$

где L_d и L_q — продольная и поперечная синхронные индуктивности, определяемые по (7-13) и (7-14).

Результирующее потокосцепление статорной обмотки при протекании нулевой составляющей тока будет

$$\Psi_0 = L_0 i_0, \quad (7-35)$$

где L_0 — индуктивность нулевой последовательности, определяемая по (7-11).

Результирующее потокосцепление обмотки возбуждения в координатах d, q легко получить из соответствующего уравнения системы (7-2), заменив в нем фазные токи через их составляющие i_d, i_q, i_0 и введя в него принятые закономерности изменения взаимных индуктивностей между обмотками ротора и фазными обмотками статора, т. е.

$$\Psi_f = M_d \cos \gamma (i_d \cos \gamma + i_q \sin \gamma + i_0) +$$

$$\begin{aligned}
& + M_d \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \left[i_d \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + i_q \sin\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + i_0 \right] + \\
& + M_d \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \left[i_d \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) + \right. \\
& \left. + i_q \sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) + i_0 \right] + L_f i_f + M_d i_{1d},
\end{aligned}$$

откуда после преобразований найдем:

$$\Psi_f = L_f i_f + M_d i_{1d} + \frac{3}{2} M_d i_d. \quad (7-36)$$

Аналогично нетрудно получить выражения для результирующих потокоцеплений продольной и поперечной демпферных обмоток в координатах d и q , т. е.

$$\Psi_{1d} = L_{1d} i_{1d} + M_d i_f + \frac{3}{2} M_d i_d; \quad (7-37)$$

$$\Psi_{1q} = L_{1q} i_{1q} + \frac{3}{2} M_q i_q. \quad (7-38)$$

Следует обратить внимание на то, что в (7-33), (7-36) и (7-37), а также в (7-34) и (7-38) нарушен принцип взаимности между соответствующими магнитносвязанными обмотками ротора и обмотками статора. Так, например, при нахождении Ψ_f взаимная индуктивность между обмоткой возбуждения и продольной обмоткой статора, определяемая со стороны последней, в $3/2$ раза больше той же взаимной индуктивности, но определяемой со стороны обмотки возбуждения.

Это получилось в результате того, что в преобразованной машине продольная и поперечная обмотки статора предполагаются с тем же числом витков, что и у действительной обмотки фазы статора. С другой стороны, известно, что первая гармоническая результирующей н. с. трехфазной обмотки равна $3/2$ амплитуды н. с. обмотки одной фазы. Следовательно, коэффициент $3/2$ перед последним слагаемым в (7-36)—(7-38), который получился после произведенного преобразования к осям d , q , по существу учитывает влияние трехфазной обмотки статора на ротор. В выражениях (7-33) и (7-34) этот коэффициент отсутствует, так как в них рассматривается влияние обмоток ротора только на одну продоль-

ную или одну поперечную обмотку статора преобразованной машины.

Чтобы рассматриваемые взаимные индуктивности были обратимы (что необходимо для представления машины соответствующими схемами замещения), поступим следующим образом. Вместо действительных токов в обмотках ротора i_f , i_{1d} , i_{1q} введем их значения, уменьшенные в отношении $2/3$, т. е.

$$\overset{\circ}{i}_f = \frac{2}{3} i_f; \quad \overset{\circ}{i}_{1d} = \frac{2}{3} i_{1d}; \quad \overset{\circ}{i}_{1q} = \frac{2}{3} i_{1q},$$

а вместо индуктивностей L_f , L_{1d} , L_{1q} , M_d и M_q — значения их, в $3/2$ раза большие, т. е.

$$\overset{\circ}{L}_f = \frac{3}{2} L_f; \quad \overset{\circ}{L}_{1d} = \frac{3}{2} L_{1d}; \quad \overset{\circ}{L}_{1q} = \frac{3}{2} L_{1q}; \quad \overset{\circ}{M}_d = \frac{3}{2} M_d; \quad \overset{\circ}{M}_q = \frac{3}{2} M_q.$$

Сделав такую замену, получим:

$$\Psi_d = \overset{\circ}{M}_{d\overset{\circ}{f}} + \overset{\circ}{M}_{d\overset{\circ}{1d}} + L_d \overset{\circ}{i}_d; \quad (7-33a)$$

$$\Psi_q = \overset{\circ}{M}_{q\overset{\circ}{1q}} + L_q \overset{\circ}{i}_q; \quad (7-34a)$$

$$\Psi_f = \overset{\circ}{L}_f \overset{\circ}{i}_f + \overset{\circ}{M}_{d\overset{\circ}{1d}} + \overset{\circ}{M}_{d\overset{\circ}{f}}; \quad (7-36a)$$

$$\Psi_{1d} = \overset{\circ}{L}_{1d} \overset{\circ}{i}_{1d} + \overset{\circ}{M}_{d\overset{\circ}{f}} + \overset{\circ}{M}_{d\overset{\circ}{1d}}; \quad (7-37a)$$

$$\Psi_{1q} = \overset{\circ}{L}_{1q} \overset{\circ}{i}_{1q} + \overset{\circ}{M}_{q\overset{\circ}{1q}}; \quad (7-38a)$$

где принцип взаимности, как видно, уже соблюден.

Величины $\overset{\circ}{M}_d$ и $\overset{\circ}{M}_q$ по существу представляют собой результирующие взаимные индуктивности между тремя фазными обмотками статора и каждой обмоткой ротора соответственно по его продольной и поперечной осям.

Запись уравнений для электрических машин производят преимущественно в системе относительных единиц. При этом базисные единицы для контуров ротора можно выбрать так, чтобы обратимость взаимоиндукции между статором и ротором сохранялась. Удовлетворяющая этому условию система единиц называется взаимной системой относительных единиц. В § 5-2 уже дано понятие о приведенном к статору

токе возбуждения. Установленные для него выражения (5-8) и (5-10) обеспечивают обратимость взаимной индукции. Последнее видно хотя бы из того, что в (5-8) использован масштаб тока статора m_I , найденный по н. с. токов трех фаз (рис. 5-2). Следовательно, приведенный по (5-8) или (5-10) ток возбуждения уже учитывает уменьшение действительного тока в $3/2$ раза, как это требовалось выше. Соответственно увеличение базисного тока ротора в $3/2$ раза приводит к пропорциональному увеличению всех индуктивностей и сопротивлений цепей при базисных условиях

Аналогичными соображениями руководствуются при выборе базисного тока для приведения контуров обеих демпферных обмоток.

Таким образом, при взаимной системе относительных единиц базисные величины взаимных индуктивностей $\dot{M}_{d*}$ и $\dot{M}_{q*}$ при $\omega_c = 1$ численно равны соответствующим базисным индуктивным сопротивлениям реакции статора т. е.

$$\left. \begin{aligned} \dot{M}_{d*} &= x_{ad*}, \\ \dot{M}_{q*} &= x_{aq*}. \end{aligned} \right\} \quad (7-39)$$

Такое же численное равенство соблюдается между другими относительными индуктивностями и соответствующими им индуктивными сопротивлениями.

Подводя итог выполненным преобразованиям, еще раз отметим, что переход к координатам $d, q, 0$ позволил системе уравнений (7-2) с переменными коэффициентами заменить простыми уравнениями (7-33) — (7-38), главным преимуществом которых является постоянство участвующих в них коэффициентов. Следовательно, основная цель, поставленная перед преобразованием, достигнута.

7-7. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ УРАВНЕНИЙ РАВНОВЕСИЯ Э. Д. С. И ПАДЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЙ

Обратимся к преобразованию дифференциальных уравнений (7-1) путем замены фазных переменных их составляющими в координатах $d, q, 0$.

В соответствии с (7-23а) выразим ток, напряжение и потокосцепление фазы A через новые переменные:

$$i_A = i_d \cos \gamma + i_q \sin \gamma + i_0;$$

$$u_A = u_d \cos \gamma + u_q \sin \gamma + u_0;$$

$$\Psi_A = \Psi_d \cos \gamma + \Psi_q \sin \gamma + \Psi_0.$$

Подставив их в уравнения (7-1) для фазы A , получим:

$$\begin{aligned} u_d \cos \gamma + u_q \sin \gamma + u_0 = & -\frac{d}{dt} (\Psi_d \cos \gamma + \Psi_q \sin \gamma + \Psi_0) - \\ & - r (i_d \cos \gamma + i_q \sin \gamma + i_0) = -\frac{d\Psi_d}{dt} \cos \gamma + \\ & + \Psi_d \sin \gamma \frac{d\gamma}{dt} - \frac{d\Psi_q}{dt} \sin \gamma - \Psi_q \cos \gamma \frac{d\gamma}{dt} - \frac{d\Psi_0}{dt} - r i_d \cos \gamma - \\ & - r i_q \sin \gamma - r i_0. \end{aligned}$$

После перегруппировки слагаемых это выражение можно представить в виде

$$\begin{aligned} \left(u_d + \frac{d\Psi_d}{dt} + \Psi_q \frac{d\gamma}{dt} + r i_d \right) \cos \gamma + \left(u_q + \frac{d\Psi_q}{dt} - \Psi_d \frac{d\gamma}{dt} + \right. \\ \left. + r i_q \right) \sin \gamma + \left(u_0 + \frac{d\Psi_0}{dt} + r i_0 \right) = 0. \end{aligned} \quad (7-40)$$

Последнее уравнение должно быть удовлетворено при любом значении γ , что возможно только при условии, если каждое из выражений, заключенных в скобки, тождественно равно нулю. При этом уравнение (7-40) распадается на три уравнения:

$$u_d = -\frac{d\Psi_d}{dt} - \Psi_q \frac{d\gamma}{dt} - r i_d; \quad (7-41)$$

$$u_q = -\frac{d\Psi_q}{dt} + \Psi_d \frac{d\gamma}{dt} - r i_q; \quad (7-42)$$

$$u_0 = -\frac{d\Psi_0}{dt} - r i_0. \quad (7-43)$$

Легко убедиться, что результат преобразования не изменится, если вместо фазы A рассматривать иную фазу.

Уравнения для обмотки возбуждения и демпферных обмоток сохраняются теми же, что и в (7-1), поэтому они здесь повторно не приведены.

В результате проведенного преобразования три уравнения для фазных обмоток статора заменены тремя другими уравнениями, два из которых [т. е (7-41) и (7-42)] соответствуют условным вращающимся обмоткам d и q статора, а третье, оставаясь независимым от других уравнений, устанавливает связь между нулевыми составляющими величин. Потокосцепления, выраженные в координатах $d, q, 0$, как показано выше, являются линейными функциями; следовательно, основная трудность решения (7-1) после перехода к координатам $d, q, 0$ устранена.

Уравнения (7-41)—(7-43) выражают основу теории двух реакций синхронной машины при переходном процессе; их называют уравнениями Парка—Горева.

Все предыдущие выкладки справедливы при любом изменении угла γ , характеризующем движение ротора. Если это изменение выразить соответствующим уравнением, то вместе с ранее составленными уравнениями получим систему уравнений, которая отражает одновременное протекание электромагнитного и электромеханического переходных процессов с учетом их взаимного влияния. Решение и анализ такой системы уравнений являются одной из задач проблемы устойчивости параллельной работы электрических машин и целых станций электрической системы.

В соответствии с принятым допущением [см. п. 6 в § 7-1] в дальнейшем считаем

$$\gamma = \omega_c t + \gamma_0, \quad (7-44)$$

где ω_c — синхронная угловая скорость;

γ_0 — начальный угол.

Следовательно,

$$\frac{d\gamma}{dt} = \omega_c \quad (7-45)$$

и в относительных единицах при $\omega_6 = \omega_c$

$$\frac{d\gamma}{dt} = 1. \quad (7-45a)$$

a — при работе с опережающим током; *б* — при работе с отстающим током.

$$u_d = -\omega_c L_q i_q - r i_d = -x_q i_q - r i_d; \quad (7-46)$$

$$u_q = \omega_c \dot{M}_d i_f + \omega_c L_d i_d - r i_q = x_{ad} \dot{i}_f + x_d i_d - r i_q, \quad (7-47)$$

Последним уравнением отвечает знакомая векторная диаграмма явнополюсной синхронной машины, которая показана на рис. 7-10 для условий, когда машина работает с опережающим током (рис. 7-10,а) и отстающим током (рис. 7-10,б).

Следует отметить, что векторными диаграммами можно иллюстрировать не только установившийся режим синхронной машины, но также переходный процесс в ней, когда последний рассматривается без учета трансформаторных э. д. с.

7-8. УРАВНЕНИЯ В ОПЕРАТОРНОЙ ФОРМЕ

Решение дифференциальных уравнений переходных процессов будем вести с применением операторного исчисления или преобразования Лапласа, как это делалось в § 4-2.

Этим уравнениям и уравнениям для потокосцеплений придадим окончательный вид, в котором они используются в дальнейшем. Условимся, что в приводимой ниже записи уравнений соблюдено следующее:

а) Все величины выражены в относительных единицах, причем за базисные единицы статора приняты его номинальные величины (включая $\omega_b = \omega_c$).

б) Все цепи и физические величины ротора приведены к статору и выражены в относительных единицах; при этом базисные единицы для ротора выбраны таким образом, что при переходе к координатам d, q обеспечивается обратимость взаимоиנדукции между статором и ротором (см. § 7-6).

в) Начальные условия — нулевые, имея в виду, что по принципу наложения решение задачи можно свести к суммированию величин известного предшествующего режима с их изменениями или приращениями, которые возникают от рассматриваемого возмущающего фактора, как-то: снижения или повышения напряжения, броска тока и т. п.; соответственно этому в уравнения входят не полные величины, а только их приращения, предшествующие значения которых равны нулю¹.

Чтобы упростить запись, опустим индексы, указывающие выражение величин в относительных единицах и приведение величин ротора к статору.

При изложенных выше условиях уравнения электромагнитного переходного процесса синхронной машины

¹ Данное условие существенно упрощает запись операторных уравнений. Приращения обозначаем знаком Δ перед буквой, представляющей соответствующую величину.

после перехода от оригиналов (временных функций) к их изображениям будут:

$$\text{для статора} \quad \begin{cases} \Delta u_d(p) = -p\Delta\Psi_d(p) - \Delta\Psi_q(p) - r\Delta i_d(p); & (7-48) \\ \Delta u_q(p) = -p\Delta\Psi_q(p) + \Delta\Psi_d(p) - r\Delta i_q(p); & (7-49) \\ \Delta u_o(p) = -p\Delta\Psi_o(p) - r\Delta i_o(p); & (7-50) \end{cases}$$

$$\text{для обмотки возбуждения} \quad \Delta u_f(p) = p\Delta\Psi_f(p) + r_f\Delta i_f(p); \quad (7-51)$$

$$\text{для демпферных} \quad \begin{cases} 0 = p\Delta\Psi_{1d}(p) + r_{1d}\Delta i_{1d}(p); & (7-52) \end{cases}$$

$$\text{обмоток} \quad \begin{cases} 0 = p\Delta\Psi_{1q}(p) + r_{1q}\Delta i_{1q}(p); & (7-53) \end{cases}$$

где приращения потокосцеплений¹:

$$\text{статора} \quad \begin{cases} \Delta\Psi_d(p) = x_{ad}\Delta i_f(p) + x_{ad}\Delta i_{1d}(p) + x_d\Delta i_d(p); & (7-54) \\ \Delta\Psi_q(p) = x_{aq}\Delta i_{1q}(p) + x_q\Delta i_q(p), & (7-55) \\ \Delta\Psi_o(p) = x_o\Delta i_o(p); & (7-56) \end{cases}$$

$$\text{обмотки возбуждения} \quad \Delta\Psi_f(p) = x_f\Delta i_f(p) + x_{ad}\Delta i_{1d}(p) + x_{ad}\Delta i_d(p); \quad (7-57)$$

$$\text{демпферных} \quad \begin{cases} \Delta\Psi_{1d}(p) = x_{1d}\Delta i_{1d}(p) + x_{ad}\Delta i_f(p) + x_{ad}\Delta i_d(p); & (7-58) \\ \Delta\Psi_{1q}(p) = x_{1q}\Delta i_{1q}(p) + x_{aq}\Delta i_q(p). & (7-59) \end{cases}$$

Таким образом, при нулевых начальных условиях операторные уравнения сохраняют тот же вид, что и выведенные ранее дифференциальные уравнения; лишь знак производной d/dt заменен p , как это делается при обычной алгебраизации дифференциальных уравнений.

7-9. ОПЕРАТОРНЫЕ РЕАКТИВНОСТИ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

Выражения для потокосцеплений и уравнения (7-51) — (7-53) позволяют найти в операторной форме продольную и поперечную реактивности машины или просто ее операторные реактивности.

¹ С учетом возможности замены относительных индуктивностей соответствующими им относительными индуктивными сопротивлениями (см. § 2-3).

Чтобы облегчить выкладки, рассмотрим вначале машину без демпферных обмоток. Положив в (7-54), (7-55) и (7-57) $\Delta i_{1d}(p) = \Delta i_{1q}(p) = 0$, для нее получим:

$$\Delta \Psi_d(p) = x_{ad} \Delta i_f(p) + x_d \Delta i_d(p); \quad (7-60)$$

$$\Delta \Psi_q(p) = x_q \Delta i_q(p); \quad (7-61)$$

$$\Delta \Psi_f(p) = x_f \Delta i_f(p) + x_{ad} \Delta i_d(p). \quad (7-62)$$

Поскольку по оси q машины расположена только одна обмотка, как следует из (7-61),

$$x_q(p) = x_q. \quad (7-63)$$

Иная картина имеет место по оси d , где расположены две обмотки. Операторная реактивность, очевидно, здесь та же, что и у двухобмоточного трансформатора (см. § 4-2). Подставив (7-62) в (7-51), получим:

$$\begin{aligned} \Delta u_f(p) &= p \Delta \Psi_f(p) + r_f \Delta i_f(p) = \\ &= p [x_f \Delta i_f(p) + x_{ad} \Delta i_d(p)] + r_f \Delta i_f(p), \end{aligned}$$

откуда

$$\Delta i_f(p) = \frac{\Delta u_f(p) - p x_{ad} \Delta i_d(p)}{r_f + x_f p}. \quad (7-64)$$

Далее, подстановка (7-64) в (7-60) приводит к выражению

$$\begin{aligned} \Delta \Psi_d(p) &= \frac{x_{ad} \Delta u_f(p) - p x_{ad}^2 \Delta i_d(p)}{r_f + x_f p} + \\ &+ x_d \Delta i_d(p) = A(p) \Delta u_f(p) + x_d(p) \Delta i_d(p), \end{aligned} \quad (7-65)$$

где

$$A(p) = \frac{x_{ad}}{r_f + x_f p} = \frac{x_{ad}}{r_f (1 + T_{f0} p)} \quad (7-66)$$

и продольная операторная реактивность

$$\begin{aligned} x_d(p) &= x_d - \frac{x_{ad}^2 p}{r_f + x_f p} = \frac{x_d + \frac{x_f}{r_f} \left(x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_f} \right) p}{1 + \frac{x_f}{r_f} p} = \\ &= \frac{x_d + T_{f0} x_d' p}{1 + T_{f0} p}, \end{aligned} \quad (7-67)$$

или, иначе,

$$x_d(p) = x_d \frac{1 + T'_f p}{1 + T_{f0} p}; \quad (7-68)$$

здесь, в свою очередь:

постоянная времени обмотки возбуждения¹ при разомкнутом статоре

$$T_{f0} = \frac{x_f}{r_f}; \quad (7-69)$$

то же при закороченной обмотке статора

$$T'_f = T_{f0} \frac{x'_d}{x_d}; \quad (7-70)$$

продольная переходная реактивность машины [см. также (6-6)]

$$x'_d = x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_f}. \quad (7-71)$$

Если статор замкнут через внешнюю реактивность $x_{вн}$, то суммарная продольная операторная реактивность будет

$$\begin{aligned} x_{d\Sigma}(p) &= x_d(p) + x_{вн} = \frac{x_d + T_{f0} x'_d p + (1 + T_{f0} p) x_{вн}}{1 + T_{f0} p} = \\ &= \frac{x_{d\Sigma} + T_{f0} x'_{d\Sigma} p}{1 + T_{f0} p}, \end{aligned} \quad (7-72)$$

т. е. выражение имеет тот же вид, что и (7-67); под $x_{d\Sigma}$ и $x'_{d\Sigma}$ следует понимать суммы соответствующих реактивностей машины (x_d и x'_d) и внешней реактивности $x_{вн}$.

Равным образом для постоянной времени T'_f в общем случае при статоре, замкнутом через $x_{вн}$, имеем:

$$T'_f = T_{f0} \frac{x'_{d\Sigma}}{x_{d\Sigma}} = T_{f0} \frac{x'_d + x_{вн}}{x_d + x_{вн}}. \quad (7-73)$$

¹ Напомним, здесь x_f и r_f выражены в относительных единицах. Значения T в относительных и именованных единицах связаны соотношением (2-18), т. е. $T = \omega_c T$.

Остановимся на выражении (7-67). В соответствии с преобразованием Лапласа $t \doteq 1/p^2$. Следовательно, предельные значения $x_d(p)$ будут:

при $p = \infty$ ($t = 0$) $x_d(\infty) = x'_d$;

при $p = 0$ ($t = \infty$) $x_d(0) = x_d$.

Такие же пределы $x_d(p)$ соответственно будут:

при $T_{f0} = \infty$ (обмотка возбуждения без потерь) $x_d(p) = x'_d$;

при $T_{f0} = 0$ (обмотка возбуждения разомкнута) $x_d(p) = x_d$.

Отметим, что выражение для $x_d(p)$ можно также получить непосредственно из известной схемы замещения для x'_d (рис. 6-4), где только в ветвь обмотки возбуждения следует дополнительно ввести активное сопротивление r_f . В справедливости этого легко убедиться, для чего достаточно найти в операторной форме результирующее сопротивление схемы рис. 7-11.

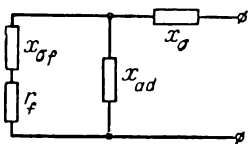


Рис. 7-11. Схема замещения, определяющая продольную операторную реактивность машины без демпферных обмоток.

Обратимся теперь к машине с демпферными обмотками. Для ее оси q , где имеются две обмотки, все выкладки совершенно аналогичны тем, которые сделаны применительно к оси d машины без демпферных обмоток. Помимо различия в индексах, здесь лишь будет отсутствовать слагаемое с приращением напряжения Δu , так как демпферные обмотки закорочены. Предоставляя читателю сделать полный вывод, приведем конечные результаты:

$$\Delta i_{1q}(p) = - \frac{x_{aq}p}{r_{1q} + x_{1q}p} \Delta i_q(p); \quad (7-74)$$

$$\Delta \Psi_q(p) = x_q(p) \Delta i_q(p), \quad (7-75)$$

где поперечная операторная реактивность

$$x_q(p) = \frac{x_q + T_{1q0}x''_qp}{1 + T_{1q0}p}, \quad (7-76)$$

или

$$x_q(p) = x_q \frac{1 + |T''_{1q}p|}{1 + T_{1q0}p}. \quad (7-77)$$

Здесь постоянная времени поперечной демпферной обмотки при разомкнутом статоре

$$T_{1q0} = \frac{x_{1q}}{r_{1q}}; \quad (7-78)$$

то же при закороченной обмотке статора

$$T''_{1q} = T_{1q0} \frac{x''_q}{x_q}, \quad (7-79)$$

где поперечная сверхпереходная реактивность машины [см. также (6-21)]

$$x''_q = x_q - \frac{x_{aq}^2}{x_{1q}}. \quad (7-80)$$

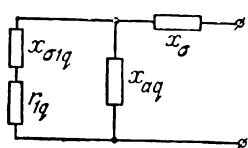


Рис. 7-12. Схема замещения, определяющая поперечную операторную реактивность машины с демпферными обмотками.

Когда цепь статора замкнута через внешнюю реактивность $x_{вн}$, ее надо прибавить к реактивностям x_q и x''_q .

Пределы $x_q(p)$ легко установить из (7-76):

при $p = \infty$ ($t = 0$) $x_q(\infty) = x''_q$;

при $p = 0$ ($t = \infty$) $x_q(0) = x_q$.

Аналогично предыдущему выражение для $x_q(p)$ можно получить из схемы замещения рис. 7-12.

Для оси d , где имеются уже три магнитносвязанные обмотки, выражение продольной операторной реактивности значительно сложнее, чем при отсутствии демпферных обмоток. Проведем основную часть вывода, опуская ряд промежуточных преобразований. После подстановки (7-57) и (7-58) в (7-51) и (7-52) и перегруппировки слагаемых получим систему уравнений:

$$\begin{aligned} (r_f + x_f p) \Delta i_f(p) + x_{ad} p \Delta i_{1d}(p) &= \\ &= \Delta u_f(p) - x_{ad} p \Delta i_d(p); \end{aligned}$$

$$x_{ad} p \Delta i_f(p) + (r_{1d} + x_{1d} p) \Delta i_{1d}(p) = -x_{ad} p \Delta i_d(p),$$

решение которой относительно $\Delta i_f(p)$ и $\Delta i_{1d}(p)$ дает:

$$\Delta i_f(p) = \frac{[\Delta u_f(p) - x_{ad} p \Delta i_d(p)](r_{1d} + x_{1d} p) + x_{ad}^2 p^2 \Delta i_d(p)}{D(p)}; \quad (7-81)$$

$$\Delta i_{1d}(p) = \frac{-x_{ad} p \Delta i_d(p)(r_f + x_f p) - [\Delta u_f(p) - x_{ad} p \Delta i_d(p)] x_{ad} p}{D(p)}, \quad (7-82)$$

где определитель

$$\begin{aligned} D(p) &= (r_f + x_f p)(r_{1d} + x_{1d} p) - x_{ad}^2 p^2 = \\ &= (x_f x_{1d} - x_{ad}^2) p^2 + (x_f r_{1d} + x_{1d} r_f) p + r_f r_{1d}. \end{aligned} \quad (7-83)$$

Дальнейшая подстановка (7-81) и (7-82) в (7-54) приводит к выражению

$$\Delta \Psi_d(p) = A(p) \Delta u_f(p) + x_d(p) \Delta i_d(p), \quad (7-84)$$

где

$$A(p) = \frac{(r_{1d} + x_{1d} p) x_{ad}}{D(p)} \quad (7-85)$$

и

$$\begin{aligned} x_d(p) &= x_d \frac{D'(p)}{D(p)} = \\ &= x_d \frac{(x'_f x'_{1d} - x_{ad}^{'2}) p^2 + (x'_f r_{1d} + x'_{1d} r_f) p + r_f r_{1d}}{(x_f x_{1d} - x_{ad}^2) p^2 + (x_f r_{1d} + x_{1d} r_f) p + r_f r_{1d}}. \end{aligned} \quad (7-86)$$

Числитель дроби в (7-86) идентичен знаменателю, с той лишь разницей, что в нем все индуктивности определены при короткозамкнутом статоре, т. е.

$$x'_{ad} = \frac{x_\sigma x_{ad}}{x_\sigma + x_{ad}} = \frac{x_\sigma x_{ad}}{x_d}; \quad (7-87)$$

$$x'_f = x_f - \frac{x_{ad}^2}{x_d} = x_{\sigma f} + x'_{ad}; \quad (7-88)$$

$$x'_{1d} = x_{1d} - \frac{x_{ad}^2}{x_d} = x_{\sigma 1d} + x'_{ad}, \quad (7-89)$$

где x_σ , $x_{\sigma f}$ и $x_{\sigma 1d}$ — индуктивности рассеяния соответствующих обмоток.

Если статор замкнут через внешнюю реактивность $x_{вн}$, то последняя должна быть прибавлена к x_s и x_d .

Разделив числитель и знаменатель (7-86) на $r_f r_{1d}$ и имея в виду, что

$$\frac{x_f}{r_f} = T_{f0}; \quad \frac{x_{1d}}{r_{1d}} = T_{1d0}; \quad \left(1 - \frac{x_{ad}^2}{x_f x_{1d}}\right) = \sigma_0$$

— соответственно постоянные времени обмотки возбуждения и продольной демпферной обмотки и общий коэффициент рассеяния при разомкнутом статоре

и

$$\frac{x'_f}{r_f} = T'_{fj}; \quad \frac{x'_{1d}}{r_{1d}} = T'_{1dj}; \quad \left(1 - \frac{x_{ad}'^2}{x'_f x'_{1d}}\right) = \sigma'$$

— те же величины при короткозамкнутом статоре, получим иную форму выражения:

$$x_d(p) = x_d \frac{\sigma' T'_{fj} T'_{1dj} p^2 + (T'_{fj} + T'_{1dj}) p + 1}{\sigma_0 T_{f0} T_{1d0} p^2 + (T_{f0} + T_{1d0}) p + 1}. \quad (7-90)$$

Наконец, если корни уравнений $D(p) = 0$ и $D'(p) = 0$ соответственно p_{10} , p_{20} и p_1 , p_2 , то, используя свойства корней квадратного уравнения (см. § 4-2), выражение (7-86) можно представить в виде

$$\begin{aligned} x_d(p) &= x_d \frac{p_{10} p_{20} (p - p_1)(p - p_2)}{p_1 p_{20} (p - p_{10})(p - p_{20})} = \\ &= x_d \frac{T'_{d0} T''_{d0} (p - p_1)(p - p_2)}{T'_{d0} T''_{d0} (p - p_{10})(p - p_{20})}, \end{aligned} \quad (7-91)$$

где, как известно,

$$T'_{d0} = -\frac{1}{p_{10}} \quad \text{и} \quad T'_{d0} = -\frac{1}{p_1}$$

— постоянные времени медленно изменяющихся свободных токов;

$$T''_{d0} = -\frac{1}{p_{20}} \quad \text{и} \quad T''_{d0} = -\frac{1}{p_2}$$

— то же быстро изменяющихся свободных токов.

Индекс 0 указывает, что статор разомкнут, отсутствие этого индекса — статор замкнут.

Из (7-86), (7-90) и (7-91) находим пределы для $x_d(p)$:
при $p = \infty$ ($t = 0$)

$$x_d(\infty) = x_d \frac{x'_f x'_{1d} - x_{ad}^2}{x_f x_{1d} - x_{ad}^2} = x_d \frac{\sigma' T'_f T'_{1d}}{\sigma_0 T_{f0} T_{1d0}} = x_d \frac{T'_{d0} T''_{d0}}{T'_{d0} T''_{d0}} = x''_d; \quad (7-92)$$

при $p = 0$ ($t = \infty$) $x_d(0) = x_d$.

Таким образом, помимо ранее установленного выражения (6-18), для определения x''_d могут быть использованы различные модификации его, представленные выражением (7-92).

Выражения для $x_d(p)$ можно также получить из схемы замещения рис. 7-13, найдя в операторной форме ее результирующее сопротивление на входе. При отсутствии продольной демпферной обмотки ($r_{1d} = \infty$) выражения (7-86), (7-90) и (7-91) переходят в (7-67) и (7-68) и схема рис. 7-13 — в схему рис. 7-11.

В тех случаях, когда $r_{1d} \gg r_f^*$, можно практически принять $r_f = 0$, и тогда из (7-86) после ряда преобразований получим:

$$x_d(p) = \frac{x'_d + T_{1d} x''_d p}{1 + T_{1d} p}, \quad (7-93)$$

где

$$T_{1d} = \frac{x_{1d} - \frac{x_{ad}^2}{x_f}}{r_{1d}} \quad (7-94)$$

— постоянная времени продольной демпферной обмотки при разомкнутом статоре, но замкнутой обмотке возбуждения, которая в данном случае рассматривается как сверхпроводник ($r_f = 0$).

Выражение (7-93) идентично (7-67), что вполне естественно, так как при принятом условии обмотка воз-

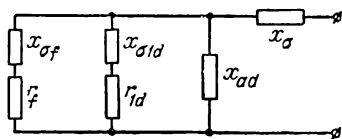


Рис. 7-13. Схема замещения, определяющая продольную операторную реактивность машины с демпферными обмотками.

* Это имеет место главным образом у явнополюсных синхронных машин.

буждения создает постоянный экранирующий эффект и тем снижает реактивность x_d до x'_d .

Пример 7-4. Определить операторные реактивности в продольной и поперечной осях турбогенератора, для которого известны относительные реактивности: $x_d = x_q = 1,35$; $x_\sigma = 0,10$; $x_f = 1,36$; $x_{1d} = 1,293$; $x_{1q} = 1,30$ и постоянные времена: $T_{f0} = 8,8$ сек; $T_{1d0} = 2,9$ сек и $T_{1q0} = 2,5$ сек.

Реактивность продольной и поперечной реакций статора

$$x_{ad} = x_{aq} = 1,35 - 0,10 = 1,25.$$

Эквивалентная реактивность тех же реакций при короткозамкнутом статоре

$$x'_{ad} = x'_{aq} = 1,25/0,10 = 0,0925.$$

Реактивность обмотки возбуждения при короткозамкнутом статоре

$$x'_f = (1,36 - 1,25) + 0,0925 = 0,2025;$$

то же продольной демпферной обмотки

$$x'_{1d} = (1,293 - 1,25) + 0,0925 = 0,1355;$$

то же поперечной демпферной обмотки

$$x'_{1q} = (1,30 - 1,25) + 0,0925 = 0,1425.$$

Постоянные времена при короткозамкнутом статоре будут: обмотки возбуждения

$$T'_f = 8,8 \frac{0,2025}{1,36} = 1,31 \text{ сек};$$

продольной демпферной обмотки

$$T'_{1d} = 2,9 \frac{0,1355}{1,293} = 0,30 \text{ сек};$$

поперечной демпферной обмотки

$$T'_{1q} = 2,5 \frac{0,1425}{1,30} = 0,28 \text{ сек}.$$

Коэффициенты суммарного рассеяния обмотки возбуждения и продольной демпферной обмотки: при разомкнутом статоре

$$\sigma_0 = 1 - \frac{1,25^2}{1,36 \cdot 1,293} = 0,11$$

и при короткозамкнутом статоре

$$\sigma' = 1 - \frac{0,0925^2}{0,2025 \cdot 0,1355} = 0,688.$$

Искомые операторные реактивности будут:
в поперечной оси по (7-77)

$$x_q(p) = 1,35 \frac{1 + 0,28p}{1 + 2,5p} = \frac{1,35 + 0,38p}{1 + 2,5p};$$

в продольной оси по (7-90)

$$\begin{aligned} x_d(p) &= 1,35 \frac{0,688 \cdot 0,3 \cdot 1,31 p^2 + (0,3 + 1,31) p + 1}{0,11 \cdot 2,9 \cdot 8,8 p^2 + (2,9 + 8,8) p + 1} = \\ &= \frac{0,365 p^2 + 2,18 p + 1,35}{2,8 p^2 + 11,7 p + 1}. \end{aligned}$$

Из этих выражений легко найти при $p = \infty$:

$$x''_q = 0,15 \text{ и } x''_d = 0,13.$$

7-10. ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. В чем принципиальная трудность исследования электромагнитного переходного процесса синхронной машины?

2. Какие облегчения вносит в исследование электромагнитного переходного процесса синхронной машины предположение, что ее ротор совершенно симметричен в любой оси?

3. Как изменятся индуктивность L_A и взаимные индуктивности M_{AB} и M_{AC} в примере 7-1, если принять, что $x_q = x_d = 1,0$?

4. Что называется обобщенным вектором трехфазной системы?

5. Мгновенные значения фазных величин составляют: $f_A = -p$; $f_B = 1,5p$ и $f_C = -0,5p$. Определить величину обобщенного вектора и его положение относительно оси фазы A .

6. С какой целью делают замену переменных?

7. Мгновенные значения фазных величин заданы следующими функциями: $f_A = pe^{-t/T}$; $f_B = 0,5pe^{-t/T}$ и $f_C = -0,5e^{-t/T}$. Найти соответствующие им новые переменные в координатах d , q , 0 .

8. Из каких составляющих складывается обобщенный вектор э. д. с. при переходном процессе и чем обусловлена каждая из этих составляющих?

9. В результате чего взаимоиндукция между статором и ротором в системе уравнений (7-33) — (7-38) оказалась необратимой и как можно устранить это несоответствие?

10. Откуда следует, что получение уравнений (7-41) — (7-43) не зависит от того, какую фазу статора рассматривать?

11. Почему $x_d(p)$ и $x_q(p)$ не являются в строгом смысле реактивностями?

12. Для гидрогенератора известны следующие параметры: $x_d = 1,0$; $x_q = 0,6$; $x_\sigma = 0,15$; $x'_d = 0,3$; $x''_d = 0,21$; $x'_q = 0,31$; $T_{j0} = 5,0 \text{ сек}$; $T_{1d0} = 2 \text{ сек}$; $T_{1q0} = 1,4 \text{ сек}$.

Написать выражения для продольной и поперечной операторных реактивностей.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

ФОРСИРОВКА ВОЗБУЖДЕНИЯ И РАЗВОЗБУЖДЕНИЕ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

8-1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

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

Исследование переходного процесса при форсировке возбуждения представляет актуальную задачу. Решение ее в общем виде с учетом всех влияющих факторов чрезвычайно сложно и практически осуществимо лишь с применением современной электронной вычислительной техники. Здесь следует иметь в виду, что синхронная машина, для которой исследуется процесс форсировки возбуждения, обычно работает совместно с другими машинами, т. е. между ними имеет место взаимная связь.

Существенное влияние на форсировку возбуждения оказывает насыщение магнитных систем как синхронной машины, так и ее системы возбуждения. Это обстоятельство делает поставленную задачу уже нелинейной со всеми вытекающими отсюда затруднениями.

Несмотря на высказанные замечания, все же представляется целесообразным, даже на базе ранее принятых допущений (см. § 2-1), проанализировать процесс форсировки возбуждения. Полученный материал позволяет понять физическую сущность происходящих при этом явлений, произвести приближенное сопоставление и относительную оценку разных систем возбуждений, но, правда, лишь с позиций форсировки возбуждения. Сама проблема выбора той или иной системы возбуждения

требует всестороннего подхода с различных точек зрения при одновременном учете ряда требований общего и специального характера. Решение такой проблемы выходит за рамки настоящей книги.

Исследование переходного процесса при развозбуждении или гашении магнитного поля синхронной машины относительно проще, хотя бы уже по той причине, что этот процесс происходит, как правило, после отключения машины от сети. Здесь также заметно сказывается насыщение магнитной системы машины, но даже при пренебрежении им можно получить достаточное представление об эффективности того или иного способа гашения поля.

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

8-2. ВКЛЮЧЕНИЕ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ НА ПОСТОЯННОЕ НАПРЯЖЕНИЕ

Рассмотрим один из наиболее простых случаев электромагнитного переходного процесса. Пусть генератор, вращающийся с постоянной синхронной скоростью, отключен от сети и не имеет возбуждения. Найдём закономерность изменения напряжения такого генератора при включении его обмотки возбуждения на постоянное напряжение (например, на аккумуляторную батарею).

Для упрощения вначале примем, что ротор генератора не имеет демпферных обмоток.

Поскольку в данном случае для всех величин начальные условия нулевые, их приращения одновременно являются полными величинами ($\Delta i_f = i_f$ и т. д.).

В соответствии с исходными условиями, которые можно записать как

$$i_d = i_q = i_{1d} = i_{1q} = 0$$

и

$$u_f = \text{const},$$

основные уравнения (7-48), (7-49) и (7-51) с учетом (7-54), (7-55) и (7-57) приобретают весьма простой вид:

$$u_d(p) = -p x_{ad} i_f(p); \quad (8-1)$$

$$u_q(p) = x_{ad} i_f(p); \quad (8-2)$$

$$u_f(p) = \frac{u_f}{p} = p x_{f1} i_f(p) + r_f i_f(p). \quad (8-3)$$

Здесь ток i_f определяется только параметрами обмотки возбуждения и закон изменения его легко найти из (8-3):

$$i_f(p) \doteq i_{ft} = i_f \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{f0}}} \right), \quad (8-4)$$

где $i_f = \frac{u_f}{r_f}$ — установившийся ток возбуждения, приведенный к статору.

Продольная и поперечная составляющие напряжения согласно (8-1) и (8-2) будут:

$$u_{dt} = \frac{1}{T_{f0}} x_{ad} i_f e^{-\frac{t}{T_{f0}}} = \frac{E_q}{T_{f0}} e^{-\frac{t}{T_{f0}}}; \quad (8-5)$$

$$u_{qt} = x_{ad} i_f \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{f0}}} \right) = E_q \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{f0}}} \right), \quad (8-6)$$

где $E_q = x_{ad} i_f$ — установившаяся синхронная э. д. с. по оси q .

Для искомого напряжения (допустим, фазы A) по (7-23) находим:

$$\begin{aligned} u_A = & \frac{E_q}{T_{f0}} e^{-\frac{t}{T_{f0}}} \cos(\omega t + \gamma_0) + \\ & + E_q \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{f0}}} \right) \sin(\omega t + \gamma_0), \end{aligned} \quad (8-7)$$

где первое слагаемое (от u_d) соответствует трансформаторной э. д. с., а второе (от u_q) — э. д. с. вращения. При обычных величинах $T_{f0} = 5 \div 10$ сек и частоте $f = 50$ гц $T_{f0} = 1500 \div 3000$ рад. Следовательно, в рассматриваемом переходном процессе благодаря медленному изменению тока i_{ft} трансформаторная э. д. с. очень

мала (это позволяет пренебречь ею). Поэтому искомое напряжение практически определяется лишь вторым слагаемым в (8-7).

На рис. 8-1 приведены кривые изменения составляющих напряжения в функции времени, причем масштабы по осям ординат на рис. 8-1, а и б одинаковы, а продольные составляющие увеличены в T_{f0} раз.

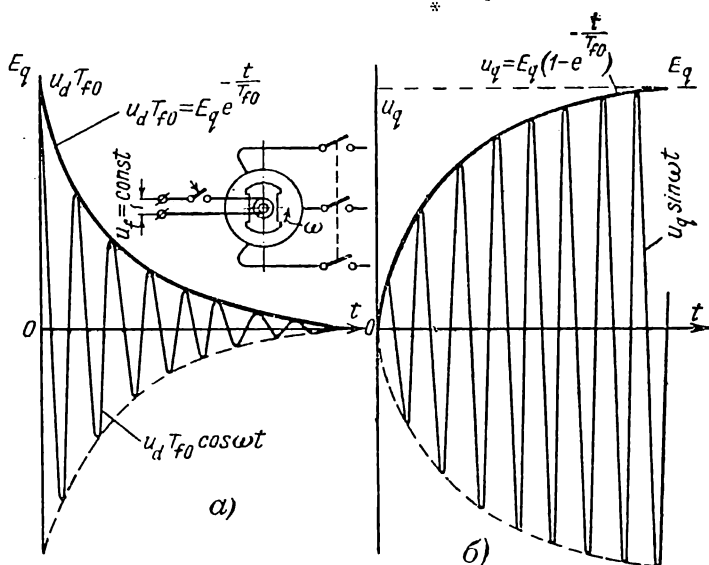


Рис. 8-1. Изменение во времени напряжений u_d и u_q при включении обмотки возбуждения на постоянное напряжение.

Допустим теперь, что в продольной оси ротора имеется демпферная обмотка. В соответствии с принятым ранее допущением о том, что обмотки в продольной оси связаны взаимной индуктивностью x_{ad} , при заданных исходных условиях основные уравнения будут:

$$u_d(p) = -p(x_{ad}i_f(p) + x_{ad}i_{1d}(p)); \quad (8-8)$$

$$u_q(p) = x_{ad}i_f(p) + x_{ad}i_{1d}(p); \quad (8-9)$$

$$u_f(p) = \frac{u_f}{p} = p(x_{ad}i_{1d}(p) + x_{fd}i_f(p)) + r_f i_f(p); \quad (8-10)$$

$$0 = p(x_{1d}i_{1d}(p) + x_{ad}i_f(p)) + r_{1d}i_{1d}(p). \quad (8-11)$$

Из последнего находим [аналогично (4-6)]:

$$i_{1d}(p) = - \frac{p x_{ad}}{r_{1d} + p x_{1d}} i_f(p). \quad (8-12)$$

Подставив (8-12) в (8-10) и произведя простые преобразования, получим для тока $i_f(p)$ следующее выражение:

$$i_f(p) = \frac{u_f(p)}{z_f(p)} = \frac{u_f}{p \left[r_f + \left(x_f - \frac{x_{ad}^2 p}{r_{1d} + x_{1d} p} \right) p \right]}. \quad (8-13)$$

Как и нужно было ожидать, выражение (8-13) тождественно (4-6) с учетом (4-7) при соответствующей замене в них индексов. Следовательно, выражения (4-13) и (4-15), или в несколько упрощенном виде (4-33) и (4-34), полученные для токов в магнитносвязанных контурах, определяют также временные изменения токов в обмотке возбуждения и продольной демпферной обмотке при рассматриваемом переходном процессе. При этом нужно считать контур 1 обмоткой возбуждения, а контур 2 — продольной демпферной обмоткой. Характер изменения отдельных слагающих этих токов и их полных значений был показан на рис. 4-2,а. Для полноты картины на рис. 8-2 приведены еще раз кривые изменения этих токов. Там же для сравнения показана кривая изменения тока в обмотке возбуждения при отсутствии демпферной обмотки.

Согласно (8-8) и (8-9) составляющие напряжения генератора являются функциями суммы токов $i_f + i_{1d}$, которая, как отмечалось в § 4-3, практически изменяется с постоянной времени $T'_{d0} \approx T_{f0} + T_{1d0}$, т. е. большей, чем при отсутствии демпферной обмотки. Отсюда следует, что при наличии демпферной обмотки процесс нарастания напряжения протекает медленнее (рис. 8-2) и, следовательно, трансформаторная э. д. с. оказывается еще меньше. Пренебрегая последней, для получения кривой изменения напряжения генератора достаточно исходить из упрощенного уравнения

$$u_A = E_q \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{f0} + T_{1d0}}} \right) \sin(\omega t + \gamma_0), \quad (8-14)$$

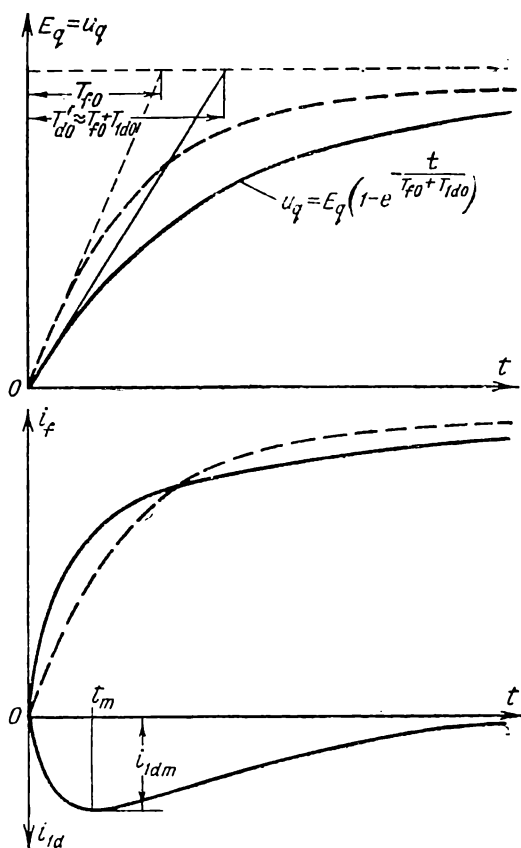


Рис. 8-2. Изменение во времени напряжения u_q и токов в обмотке возбуждения и демпферной обмотке при включении обмотки возбуждения на постоянное напряжение. Пунктирными линиями показаны кривые изменения u_q и i_f машины без демпферной обмотки.

где $T_{1\alpha 0}$ — постоянная времени продольной демпферной обмотки при разомкнутых прочих обмотках, расположенных в той же оси.

Кривая, соответствующая (8-14), аналогична представленной на рис. 8-1,б, с той лишь разницей, что нарастание ее амплитуд происходит с большей постоянной времени (рис. 8-2).

8-3. ФОРСИРОВКА ВОЗБУЖДЕНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОМАШИННОМ ВОЗБУДИТЕЛЕ

Процесс форсировки возбуждения синхронной машины при электромашинном возбудителе рассмотрим для условий, когда используются возбудитель с самовозбуждением (короче—самовозбуждение) и возбудитель с независимым возбуждением (короче—независимое возбуждение). При этом в обоих случаях предполагается использование наиболее распространенного и простого способа быстрого действующего повышения возбуждения — так называемой релейной форсировки. Сущность ее состоит в закорачивании реостата в цепи возбуждения возбудителя при снижении напряжения синхронной машины за некоторый допустимый уровень (обычно 85—90% номинального напряжения), в результате чего наступает подъем возбуждения до предельной величины (потолка). В дальнейшем предполагается, что цепь статора синхронной машины замкнута и в некоторый момент времени происходит форсировка возбуждения до его предела (потолка).

а) Самовозбуждение

Схема форсировки возбуждения при возбудителе с самовозбуждением показана на рис. 8-3,а. При снижении напряжения за установленный уровень реле напряжения H замыкает цепь контактора K , который в свою очередь закорачивает реостат цепи возбуждения (шунтовой реостат) возбудителя.

При пренебрежении достаточно малым сопротивлением якоря характеристику холостого хода возбудителя можно считать также его нагрузочной характеристикой. Рабочее состояние возбудителя с самовозбуждением определяется положением точки пересечения характеристики холостого хода с прямой, отвечающей уравнению

$u_B = i_B(r_B + r_P)$ (рис. 8-3,б), где r_B и r_P — омические сопротивления соответственно обмотки возбуждения возбудителя¹ и шунтового реостата. При замкнутом реостате новое установившееся состояние возбудителя определяется пересечением той же характеристики с более пологой прямой $u_B = i_B r_B$, от положения которой (при заданной кривой намагничивания) зависит предельное напряжение возбудителя $u_{B,пр}$, как это видно из рис. 8-3,б.

Закономерность во времени, выражающая переход возбудителя от одного состояния к другому, в частности процесс нарастания напряжения возбудителя, может быть получена из характеристики холостого хода и уравнения равновесия э. д. с. в цепи обмотки возбуждения возбудителя при переходном процессе²:

$$u_B = r_B i_B + \frac{d\Psi_B}{dt}, \quad (8-15)$$

где Ψ_B — результирующее потокоцепление данной обмотки, которое при постоянстве индуктивностей пропорционально i_B .

Последнее слагаемое в (8-15) представляет напряжение, уравновешивающее э. д. с. самоиндукции обмотки возбуждения возбудителя. Как видно из рис. 8-3,б, графически оно выражается для каждого значения тока i_B разностью ординат характеристики холостого хода $u_B = f(i_B)$ и прямой $u_B = i_B r_B$, т. е.

$$\frac{d\Psi_B}{dt} = \Delta u_B = u_B - r_B i_B.$$

Чтобы найти искомую закономерность нарастания напряжения возбудителя непосредственным интегрированием, нужно дополнительно к (8-15) аппроксимировать характеристику холостого хода или, иными словами, выразить ее приближенным уравнением. На практике обычно используют графическое интегрирование, методика которого предложена Р. Рюденбергом [Л. 17].

¹ В общем случае можно считать, что r_B включает в себя некоторое постоянное сопротивление r в цепи этой обмотки.

² При более строгом подходе необходимо учитывать ряд дополнительных факторов, как-то: демпферные контуры возбудителя, реакцию якоря и др., влияние которых может сказываться заметно [Л. 61, 62, 63].

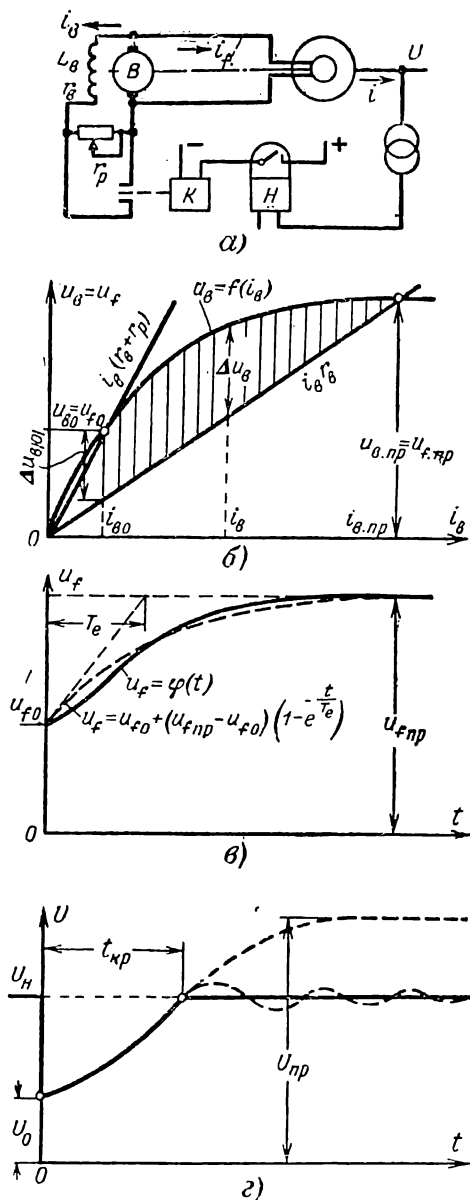


Рис. 8-3. Форсировка возбуждения от возбудителя с самовозбуждением.

а — принципиальная схема; б — основные характеристики; в — кривая нарастания напряжения u_f во времени; г — кривая нарастания напряжения статора во времени.

Не останавливаясь на рассмотрении этого способа решения, отметим, что характер искомой закономерности достаточно сложен и в значительной степени зависит от магнитных свойств возбудителя. В первом приближении эту сложную закономерность заменяют экспоненциальной функцией с некоторой постоянной времени T_e (рис. 8-3, в), считая при этом практически $u_b \approx u_f$, т. е.

$$\begin{aligned} u_b &\approx u_{ft} = u_{f0} + (u_{fnp} - u_{f0}) \left(1 - e^{-\frac{t}{T_e}}\right) = \\ &= u_{f0} + \Delta u_{fnp} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_e}}\right). \end{aligned} \quad (8-16)$$

В операторной форме этому выражению соответствует

$$u_f(p) = \frac{u_{f0}}{p} + \frac{\Delta u_{fnp}}{p(1 + T_e p)}. \quad (8-16a)$$

Величина T_e находится в пределах 0,3—0,6 сек*.

Теперь обратимся к выводу временной зависимости изменения тока возбуждения при установленной закономерности нарастания напряжения возбудителя. Допустим, что машина не имеет демпферных обмоток и цепь ее статора замкнута на чисто индуктивное сопротивление $x_{вп}$. Тогда операторные уравнения (7-49) и (7-51) согласно (7-54) и (7-57), а также с учетом (8-16a) приобретают вид:

$$\Delta u_q(p) = x_{ad} \Delta i_f(p) + (x_d + x_{вп}) \Delta i_d(p) = 0; \quad (8-17)$$

$$\begin{aligned} \Delta u_f(p) &= \frac{\Delta u_{fnp}}{p(1 + T_e p)} = r_f \Delta i_f(p) + p(x_f \Delta i_f(p) + \\ &+ x_{ad} \Delta i_d(p)). \end{aligned} \quad (8-18)$$

Из (8-17) имеем простое соотношение между приращениями токов:

$$\Delta i_d(p) = -\frac{x_{ad}}{x_d + x_{вп}} \Delta i_f(p) = -\frac{x_{ad}}{x_{d\Sigma}} \Delta i_f(p); \quad (8-19)$$

* Для союзных генераторов средней мощности с электромашинным возбуждением $T_e \approx 0,57$ сек. Это значение T_e принято при построении ряда расчетных кривых, которые используются в практических методах расчета коротких замыканий (см. гл. 11).

подставив его в (8-18), получим:

$$\begin{aligned}\frac{\Delta u_{f \text{ пп}}}{p(1+T_e p)} &= r_f \Delta i_f(p) + p \left(x_f - \frac{x_{ad}^2}{x_{d\Sigma}} \right) \Delta i_f(p) = \\ &= r_f (1 + T'_d p) \Delta i_f(p),\end{aligned}\quad (8-20)$$

где согласно (7-71) и (7-73)

$$\frac{x_f - \frac{x_{ad}^2}{x_{d\Sigma}}}{r_f} = T_{f0} \frac{x_{d\Sigma} - \frac{x_{ad}^2}{x_f}}{x_{d\Sigma}} = T_{f0} \frac{x'_{d\Sigma}}{x_{d\Sigma}} = T'_f = T'_d. \quad (8-21)$$

Из (8-20) выражение для $\Delta i_f(p)$ в окончательном виде будет

$$\Delta i_f(p) = \frac{\Delta u_{f \text{ пп}}}{r_f} \cdot \frac{1}{p(1+T_e p)(1+T'_d p)}. \quad (8-22)$$

Перейдя от изображения к оригиналу, например по формуле разложения, получим временную функцию приращения тока возбуждения¹:

$$\Delta i_{ft} = \Delta i_{f \text{ пп}} F(t), \quad (8-23)$$

где

$$F(t) = 1 - \frac{T'_d e^{-\frac{t}{T'_d}} - T_e e^{-\frac{t}{T_e}}}{T'_d - T_e}. \quad (8-24)$$

При $T_e = T'_d$ последнее выражение приводит к неопределенности, раскрытие которой дает:

$$F(t) = 1 - e^{-\frac{t}{T'_d}} \left(1 + \frac{t}{T'_d} \right). \quad (8-25)$$

¹ Для перехода к оригиналу можно использовать также интеграл Дюамеля [Л. 2,4], одна из многочисленных форм записи которого имеет вид

$$p f_1(p) f_2(p) \doteq f_1(t) f_2(0) + \int_0^t f_1(\tau) f'_2(t-\tau) d\tau,$$

где $\tau = t - t_0$; $f_1(p) \doteq f_1(t)$; $f_2(p) \doteq f_2(t)$; $f'_2(t-\tau) = \frac{df_2(t-\tau)}{dt}$.

На рис. 8-4 приведены кривые изменения функции $F\left(\frac{t}{T'_d}\right)$ (сплошные линии) при нескольких значениях $n_e = T_e/T'_d$. Легко убедиться, что при $n_e = 0$, т. е. когда Δu_f прикладывается к обмотке возбуждения толчком, выражение (8-25) переходит в простую возрастающую экспоненту [подобно (8-4)] с постоянной времени T'_d .

На том же рисунке пунктиром проведены кривые, характеризующие скорость изменения $F(t)$, т. е.

$$\begin{aligned} F'(t) &= \frac{dF(t)}{dt} = \frac{1}{T'_d - T_e} \left(e^{-\frac{t}{T'_d}} - e^{-\frac{t}{T_e}} \right) = \\ &= \frac{1}{T'_d (1 - n_e)} \left(e^{-\frac{t}{T'_d}} - e^{-\frac{t}{n_e T'_d}} \right). \end{aligned} \quad (8-26)$$

Эти кривые построены в функции t/T'_d и ординаты их увеличены в T'_d раз.

В данном случае

$$\begin{aligned} f_1(p) &= \frac{1}{p(1 + T_e p)} \doteq f_1(t) = \left(1 - e^{-\frac{t}{T_e}} \right); \\ f_2(p) &= \frac{1}{p(1 + T'_d p)} \doteq f_2(t) = \left(1 - e^{-\frac{t}{T'_d}} \right); \\ f_2(0) &= 0; \quad f'_2(t - \tau) = \frac{1}{T'_d} e^{-\frac{(t-\tau)}{T'_d}}. \end{aligned}$$

После подстановки этих функций в приведенное выражение и интегрирования его получим:

$$\begin{aligned} \Delta i_f(p) \doteq \Delta i_{ft} &= \Delta i_{f \text{ пп}} \frac{1}{T'_d} \int_0^t \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T_e}} \right) e^{-\frac{(t-\tau)}{T'_d}} d\tau = \\ &= \Delta i_{f \text{ пп}} e^{-\frac{t}{T'_d}} \left[e^{\frac{\tau}{T'_d}} - \frac{T_e e^{\tau \left(\frac{1}{T'_d} - \frac{1}{T_e} \right)}}{T'_d - T_e} \right]_0^t = \\ &= \Delta i_{f \text{ пп}} \left(1 - \frac{T'_d e^{-\frac{t}{T'_d}} - T_e e^{-\frac{t}{T_e}}}{T'_d - T_e} \right). \end{aligned}$$

Как и следовало ожидать, при включении обмотки возбуждения на постоянное напряжение ($n_e=0$) наибольшая скорость изменения функции имеет место в начальный момент ($t=0$). При любом конечном значении T_e ($n_e>0$) скорость изменения этой функции начинается с нуля, а затем, достигнув максимума, величина кото-

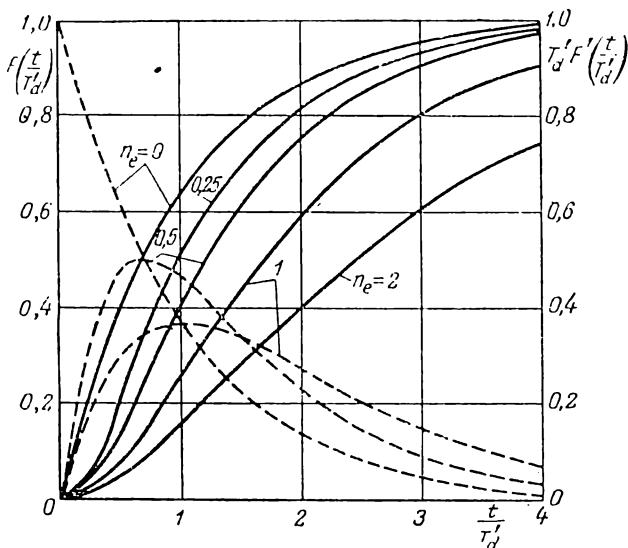


Рис. 8-4. Кривые изменения функции $F(t/T_d')$ (сплошные линии) и скорости ее изменения (пунктирные линии) при разных значениях $n_e = T_e/T_d'$.

рого падает с увеличением n_e , снова стремится к нулю. Читатель без труда может установить, что момент наступления этого максимума определяется выражением (4-19), где постоянная времени T'' должна быть заменена T_e .

В соответствии с (8-19) Δi_d пропорциональна Δi_f , поэтому функция $F(t)$ в равной мере характеризует изменение Δi_d . Что касается трансформаторной э. д. с., то при рассматриваемых условиях она проявляется еще меньше, чем при включении обмотки возбуждения на постоянное напряжение.

До сих пор предполагалось, что ток возбуждения при форсировке достигает своего предельного значения. В действительности же, как отмечалось в § 5-6, это бу-

дет иметь место только при $x_{\text{н}} \leq x_{\text{кр}}$. При больших значениях $x_{\text{н}}$ (т. е. $x_{\text{н}} > x_{\text{кр}}$) форсировка возбуждения обеспечивает подъем напряжения до нормального уровня; при этом ток возбуждения не достигает предельного. Установление нормального напряжения происходит после ряда затухающих колебаний. Этот процесс иллюстрирует кривая, представленная на рис. 8-3,г. Возникающими колебаниями обычно пренебрегают и практически считают, что рассматриваемый переходный процесс заканчивается, как только напряжение машины достигло нормального значения.

Продолжительность подъема напряжения машины под действием форсировки возбуждения до нормального значения называют критическим временем $t_{\text{кр}}$. Чем больше скорость подъема возбуждения (или напряжения), тем, очевидно, меньше критическое время.

Пример 8-1. Для генератора с параметрами: $x_d = 1,0$; $x_d' = 0,30$; $T_{f0} = 5 \text{ сек}$; $I_{f \text{ нр}} = 3,5$ и $T_e = 0,5 \text{ сек}$, вращающегося с синхронной скоростью без возбуждения, определить, в какой момент времени после включения форсировки возбуждения будут достигнуты:

а) номинальное напряжение на его выводах при разомкнутой цепи статора (т. е. при холостом ходе);

б) номинальный ток в обмотке статора при замкнутом (накоротко) ее состоянии.

Величина приведенного к статору тока возбуждения, необходимого для поддержания на холостом ходу номинального напряжения, составляет

$$\overset{\circ}{i}_f = \frac{i_f}{(x_d - x_d')} = \frac{1}{1,0 - 0,30} = 1,18.$$

Поскольку $x_d = 1,0$, очевидно, та же величина $\overset{\circ}{i}_f = 1,18$ необходима для обеспечения номинального тока статора, когда последний короткозамкнут.

Предельный ток возбуждения, приведенный к статору, будет

$$\overset{\circ}{i}_{f \text{ нр}} = \frac{i_{f \text{ нр}}}{x_{ad}} = \frac{3,5}{0,85} = 4,12.$$

Так как начальные условия нулевые, приращения одновременно являются полными величинами.

Из (8-23) находим, что при $\overset{\circ}{i}_f = 1,18$ $F(t) = \frac{1,18}{4,12} = 0,29$. Это значение $F(t)$ соответствует как условиям п. „а“, так и условиям п. „б“. Однако время наступления данного значения $F(t)$ в обоих случаях будет неодинаковым.

В первом случае (п. „а“) $T'_d = T_{f0} = 5 \text{ сек}$ и в соответствии с (8-24) имеем:

$$0,29 = 1 - \frac{5e^{-\frac{t}{5}} - 0,5e^{-\frac{t}{0,5}}}{5 - 0,5},$$

откуда

$$e^{-\frac{t}{5}} \left(1 - 0,1e^{-\frac{9}{5}t} \right) = 0,64.$$

Вычитаемое в скобках ничтожно мало; это позволяет пренебречь им. Тогда, обращаясь к таблице или кривой для экспоненциальной функции, находим $t/5 = 0,45$ и искомое время $t = 5 \cdot 0,45 = 2,25 \text{ сек}$. Определение этого времени по рис. 8-4 затруднено, так как в данном случае необходимо интерполировать между кривыми, расположенными достаточно далеко друг от друга. Отметим, что если бы к обмотке возбуждения было приложено сразу предельное напряжение, то напряжение статора достигло бы своего нормального значения через $1,65 \text{ сек}$, т. е. на $0,6 \text{ сек}$ раньше.

Во втором случае (п. „б“) по (7-70) $T'_d = 5 \frac{0,3}{1,0} = 1,5 \text{ сек}$ и, следовательно, $n_e = 0,5/1,5 = 1/3$. Интерполируя между соответствующими кривыми рис. 8-4, находим, что при $n_e = 1/3$ $F(t) = 0,29$ имеет место при $t/T'_d \approx 0,6$, т. е. искомое время составляет $t \approx 0,6 \cdot 1,5 = 0,9 \text{ сек}$. При $T_e = 0$ поставленное условие было бы соблюдено примерно через $0,5 \text{ сек}$.

При принятых условиях найдем аналогичные зависимости для машины с демпферными обмотками. Решение данной задачи не содержит принципиальных трудностей, но выкладки здесь уже достаточно громоздки, вследствие чего ряд промежуточных преобразований в дальнейшем опущен.

Исходные уравнения для рассматриваемого случая будут:

$$\Delta u_q(p) = x_{ad} [\Delta i_f(p) + \Delta i_{1d}(p)] + (x_d + x_{\text{нп}}) \Delta i_d(p) = 0; \quad (8-27)$$

$$\begin{aligned} \Delta u_f(p) = \frac{\Delta u_{f \text{ нп}}}{p(1 + T_e p)} = r_f \Delta i_f(p) + p [x_f \Delta i_f(p) + \\ + x_{ad} \Delta i_{1d}(p) + x_{ad} \Delta i_d(p)]; \end{aligned} \quad (8-28)$$

$$\begin{aligned} 0 = r_{1d} \Delta i_{1d}(p) + p [x_{1d} \Delta i_{1d}(p) + \\ + x_{ad} \Delta i_f(p) + x_{ad} \Delta i_d(p)]. \end{aligned} \quad (8-29)$$

Из (8-27) подобно (8-19) имеем:

$$\Delta i_d(p) = -\frac{x_{ad}}{x_{d\Sigma}} [\Delta i_f(p) + \Delta i_{1d}(p)], \quad (8-30)$$

подстановка которого в (8-29) дает

$$\Delta i_{1d}(p) = -\frac{x'_{ad}p}{r_{1d} + x'_{1d}p} \Delta i_f(p) = -\frac{x'_{ad}}{r_{1d}} \frac{p}{(1 + T'_{1d}p)} \Delta i_f(p). \quad (8-31)$$

Эта зависимость аналогична (8-12), с той лишь разницей, что вместо x_{ad} и x_{1d} здесь входят соответственно x'_{ad} и x'_{1d} , определяемые по (7-87) и (7-89) для условий, когда статор замкнут в общем случае через внешнюю реактивность $x_{вн}$.

Последнее равенство позволяет исключить из (8-30) ток $\Delta i_{1d}(p)$ и установить связь непосредственно между $\Delta i_d(p)$ и $\Delta i_f(p)$, т. е.

$$\Delta i_d(p) = -\frac{x_{ad}}{x_{d\Sigma}} \left(1 - \frac{x'_{ad}p}{r_{1d} + x'_{1d}p} \right) \Delta i_f(p). \quad (8-32)$$

Дальнейшая подстановка (8-31) и (8-32) в (8-28) после небольших преобразований дает

$$\frac{\Delta u_{fnp}}{p(1 + T_{ep})} = z_f(p) \Delta i_f(p), \quad (8-33)$$

где

$$z_f(p) = r_f + \left(x'_f - \frac{x'_{ad}p}{r_{1d} + x'_{1d}p} \right) p \quad (8-34)$$

— операторное сопротивление обмотки возбуждения при наличии демпферной обмотки и замкнутом (через $x_{вн}$) статоре; напомним, что здесь реактивность x'_f , определяемая по (7-88), соответствует условиям, когда статор замкнут через $x_{вн}$, а демпферная обмотка отсутствует; выражение (8-34) идентично тому, которое входит в (8-13), с тем лишь различием, что все участвующие в нем реактивности определены при замкнутой цепи статора.

Из (8-33), дополнительно используя запись (8-34) через его корни (см. § 7-9), выражение для $\Delta i_f(p)$ может быть получено в следующем виде:

$$\Delta i_f(p) = \frac{\Delta u_{fnp}}{r_f} F_f(p) = \Delta i_{fnp} F_f(p), \quad (8-35)$$

где

$$F_f(p) = \frac{1 + T'_{1d}p}{T'_d T''_d (1 + T'_d p) (1 + T''_d p) (1 + T_e p) p}; \quad (8-36)$$

при этом корни характеристического уравнения, очевидно, будут:

$$p_1 = -\frac{1}{T'_d}; \quad p_2 = -\frac{1}{T''_d}; \quad p_3 = -\frac{1}{T_e}; \quad p_4 = 0.$$

В соответствии с (8-31) для тока в демпферной обмотке:

$$\Delta i_{1d}(p) = \frac{\Delta i_{fnp} \cdot X'_{ad}}{r_{1d}} F_{1d}(p) = \Delta i_{1dnp} F_{1d}(p), \quad (8-37)$$

где

$$F_{1d}(p) = -\frac{1}{T'_d T''_d (1 + T'_d p) (1 + T''_d p) (1 + T_e p)}; \quad (8-38)$$

здесь нулевого корня нет, поскольку в стационарном режиме $i_{1d} = 0$.

Наконец, по (8-30) для тока статора имеем:

$$\Delta i_d(p) = \Delta i_{dnp} F_d(p), \quad (8-39)$$

где

$$\begin{aligned} F_d(p) &= F_f(p) + F_{1d}(p) = \\ &= \frac{1 + (T'_{1d} - 1)p}{T'_d T''_d (1 + T'_d p) (1 + T''_d p) (1 + T_e p) p}; \end{aligned} \quad (8-40)$$

$\Delta i_{dnp} = (i_{dnp} - i_d)$ — предельное приращение принужденного (установившегося) тока статора.

Используя формулу разложения, можно перейти от изображения $F(p)$ к оригиналам функций $F(t)$. Окончательный вид этих функций представлен в табл. 8-1. Там же приведены их выражения для частных случаев, когда $T_e = T'_d$ или $T_e = T''_d$; эти выражения получаются после раскрытия неопределенностей в общих выражениях для $F_d(t)$, $F_f(t)$ и $F_{1d}(t)$.

Легко убедиться, что в пределе, при $T''_d \approx T_{1d\sigma} \approx 0$, т. е. когда демпферная обмотка отсутствует ($r_{1d} = \infty$), $F_f(t) = F_d(t)$ и выражения для этих функций переходят в (8-24), а при $T_e = T'_d$ — в (8-25).

Функции приращений от действия форсировки возбуждения

Условия	$F(t)$	Выражения функций
$T'_d \neq T_e \neq T''_d$	$F_d(t)$	$1 - \frac{(T'_d - T_{1d\sigma}) T'_d}{(T'_d - T''_d)(T'_d - T_e)} e^{-\frac{t}{T'_d}} - \frac{(T''_d - T_{1d\sigma}) T''_d}{(T''_d - T'_d)(T''_d - T_e)} e^{-\frac{t}{T''_d}} -$ $- \frac{(T_e - T_{1d\sigma}) T_e}{(T_e - T'_d)(T_e - T''_d)} e^{-\frac{t}{T_e}}$
	$F_f(t)$	$1 - \frac{(T'_d - T'_{1d}) T'_d}{(T'_d - T''_d)(T'_d - T_e)} e^{-\frac{t}{T'_d}} - \frac{(T''_d - T'_{1d}) T''_d}{(T''_d - T'_d)(T''_d - T_e)} e^{-\frac{t}{T''_d}} -$ $- \frac{(T_e - T'_{1d}) T_e}{(T_e - T'_d)(T_e - T''_d)} e^{-\frac{t}{T_e}}$

Условия	$F(t)$	Выражения функций
$T'_d \neq T_e \neq T''_d$	$F_{1d}(t)$	$-\frac{(T'_{1d} - T_{1d\sigma}) T'_d}{(T'_d - T''_d)(T'_d - T_e)} e^{-\frac{t}{T'_d}} - \frac{(T'_{1d} - T_{1d\sigma}) T''_d}{(T''_d - T'_d)(T''_d - T_e)} e^{-\frac{t}{T''_d}} -$ $-\frac{(T'_{1d} - T_{1d\sigma}) T_e}{(T_e - T'_d)(T_e - T''_d)} e^{-\frac{t}{T_e}}$
$T_e = T'_d$	$F_d(t)$	$1 + \frac{(T''_d - T_{1d\sigma}) T''_d}{(T'_d - T''_d)^2} \left(e^{-\frac{t}{T'_d}} - e^{-\frac{t}{T''_d}} \right) - \left[1 + \frac{T'_d - T_{1d\sigma}}{(T'_d - T''_d) T'_d} t \right] e^{-\frac{t}{T'_d}}$
	$F_f(t)$	$1 + \frac{(T''_d - T'_{1d}) T''_d}{(T'_d - T''_d)^2} \left(e^{-\frac{t}{T'_d}} - e^{-\frac{t}{T''_d}} \right) - \left[1 + \frac{T'_d - T'_{1d}}{(T'_d - T''_d) T'_d} t \right] e^{-\frac{t}{T'_d}}$

Условия	$F(t)$	Выражения функций
$T_e = T'_d$	$F_{1d}(t)$	$\frac{T'_{1d} - T_{1d\sigma}}{T'_d - T''_d} \left[\frac{T''_d}{(T'_d - T''_d)} \left(e^{-\frac{t}{T'_d}} - \frac{t}{T'_d} \right) - \frac{t}{T'_d} e^{-\frac{t}{T'_d}} \right]$
$T_e = T''_d$		$1 - \frac{(T'_d - T_{1d\sigma}) T'_d}{(T'_d - T''_d)^2} \left(e^{-\frac{t}{T'_d}} - \frac{t}{T'_d} \right) - \left[1 - \frac{T''_d - T_{1d\sigma}}{(T'_d - T''_d)} T''_d t \right] e^{-\frac{t}{T''_d}}$
	$F_d(t)$	$1 - \frac{(T'_d - T'_{1d}) T'_d}{(T'_d - T''_d)^2} \left(e^{-\frac{t}{T'_d}} - \frac{t}{T'_d} \right) - \left[1 - \frac{T''_d - T'_{1d}}{(T'_d - T''_d)} T''_d t \right] e^{-\frac{t}{T''_d}}$
	$F_{1d}(t)$	$-\frac{T'_{1d} - T_{1d\sigma}}{T'_d - T''_d} \left[\frac{T'_d}{T'_d - T''_d} \left(e^{-\frac{t}{T'_d}} - \frac{t}{T'_d} \right) - \frac{t}{T''_d} e^{-\frac{t}{T''_d}} \right]$

Примечания: 1. Функции связаны соотношением $F_d(t) = F_f(t) + F_{1d}(t)$.

$$2. T'_{1d} = \frac{x'_{1d}}{r_{1d}} = \frac{x^2_{ad}}{r_{1d}} \left(1 - \frac{x^2_{ad}}{x_{1d}^2 x_{d\Sigma}} \right) = T_{1d0} \frac{x'_{1d}}{x_{1d}}, \text{ где } x_{d\Sigma} = x_d + x_{\text{вн}}.$$

$$3. T_{1d\sigma} = \frac{x_{1d\sigma}}{r_{1d}} = \frac{x_{1d} - x_{ad}}{r_{1d}}.$$

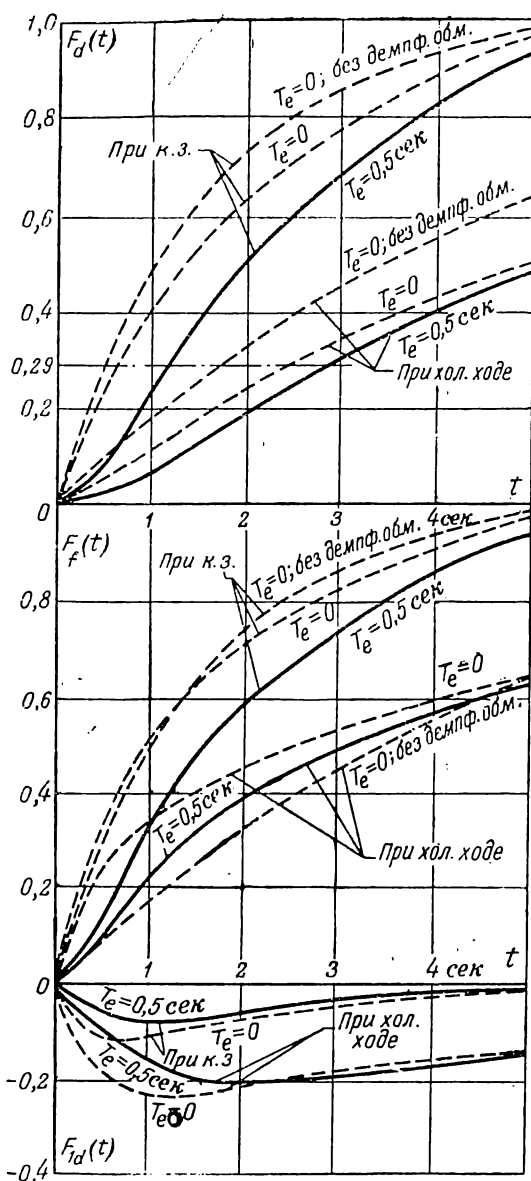


Рис. 8-5. К примеру 8-2. Кривые изменения функций $F_d(t)$, $F_f(t)$ и $F_{id}(t)$ при различных исходных условиях.

В практических подсчетах некоторыми отдельными слагаемыми выражений, помещенных в табл. 8-1, часто можно пренебрегать. При относительно длительных переходных процессах это прежде всего относится к слагаемым, затухание которых происходит с малыми постоянными времени (T''_d , T_e). При достаточно малых значениях T''_d и $T_{1d\sigma}$ независимо от длительности процесса для нахождения приращений токов в статоре и обмотке возбуждения практически можно пользоваться выражением (8-25), вводя в него T'_d с учетом демпферной обмотки.

Подъем напряжения возбудителя по экспоненциальному закону приводит к замедлению нарастания токов во всех цепях машины по сравнению с тем, когда к обмотке возбуждения генератора подводится сразу напряжение $\Delta u_{fпр}$ (что равносильно $T_e=0$).

Характер изменения функций $F_d(t)$, $F_f(t)$ и $F_{1d}(t)$ при различных условиях иллюстрируют кривые рис. 8-5. При замкнутом статоре результирующие реактивности обмоток ротора снижаются, что приводит к уменьшению их постоянных времени, а это в свою очередь — к увеличению скорости нарастания наводимой в статоре принужденной синхронной э. д. с. E_q по сравнению со скоростью при разомкнутом статоре. Демпферная обмотка препятствует нарастанию тока возбуждения i_f и соответственно э. д. с. E_q .

Пример 8-2. Провести решение примера 8-1, считая, что заданный генератор снабжен демпферной обмоткой, имеющей $x_{1d} = 0,95$ и $T_{1d\sigma} = 2$ сек.

Зная $x_d = 1,0$; $x_{ad} = 1,0 - 0,15 = 0,85$ и $x'_d = 0,30$, находим:

$$x_f = \frac{0,85^2}{1,0 - 0,3} = 1,03.$$

При разомкнутой цепи статора машины суммарный коэффициент рассеяния

$$\sigma_0 = 1 - \frac{0,85^2}{1,03 \cdot 0,95} = 0,26;$$

используя это, по (4-10) находим $T'_{d0} = 6,6$ сек, а затем по (4-22) $T''_{d0} = 5 + 2 - 6,6 = 0,4$ сек.

Теперь, зная все необходимые величины, по выражению для $F_d(t)$, приведенному в табл. 8-1, находим функцию:

$$F_d(t) = 1 - 1,11e^{-t/6,6} - 0,12e^{-t/0,4} + 0,23e^{-t/0,5},$$

которая на рис. 8-5 представлена соответствующей кривой.

Номинальное напряжение машины в долях предельной синхронной э. д. с. $E_{\text{нр}} = 3,5$ составляет $1/3,5 = 0,29$. Как видно из рис. 8-5, такого значения $F_d(t)$ достигает приблизительно через 3 сек.

Для полноты картины на рис. 8-5 показаны также кривые, отвечающие функциям:

$$F_f(t) = 1 - 0,80e^{-t/6,6} + 1,03e^{-t/0,4} - 1,23e^{-t/0,5};$$

$$F_{1d}(t) = -0,31e^{-t/6,6} - 1,15e^{-t/0,4} + 1,46e^{-t/0,5}.$$

Для условий короткого замыкания на выводах статорной обмотки имеем:

$$x'_{ad} = \frac{0,85 \cdot 0,15}{1,0} = 0,13; \quad x'_f = (1,03 - 0,85) + 0,13 = 0,31;$$

$$x'_{1d} = (0,95 - 0,85) + 0,13 = 0,23; \quad T'_f = 5 \frac{0,31}{1,03} = 1,5 \text{ сек};$$

$$T'_{1d} = 2 \frac{0,23}{0,95} = 0,48 \text{ сек}; \quad \sigma' = 1 - \frac{0,13^2}{0,31 \cdot 0,23} = 0,77.$$

По (4-10) $T'_d = 1,64 \text{ сек}$ и по (4-22) $T''_d = 0,34 \text{ сек}$.

Подстановка этих величин в выражения для $F_d(t)$ и $F_f(t)$, приведенные в табл. 8-1, дает:

$$F_d(t) = 1 - 1,58e^{-t/1,64} - 0,21e^{-t/0,34} + 0,79e^{-t/0,5};$$

$$F_f(t) = 1 - 1,28e^{-t/1,64} + 0,23e^{-t/0,34} + 0,05e^{-t/0,5};$$

$$F_{1d}(t) = -0,30e^{-t/1,64} - 0,44e^{-t/0,34} + 0,74e^{-t/0,5}.$$

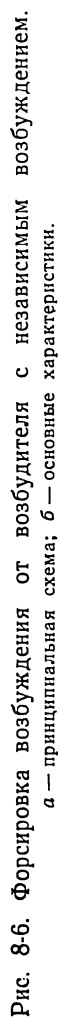
На рис. 8-5 эти функции представлены соответствующими кривыми.

Для соблюдения условия п. «б» примера 8-1, как установлено ранее, также необходимо, чтобы $F_d(t) = 0,29$. По кривой $F_d(t)$ рис. 8-5, соответствующей машине с короткозамкнутым статором, и $T_e = 0,5 \text{ сек}$, находим, что $F_d(t) = 0,29$ наступает через 1,15 сек (вместо 0,9 сек при $T_e = 0$).

Для сравнения на рис. 8-5 проведены (пунктиром) кривые изменения тех же функций при внезапном включении обмотки возбуждения на $\Delta u_{\text{нр}}$ (что соответствует $T_e = 0$) как при наличии, так и при отсутствии демпферных обмоток.

б) Независимое возбуждение

В некоторых случаях целесообразно применение электромашинного возбудителя с независимым возбуждением, т. е. возбудителя, питание обмотки возбуждения которого производится от постороннего источника. Таким источником обычно служит подвозбудитель, представляющий собой машину постоянного тока с самовозбуждением (рис. 8-6,а).



Напряжение подвозбудителя $u_{пв}$ при изменении его нагрузки остается практически неизменным, так как параметры возбудителя выбирают таким образом, чтобы при любой нагрузке он работал в зоне сильного насыщения его магнитной характеристики. Регулирование и форсировка возбуждения синхронной машины осуществляются реостатом в цепи возбуждения возбудителя и соответственно закорачиванием этого реостата, т. е. так же, как и при самовозбуждении. Предельный ток возбуждения возбудителя $i_{в.пр} = u_{пв}/r_{в}$, а предельный ток возбуждения генератора $i_{f.пр} = u_{f.пр}/r_f$, где величина предельного напряжения $u_{f.пр}$ определяется по магнитной характеристике при токе $i_{в.пр}$.

Из сказанного следует, что в рассматриваемой системе возбуждения при форсировке обмотка возбуждения возбудителя оказывается подключенной сразу на полное напряжение подвозбудителя $u_{пв}$, которое, как указывалось, практически постоянно. Поэтому в данном случае в левую часть уравнения (8-15) вместо $u_{в}$ нужно ввести $u_{пв}$. Тогда напряжение, уравновешивающее э. д. с. самоиндукции обмотки возбуждения возбудителя, будет

$$\Delta u_{в} = \frac{d\Psi_{в}}{dt} = u_{пв} - r_{в}i_{в},$$

т. е. графически оно может быть представлено разностью ординат горизонтальной прямой $u_{пв}$ и прямой $r_{в}i_{в}$, проходящей через начало координат (рис. 8-6,б).

Наращение тока $i_{в}$ при данных условиях происходит с постоянной времени $T_{в} = L_{в}/r_{в}$. Вследствие насыщения закономерность $u_{в} = f(t)$ отличается от экспоненты, однако это различие меньше, чем при самовозбуждении, что позволяет с большим основанием использовать выражение (8-16). При этом величина $T_{с}$ обычно примерно в 1,5 раз меньше, чем при самовозбуждении, т. е. порядка 0,2—0,4 сек. Более быстрый подъем возбуждения при независимом возбуждении обусловлен большей величиной $\Delta u_{в}$ (ср. рис. 8-3,б и 8-6,б при прочих одинаковых условиях), которая характеризует скорость подъема возбуждения.

Таким образом, полученные ранее выражения для функций, характеризующих изменения токов в обмотках синхронной машины при форсировке возбуждения,

справедливы и при независимом возбуждении. Здесь, как отмечалось, следует лишь вводить соответствующую величину для T_e .

Электромашинальная система независимого возбуждения по существу состоит из каскада машин постоянного тока, где одна машина является источником возбуждения другой, в силу чего такое возбуждение иногда называют каскадным. Каскадный принцип часто используют в различных системах автоматического регулирования, причем в каскаде может участвовать достаточно большое число машин. Каждая машина является, с одной стороны, инерционным звеном, характеризующимся постоянной времени ее обмотки возбуждения, а с другой — усилителем.

В самом деле, если приращение напряжения на входе, т. е. на обмотке возбуждения k -й машины, равно Δu_k , то при отсутствии насыщения приращение напряжения на ее выходе, т. е. на щетках якоря, которое практически является приращением напряжения Δu_{k+1} на входе следующей машины, пропорционально приращению тока возбуждения Δi_{bk} (т. е. $\Delta u_{k+1} = b_k \Delta i_{bk}$) и его выражение в операторной форме будет

$$\Delta u_{k+1}(p) = \frac{c_k}{p(1 + T_{bk}p)} \Delta u_k(p), \quad (8-41)$$

где $c_k = \frac{b_k}{r_{bk}}$ — коэффициент усиления k -машины;

T_{bk} — постоянная времени обмотки возбуждения той же машины.

Приращение напряжения на выходе каскада, состоящего из n машин, в операторной форме можно представить следующим общим выражением:

$$\Delta u_{\text{кас}}(p) = \Delta u_{n+1}(p) = p \frac{c_{\text{кас}}}{\prod_{k=1}^n (1 + T_{bk}p)} \Delta u_1(p), \quad (8-42)$$

где $c_{\text{кас}} = c_1 c_2 \dots c_n$ — коэффициент усиления каскада.

В соответствии с (8-42), считая, что 1-я машина каскада работает по схеме самовозбуждения, для изображения $F_d(p)$ и оригинала функции $F_d(t)$, показываю-

щей относительное изменение тока возбуждения Δi_f синхронной машины без демпферных обмоток, имеем:

$$F_d(p) = \frac{1}{p \prod_{k=1}^n (1 + T_{в k} p)} \stackrel{\cdot}{=} F_d(t) =$$

$$= 1 - \sum_{k=1}^n \frac{T_{в k} e^{-\frac{t}{T_{в k}}}}{\prod_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^n (T_{в k} - T_m)}. \quad (8-43)$$

Нетрудно убедиться, что (8-25) является частным случаем последнего, более общего выражения.

Пример 8-3. Показать влияние числа машин в системе каскадного возбуждения на изменение $F_d(t)$, считая, что каждая последующая машина имеет постоянную времени, которая в 2 раза меньше, чем у предыдущей. Синхронная машина не имеет демпферных обмоток и цепь ее статора разомкнута.

Для сравнения вначале напомним, что при включении обмотки возбуждения синхронной машины на постоянное напряжение функция

$$F_d(\tau) = 1 - e^{-\tau},$$

где $\tau = t/T_f$.

При наличии возбудителя с постоянной времени $T_v = \frac{1}{2} T_f$ по (8-43) или (8-25) имеем:

$$F_d(\tau) = 1 - 2e^{-\tau} + e^{-2\tau}.$$

При питании возбудителя от подвозбудителя с $T_{пв} = \frac{1}{2} T_v = \frac{1}{4} T_f$ функция

$$F_d(\tau) = 1 - 2,67e^{-\tau} + 2e^{-2\tau} - 0,33e^{-4\tau}.$$

Наконец, если подвозбудитель питать от машины с $T = \frac{1}{2} T_{пв} = \frac{1}{8} T_f$, то

$$F_d(\tau) = 1 - 3,05e^{-\tau} + 2,66e^{-2\tau} - 0,66e^{-4\tau} + 0,05e^{-8\tau}.$$

Полученные выражения представлены на рис. 8-7 соответствующими кривыми, которые пронумерованы в порядке очередности получения их. Как видно, с вводом в каскад независимого возбуждения каждой новой машины нарастание функции $F_d(\tau)$ замедляется.

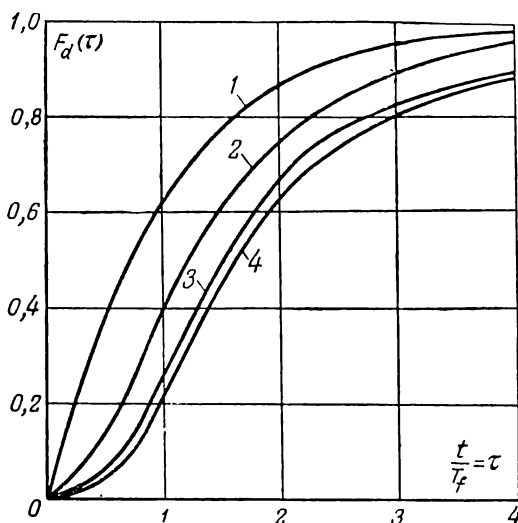


Рис. 8-7. К примеру 8-3. Кривые изменения функции $F_d(\tau)$ при разном числе машин в каскаде независимого возбуждения.

8-4. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ

Систему возбуждения, в которой используется возбуждатель с последовательной обмоткой возбуждения (рис. 8-8), для сокращения обычно называют последова-

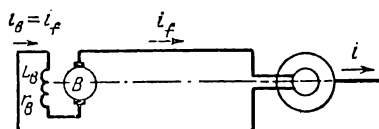


Рис. 8-8. Принципиальная схема последовательного возбуждения.

тельным возбуждением. Рассмотрим вкратце поведение такой системы при переходном электромагнитном процессе синхронной машины без демпферных обмоток.

При отсутствии насыщения магнитной системы возбуждателя наводимая в его якоре э. д. с. будет

$$e_B = e_{B0} + e_{Bf} = e_{B0} + n i_f, \quad (8-44)$$

где $e_{в0}$ — составляющая э. д. с., обусловленная остаточным магнетизмом или некоторым постоянным возбуждением от постороннего источника;
 n — коэффициент пропорциональности между током i_f и наводимой им в якоре возбудителя э. д. с. $e_{в}$.

Для контура, состоящего из обмоток возбуждения синхронной машины и ее возбудителя, а также якоря возбудителя, уравнение равновесия э. д. с. при пренебрежении, как и ранее, реакцией якоря возбудителя будет иметь вид

$$e_{в} = e_{в0} + n i_f = r_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} + r_{в} i_{в} + L_{в} \frac{di_{в}}{dt}, \quad (8-45)$$

или, иначе, имея в виду равенство $i_{в} = i_f$,

$$e_{в0} = (r_f + r_{в} - n) i_f + (L_f + L_{в}) \frac{di_f}{dt}, \quad (8-46)$$

откуда следует, что постоянная времени данного контура характеризуется отношением

$$T_{fv} = \frac{L_f + L_{в}}{r_f + r_{в} - n}, \quad (8-47)$$

где L_f , $L_{в}$, r_f и $r_{в}$ — результирующие индуктивности и активные сопротивления соответственно обмотки возбуждения машины и обмотки возбуждения ее возбудителя.

Из (8-46) и (8-47) следует, что последовательная обмотка возбуждения возбудителя увеличивает общую индуктивность цепи возбуждения и, напротив, создавая эффект отрицательного омического сопротивления, уменьшает общее омическое сопротивление этой цепи. Оба эти фактора приводят к возрастанию постоянной времени T_{fv} , причем в зависимости от выбранной величины коэффициента n значение T_{fv} может быть сделано очень большим. При полной компенсации омических сопротивлений ($r_f + r_{в} = n$) создаются условия сверхпроводящего контура, т. е. когда из-за отсутствия потерь наведенный в контуре ток и обусловленное им потоко-сцепление сохраняются неизменными. При перекомпен-

сации ($r_f + r_n < n$), очевидно, будет обеспечено даже увеличение потокосцепления обмотки возбуждения синхронной машины и связанной с ним переходной э. д. с. E_q' .

Изложенное вскрывает некоторые преимущества последовательного возбуждения синхронных машин. При возникновении переходного процесса в цепи статора машины наведенный в обмотке возбуждения свободный ток, протекая по последовательной обмотке возбуждения возбудителя, увеличивает э. д. с. возбудителя, что способствует поддержанию этого тока. Несмотря на увеличение постоянной времени T_{fb} , возбудитель с последовательной обмоткой возбуждения позволяет получить значительно большую скорость нарастания напряжения на кольцах ротора синхронной машины, чем при обычной форсировке возбуждения, рассмотренной в § 8-3.

Последовательное возбуждение особенно целесообразно в случаях, когда машина подвержена резким толчкам нагрузки или внезапным коротким замыканиям, при которых может быть превзойден предел ее устойчивой работы. Его используют также для специальных генераторов, устанавливаемых в лабораториях по испытанию выключателей в условиях короткого замыкания.

В союзной практике последовательное возбуждение синхронных машин еще не нашло достаточно широкого применения, хотя в ряде случаев оно заслуживает серьезного внимания.

8-5. КОМПАУНДИРОВАНИЕ

Одним из способов автоматического регулирования возбуждения машины является компаундирование. Его принципиальная схема показана на рис. 8-9,а. Вторичная обмотка трансформатора тока, включенного в фазу генератора, присоединена к специальному выпрямительному устройству ВУ. Поступающий в него переменный ток после выпрямления направляется в обмотку возбуждения возбудителя, где вместе с током от возбудителя образует полный ток i_n этой обмотки, от которого зависит величина развиваемого возбудителем напряжения u_n . На схеме показан наиболее распространенный тип возбудителя — с самовозбуждением.

Считая все элементы схемы линейными, оценим в первом приближении качественное влияние компаундирования на протекание электромагнитного переходного процесса.

При принятых на рис. 8-9 обозначениях для цепи обмотки возбуждения возбудителя при переходном процессе имеем:

$$\begin{aligned} u_B &= i_B r_B + (i_B - i_K) r_p + L_B \frac{di_B}{dt} = \\ &= i_B (r_B + r_p) - i_K r_p + L_B \frac{di_B}{dt}, \end{aligned} \quad (8-48)$$

Из последнего уравнения сразу видно, что компаундирование обуславливает дополнительное слагаемое ($-i_K r_p$), что, вообще говоря, эквивалентно введению в рассматриваемую цепь дополнительной э. д. с., численно равной $i_K r_p$, причем в зависимости от ее знака это приводит к увеличению или уменьшению тока возбуждения. В графической интерпретации уравнения (8-48) это соответствует смещению прямой $i_B (r_B + r_p)$, как показано на рис. 8-9,б. Здесь, в частности, дополнительная э. д. с. ($e = i_K r_p$) принята такой, чтобы после включения ее при заданном сопротивлении шунтового реостата r_p ток возбуждения возбудителя достиг того же предела, что и при обычной форсировке, т. е. при закорачивании этого реостата ($r_p = 0$). Разумеется, меняя величину вводимой э. д. с., можно изменять значение предельного тока $i_{B,пр}$.

Очевидно, при включении указанной э. д. с. напряжение, уравнивающее э. д. с. самоиндукции обмотки возбуждения возбудителя, графически выражается разностью ординат характеристики $u_B = f(i_B)$ и уже смещенной прямой $O'П$. Как видно из рис. 8-9,б, это напряжение значительно больше, чем при обычной форсировке (отрезок 1—3 вместо отрезка 1—2), и важно, что ее наибольшее значение имеет место в начале процесса. Коль скоро постоянная времени T_B сохраняется прежней, подъем возбуждения при наличии компаундирования происходит быстрее, чем при отсутствии его, причем наибольшая скорость имеет место в начале процесса.

Таким образом, включая с помощью соответствующего регулятора дополнительную э. д. с. (например, от



a — принципиальная схема; *б* — основные характеристики.

электромашиинного усилителя), можно устранить основной недостаток самовозбуждения по сравнению с независимым возбуждением. Этот принцип используют при выполнении возбуждения современных синхронных машин, когда нужно обеспечить повышенную скорость нарастания возбуждения.

Вернемся к схеме рис. 8-9. В ней по существу воспроизведена обратная связь, промежуточные элементы которой (трансформатор тока, выпрямительное устройство) обладают нелинейностью и инерцией. Если последними пренебречь, а также считать характеристику намагничивания машины прямолинейной, то напряжение возбuditеля u_b , являющееся в то же время практически напряжением на кольцах ротора синхронной машины u_f , очевидно, будет связано с током статора i простой зависимостью:

$$u_b = u_f = u_{b1} + ai = u_{f1} + ai, \quad (8-49)$$

где u_{b1} — напряжение возбuditеля при работе синхронной машины на холостом ходу ($i=0$) с нормальным напряжением статора;

a — коэффициент пропорциональности.

С другой стороны, при прямолинейной характеристике намагничивания ток статора пропорционален той части тока возбуждения $b(i_f - i_{f1})$, которая компенсирует реакцию статора. Тогда предыдущее равенство можно записать иначе:

$$u_f = u_{f1} + b(i_f - i_{f1}), \quad (8-49a)$$

и уравнение переходного процесса в контуре ротора при замкнутой цепи статора и отсутствии демпферных обмоток будет

$$u_f = u_{f1} + b(i_f - i_{f1}) = r_f i_f + L'_f \frac{di_f}{dt},$$

или

$$u_{f1} - bi_{f1} = (r_f - b)i_f + L'_f \frac{di_f}{dt}, \quad (8-50)$$

откуда видно, что при компаундировании постоянная времени этого контура увеличивается:

$$T_{fk} = \frac{L'_f}{r_f - b} = T'_f \frac{1}{1 - (b/r_f)}, \quad (8-51)$$

т. е. в этом отношении компаундирование, как и следо-

вало ожидать, сказывается аналогично последовательному возбуждению (см. § 8-4).

Полная картина проявления компаундирования значительно сложнее, так как существенные изменения вносят нелинейность элементов и то обстоятельство, что обычно компаундирование выполняют в сочетании с коррекцией по отклонению напряжения статора, выполняемой специальным электромагнитным корректором, воздействующим через дополнительную обмотку возбуждителя [Л. 64]. При глубоких снижениях напряжения происходит в действие релейная форсировка возбуждения.

8-6. ИОННОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ¹

В ряде случаев для синхронных машин применяют ионное возбуждение; при этом используют выпрямительные установки с управляемыми ионными вентилями².

Ионное возбуждение позволяет легко обеспечить при форсировке очень быстрое (практически мгновенное) нарастание напряжения возбуждения и большую предельную величину последнего [$u_{i\text{пр}} = (4 \div 5) u_i$]. Это достигается обычно установкой двух выпрямителей, включенных параллельно. Один из них обеспечивает возбуждение машины в нормальном режиме, а другой служит для форсировки возбуждения. Регулирование возбуждения машины в нормальных условиях производят сеточным управлением ионного вентиля.

В зависимости от способа питания выпрямительной установки различают ионное независимое возбуждение и ионное возбуждение с самовозбуждением, причем последнее выполняют с последовательным вольтодобавоч-

¹ Написан канд. техн. наук, доц. И. П. Крючковым.

² В настоящее время ионное возбуждение применяют главным образом для мощных гидрогенераторов, так как электромашинное возбуждение, которое обеспечило бы необходимое быстродействие, при этом получается весьма сложным и недостаточно надежным. Помимо того, ионное возбуждение позволяет в известной мере снизить специальные требования к параметрам таких гидрогенераторов.

Для мощных турбогенераторов, работающих в условиях без дальних линий передачи, вопрос о быстродействии возбуждения менее актуален; тем не менее применение ионного возбуждения становится также целесообразным в силу простоты получения больших токов, необходимых для возбуждения подобных машин.

ным трансформатором (ионное возбуждение со смешанным самовозбуждением) и без него (ионное возбуждение с параллельным самовозбуждением).

При ионном независимом возбуждении (рис. 8-10,а) выпрямительная установка ВУ питается от вспомога-

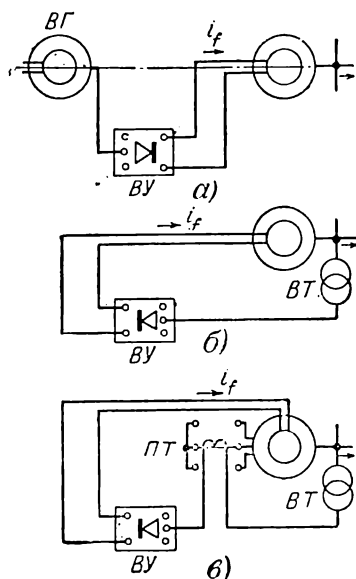


Рис. 8-10. Система ионного возбуждения.

а — независимая; б — с параллельным самовозбуждением; в — со смешанным самовозбуждением; ВГ — вспомогательный генератор; ВТ — выпрямительный трансформатор; ПТ — последовательный вольтодобавочный трансформатор.

тельного генератора ВГ, обычно связанного с валом главного генератора. Обмотка статора вспомогательного генератора выполняется обычно с выводами на два напряжения. К выводам низшего напряжения присоединяют выпрямитель, обеспечивающий возбуждение в нормальном режиме, а к выводам высшего напряжения — выпрямитель для форсировки возбуждения.

При ионном возбуждении с параллельным самовозбуждением (рис. 8-10,б) выпрямительный трансформатор ВТ присоединен непосредственно к выводам генератора. Как видно, здесь образуется жесткая обратная связь между обмотками статора и ротора генератора. Последнее обстоятельство приводит к тому, что при глубоких снижениях напряжения генератора (короткие замыкания, значительные качания и т. п.)

форсировочная способность такой системы возбуждения сильно падает.

Указанный недостаток практически устраняют путем включения в схему последовательного вольтодобавочного трансформатора ПТ (рис. 8-10,в), осуществляя тем самым по существу дополнительно компаундирование или, как названо выше, смешанное самовозбуждение. Чтобы обеспечить линейную зависимость между вторичным напряжением этого трансформатора и током

генератора, его выполняют с большим воздушным зазором. Вторичную обмотку указанного трансформатора включают в цепь первичной или вторичной обмотки выпрямительного трансформатора *ВТ*. На рис. 8-10, в показан второй случай. При этом напряжение на входе выпрямительной установки пропорционально сумме приведенных напряжений генератора и вторичной обмотки вольтодобавочного трансформатора.

Параметры вольтодобавочного трансформатора подбирают такими, чтобы при различных режимах синхронной машины напряжение на входе выпрямительной установки оставалось примерно постоянным. Необходимая форсировка возбуждения достигается сеточным управлением вентилей. При таком выполнении ионное возбуждение с самовозбуждением по своим характеристикам близко к ионному независимому возбуждению.

В силу того что ионное возбуждение практически безынерционно (постоянная времени $T_e < 0,02$ сек), можно считать, что при форсировке возбуждения напряжение на кольцах обмотки возбуждения синхронной машины возрастает до предельного $u_{f\text{пр}}$ скачком. Поэтому все выражения, полученные ранее для форсировки возбуждения при электромашинном возбуждении (см. табл. 8-1), применимы и при ионном возбуждении, для чего достаточно положить в них $T_e = 0$; это приводит к значительному упрощению их.

8-7. ГАШЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

При повреждениях внутри электрической машины или на участке от ее выводов до ближайшего отключающего аппарата единственным средством прекращения тока в этой машине является ее развозбуждение или, иными словами, гашение ее магнитного поля. Обмотка возбуждения крупной синхронной машины обладает большим запасом электромагнитной энергии, и быстрое поглощение последней представляет сложную проблему.

Обычный полный разрыв цепи возбуждения недопустим, так как благодаря большой индуктивности обмотки возбуждения на ее выводах возникнет перенапряжение, способное вызвать пробой изоляции данной обмотки. Поэтому гашение поля осуществляют путем

переключения обмотки возбуждения или на так называемое разрядное сопротивление, или на встречно направленную э. д. с. Аппарат, производящий такие функции, называют автоматом гашения поля (АГП).

Устройство гашения поля должно удовлетворять следующим основным требованиям:

1. Время гашения поля $t_{\text{гаш}}$ должно быть возможно меньшим.

2. Напряжение на выводах обмотки возбуждения при гашении поля не должно превышать того напряжения, которое является допустимым для изоляции этой обмотки.

Под временем гашения поля понимают время с начала гашения поля до момента, когда э. д. с. статора спадает до величины, при которой происходит естественное погасание дуги переменного тока. Эта величина составляет примерно $500/\sqrt{2} \approx 350$ в. Принимая в среднем наводимую остаточным магнетизмом ротора э. д. с. равной 200 в, можно считать, что гашение поля практически закончено, когда наводимая током ротора э. д. с. спадет приблизительно до $350 - 200 = 150$ в.

Для обеспечения известной надежности величину допустимого напряжения принимают

$$U_{\text{доп}} \leq 0,7 U_{\text{исп}}, \quad (8-52)$$

где $U_{\text{исп}}$ — испытательное напряжение для данного класса изоляции; оно находится в пределах 1 500—5 000 в.

В настоящее время существует большое число различных способов гашения поля. Однако свою задачу ограничим рассмотрением лишь двух из них, которые получили наибольшее распространение в союзной практике¹.

Первый состоит в разряде обмотки возбуждения на постоянное активное сопротивление. Он разработан Харьковским электромашиностроительным заводом (ХЭМЗ). Автомат гашения поля (рис. 8-11) имеет контакты 2, которые в нормальных условиях замкнуты, и

¹ Для более подробного знакомства с автоматами гашения поля см. [Л. 72].

контакты 1 — разомкнуты. При действии автомата вначале замыкаются контакты 1 и лишь затем (во избежание больших перенапряжений) происходит размыкание контактов 2.

При отсутствии демпферных обмоток и разомкнутом статоре ток в обмотке возбуждения будет затухать от

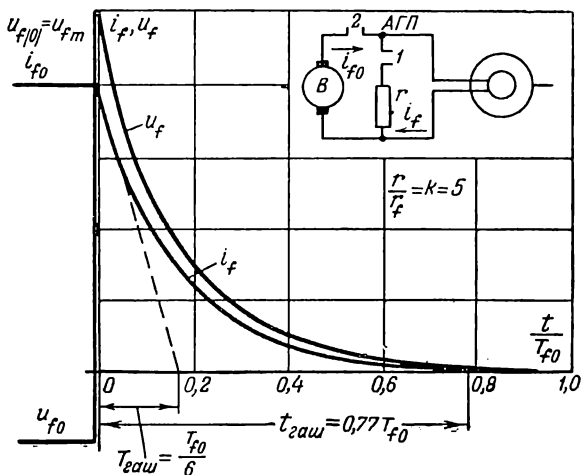


Рис. 8-11. Гашение поля на постоянное разрядное сопротивление.

своего предшествующего значения i_{f0} по известной закономерности

$$i_f = i_{f0} e^{-\frac{t}{T_{гаш}}}, \quad (8-53)$$

где постоянная времени гашения

$$T_{гаш} = \frac{L_f}{r_f + r} = T_{f0} \frac{1}{1 + k}; \quad (8-54)$$

здесь $k = r/r_f$.

Напряжение на обмотке возбуждения u_f пропорционально току i_f . Его наибольшая величина u_{fm} наступает в момент включения ($t=0$) разрядного сопротивления r и связана с предшествующим значением этого напряжения u_{f0} очевидным соотношением

$$u_{fm} = u_{f|0|} = \frac{r}{r_f} u_{f0} = k u_{f0}; \quad (8-55)$$

Чтобы ускорить гашение, нужно увеличить разрядное сопротивление, однако по условию допустимого повышения напряжения это сопротивление не должно выходить за пределы $r = U_{\text{доп}}/i_{f0}$. Обычно принимают $r = (3 \div 5) r_f$.

При отсутствии насыщения магнитной системы имеем равенство

$$\frac{\Phi_{d0}}{\Phi_{\text{гаш}}} = \frac{E_{d0}}{E_{\text{гаш}}} = \frac{i_{f0}}{i_{\text{гаш}}} = N, \quad (8-56)$$

где $i_{\text{гаш}}$ — ток возбуждения, создающий э. д. с. $E_{\text{гаш}} = 150$ в, при которой, как указывалось выше, гаснет дуга переменного тока.

Следовательно, зная кратность N необходимого уменьшения тока возбуждения, из (8-53) с учетом (8-54) легко получить выражение для времени гашения:

$$t_{\text{гаш}} = T_{f0} \frac{1}{1+k} \ln N. \quad (8-57)$$

Так, например, для генератора, работающего с напряжением 15 000 в, кратность уменьшения $N = 15\,000/150 = 100$ и время гашения при $k = 5$ будет

$$t_{\text{гаш}} = T_{f0} \frac{1}{1+5} \ln 100 = 0,77 T_{f0}.$$

Для этих условий на рис. 8-11 приведены кривые изменений i_f и u_f в функции t/T_{f0} . Отметим, что при гашении поля напряжение u_f меняет свой знак по сравнению с предшествующим.

Существенным недостатком рассматриваемого способа гашения поля является быстрое снижение скорости затухания тока возбуждения, что удлиняет процесс гашения.

По предложению О. Б. Брона можно установить оптимальные условия гашения поля, при которых обеспечивается возможная наименьшая продолжительность процесса гашения; при этом напряжение на обмотке возбуждения в течение всего процесса гашения не должно превышать допустимого значения. Пренебрегая величиной r_f по сравнению с r , для указанных условий имеем:

$$L_f \frac{di_f}{dt} + r i_f = L_f \frac{di_f}{dt} + U_{\text{доп}} = 0,$$

или после разделения переменных и интегрирования

$$\int_{i_{f0}}^{i_f} di_f = - \frac{U_{\text{доп}}}{L_f} \int_0^t dt$$

окончательно получим

$$i_f = i_{f0} - \frac{U_{\text{доп}}}{L_f} t, \quad (8-58)$$

т. е. ток i_f должен падать по линейному закону; при этом время гашения (при $i_f = 0$) будет

$$t_{\text{гаш}} = \frac{L_f}{U_{\text{доп}}} i_{f0} = T_{f0} \frac{1}{k}, \quad (8-59)$$

т. е. оно в $\left(\frac{k}{1+k} \ln N\right)$ раз меньше, чем при гашении на постоянное разрядное сопротивление.

На рис. 8-12 показаны закономерности, отвечающие рассматриваемым оптимальным условиям. Для достижения их необходимо, чтобы разрядное сопротивление r изменялось от своего начального значения r_0 обратно пропорционально току i_f . С этой целью различными авторами предлагается использовать в качестве разрядных сопротивлений сопротивления с нелинейными характеристиками (например, выполненные из карборунда и др.).

Оригинальным и весьма эффективным оказалось предложение группы специалистов Ленинградского завода «Электросила», возглавляемой О. Б. Броном. Сущность их предложения состоит в следующем.

Известно, что падение напряжения на короткой электрической дуге между металлическими электродами сохраняется практически постоянным при изменении то-

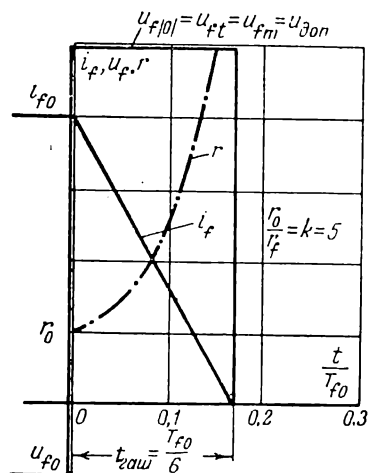


Рис. 8-12. Оптимальные условия гашения поля.

ка в широких пределах, т. е. сопротивление такой дуги обратно пропорционально току, как это требуется для создания оптимальных условий гашения. Поскольку величина напряжения на короткой дуге составляет всего лишь около 30 в, для гашения поля при более высоких напряжениях авторами предложено применить последовательное соединение ряда коротких дуг, что выполнено в дугогасящей решетке (ДГР).

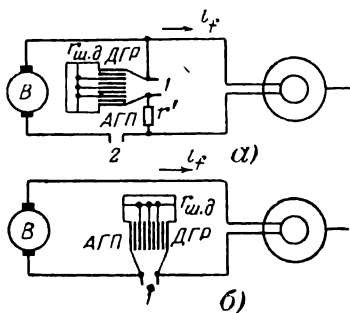


Рис. 8-13. Схемы включения дугогасящей решетки для гашения поля.

а — параллельно обмотке возбуждения; *б* — последовательно с обмоткой возбуждения.

Дугогасящая решетка может быть включена параллельно обмотке возбуждения (рис. 8-13,а) или последовательно с ней (рис. 8-13,б).

В первом случае контакты 2 (АГП) в нормальных условиях замкнуты, а контакты 1 — разомкнуты. При действии АГП сперва замыкаются контакты 1 и тем шунтируют через сопротивление r' обмотку возбуждения. Затем происходит размыка-

ние контактов 2, а через малый интервал — также и контактов 1. Возникающая при этом на контактах 1 дуга под влиянием специально созданного магнитного поля увлекается в решетку, где, разбившись на ряд коротких дуг, она продолжает гореть до прекращения тока. Небольшое сопротивление r' введено для того, чтобы при замыкании контактов 1 возбудитель не оказался закороченным.

При последовательном включении дугогасящей решетки (рис. 8-13,б) контакты 1 (АГП) в нормальных условиях замкнуты и размыкание их происходит при действии АГП. Образующаяся при этом дуга, как и раньше, разбивается в решетке на ряд коротких дуг. Пока горит дуга, цепь обмотки возбуждения остается замкнутой через якорь возбудителя.

При подходе тока к нулю часто наблюдается так называемый срыв тока, т. е. внезапное прекращение его. При большой индуктивности обмотки возбуждения это сопровождается резким возрастанием напряжения на обмотке. Для ограничения перенапряжения дугогасящая

решетка шунтирована относительно большим сопротивлением $r_{ш.д.}$, причем чтобы дуга гасла по частям, а не вся сразу, решетка разбита на секции, которые присоединены к промежуточным ответвлениям этого сопротивления.

Из приведенных способов включения дугогасящей решетки предпочтительным является второй, т. е. когда решетка введена последовательно в цепь обмотки возбуждения. Его преимуществом являются относительная простота выполнения (меньше контактов), большая надежность, отсутствие дополнительного сопротивления r' . Помимо того, если при параллельном включении решетки напряжение на обмотке возбуждения практически равно напряжению на решетке при горении в ней дуги, то при последовательном включении это напряжение меньше напряжения на решетке на величину напряжения возбудителя $u_B \approx u_{f0}$ (см. ниже). Поэтому в дальнейшем рассматриваем только последовательное включение дугогасящей решетки.

Считая напряжение возбудителя u_B (практически равное предшествующему напряжению на кольцах ротора u_{f0}) неизменным, для цепи обмотки возбуждения в схеме рис. 8-13,б при гашении поля имеем:

$$L_f \frac{di_f}{dt} + r_f i_f + u_d = u_B = u_{f0},$$

где $u_d = 30n$ — напряжение на решетке (из n пластин) при горении дуги, v .

Интегрирование этого уравнения приводит к выражению

$$i_f = i_{f0} - \frac{u_d}{r_f} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{f0}}} \right). \quad (8-60)$$

Если $u_{fm}/u_{f0} = k$ — кратность перенапряжения на обмотке возбуждения, то напряжение на дугогасительной решетке

$$u_d = (1 + k) u_{f0}, \quad (8-61)$$

и выражение (8-60) можно представить в иной форме:

$$i_f = i_{f0} \left[(1 + k) e^{-\frac{t}{T_{f0}}} - k \right]. \quad (8-62)$$

Из записи (8-60) непосредственно следует, что включение дугогасящей решетки эквивалентно внезапному включению в цепь обмотки возбуждения постоянной э. д. с., равной u_d и направленной против напряжения возбудителя. При этом нужно иметь в виду, что (8-60), равно как и (8-62), справедливо лишь в течение времени горения дуги t_d , которое в данном случае является также временем гашения поля $t_{\text{гаш}}$. Это время легко найти из (8-62) при $i_f=0$:

$$t_d = t_{\text{гаш}} = T_{f0} \ln \frac{1+k}{k}. \quad (8-63)$$

Закономерности изменений i_f , u_f и u_d в функции $\frac{t}{T_{f0}}$ при рассматриваемом способе гашения поля приведены на рис. 8-14. Они построены, как и кривые рис. 8-11, при $k=5$. Время гашения по (8-63) составляет

$$t_d = t_{\text{гаш}} = T_{f0} \ln \left(\frac{1+5}{5} \right) = 0,18 T_{f0},$$

т. е. оно в $\frac{0,77}{0,18} = 4,3$ раза меньше, чем при гашении с помощью постоянного разрядного сопротивления, при котором соблюдается то же значение u_{fm} .

Кривая изменения тока i_f заканчивается при пересечении с осью абсцисс, т. е. при $t_{\text{гаш}} = t_d$; пунктиром показано ее продолжение, которое было бы по (8-60) или (8-62). Напряжение u_d на дугогасящей решетке при горении дуги постоянно и равно $(1+k)u_{f0} = 6u_{f0}$; после погасания дуги оно падает до напряжения возбудителя. Напряжение на обмотке возбуждения при возникновении дуги, меняя знак, увеличивается до $ku_{f0} = 5u_{f0}$ и при погасании ее падает до нуля.

Теперь обратимся к выяснению влияния демпферных обмоток на процесс гашения поля.

Наличие демпферных обмоток прежде всего скажется в том, что затухание потока Φ_d и обусловленной им э. д. с. статора будет происходить с большей постоянной времени; в соответствии с (4-28) она практически равна сумме постоянных времени демпферной обмотки T_{d0} и обмотки возбуждения T_{f0} с учетом введенного в нее сопротивления при гашении поля.

Так, при гашении на постоянное разрядное сопротивление r постоянная времени гашения будет

$$T_{\text{гаш}} = T_{1d0} + T_{f0} \frac{1}{1+k} \quad (8-64)$$

и время гашения в соответствии с (8-57)

$$t_{\text{гаш}} = \left(T_{1d0} + T_{f0} \frac{1}{1+k} \right) \ln N = T_{\text{гаш}} \ln N, \quad (8-65)$$

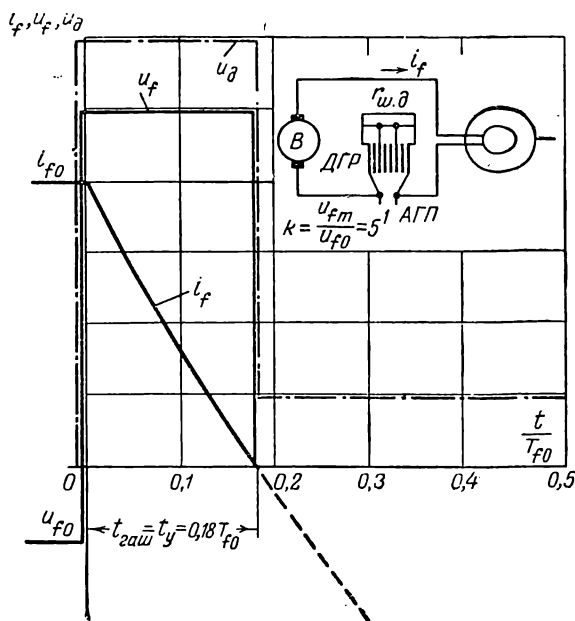


Рис. 8-14. Гашение поля с помощью дугогасительной решетки, включенной последовательно с обмоткой возбуждения.

т. е. больше, чем при отсутствии демпферной обмотки, что является нежелательным.

С другой стороны, демпферная обмотка в процессе гашения принимает на себя часть энергии магнитного поля, чем облегчает условия для обмотки возбуждения и включенного в ее цепь автомата гашения поля.

Используя (4-30), легко найти, что при $\sigma=0$ ток в обмотке возбуждения мгновенно падает до

$$i_{f|0|} = \frac{T_{f0}}{T_{1d0} + T_{f0}} i_{f0}, \quad (8-66)$$

а затем затухает по экспоненте с постоянной времени $T_{\text{гаш}}$. В демпферной обмотке, напротив, ток мгновенно возрастает до

$$i_{1d|0|} = \frac{T_{1d0}}{T_{1d0} + T_{f0}} i_{f0}, \quad (8-67)$$

а далее затухает с той же закономерностью.

Поскольку в действительности $\sigma > 0$ и соответственно $T''_d > 0$, внезапных изменений токов не происходит. Они сглаживаются быстрозатухающими токами i''_f и i''_{1d} .

Протекание рассматриваемого процесса иллюстрируют кривые рис. 8-15,а. Их построение сделано при тех же условиях, что и на рис. 8-11, но при дополнительном участии демпферной обмотки с $T_{1d0} = 0,083 T_{f0}$. Несмотря на малую величину T_{1d0} , время гашения возросло до $t_{\text{гаш}} = 1,15 T_{f0}$, т. е. увеличилось в 1,5 раза.

При гашении поля дугогасящей решеткой проявление демпферных обмоток имеет более сложный характер. Весь процесс в данном случае состоит из двух основных стадий: первой, когда в решетке горит дуга и соответственно ток протекает как в обмотке возбуждения, так и в демпферной обмотке, и второй, когда дуга погасла ($i_f = 0$), но ток в демпферной обмотке еще не затух. Следовательно, после разрыва цепи обмотки возбуждения магнитный поток машины поддерживается током демпферной обмотки. По этой причине время гашения поля $t_{\text{гаш}}$ больше времени горения дуги t_d .

Постоянная времени гашения поля (при $\sigma=0$) будет: на первой стадии

$$T_{\text{гаш}1} = T_{1d0} + T_{f0}; \quad (8-68)$$

на второй стадии

$$T_{\text{гаш}2} = T_{1d0}. \quad (8-69)$$

Опуская вывод формул, который при принятых допущениях, вообще говоря, не представляет принципиальных трудностей, дадим окончательные выражения, позволяющие найти токи в обмотках ротора машины, время горе-

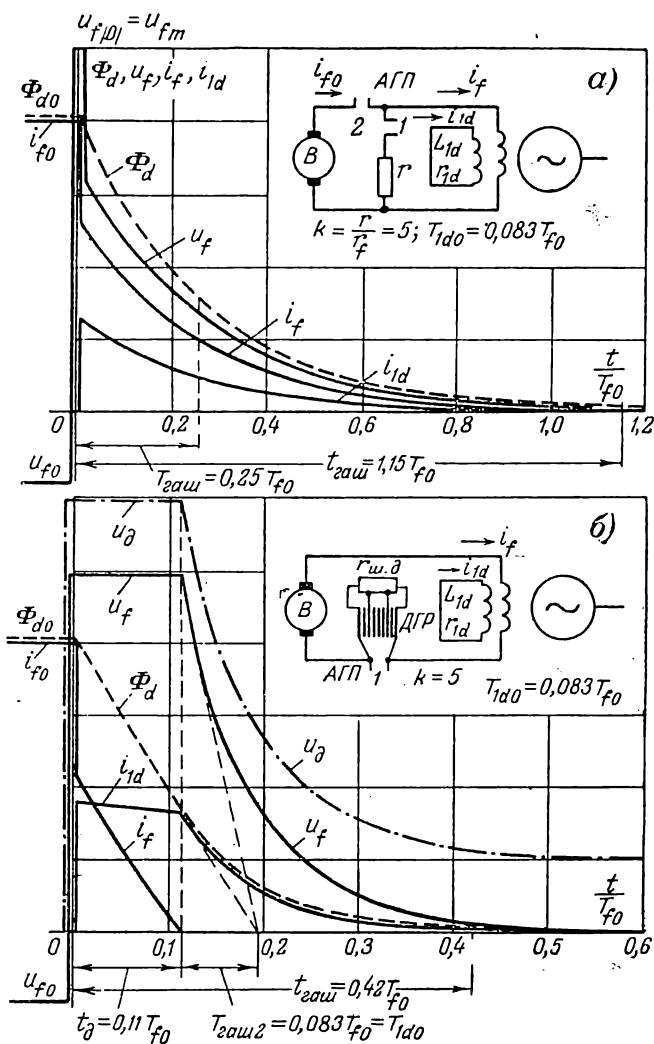


Рис. 8-15. Гашение поля при наличии демпферной обмотки.

а — гашение на постоянное разрядное сопротивление; б — гашение дугогасящей решеткой.

ния дуги и время гашения поля.

Ток в обмотке возбуждения (для $0 \leq t \leq t_d$)

$$i_f = i_{f0} \left[(1+k) \frac{T_{f0}}{T_{1d0} + T_{f0}} e^{-\frac{t}{T_{1d0} + T_{f0}}} - k \right]; \quad (8-70)$$

ток в демпферной обмотке (приведенный к обмотке возбуждения) на первой стадии ($0 \leq t \leq t_d$)

$$i_{1d} = i_{f0} \left[(1+k) \frac{T_{1d0}}{T_{1d0} + T_{f0}} e^{-\frac{t}{T_{1d0} + T_{f0}}} \right]; \quad (8-71)$$

на второй стадии ($t > t_d$)

$$i_{1d} = i_{f0} k \frac{T_{1d0}}{T_{f0}} e^{-\frac{t}{T_{1d0}}}; \quad (8-72)$$

время горения дуги [из (8-70) при $i_f = 0$]

$$t_d = (T_{1d0} + T_{f0}) \ln \left(\frac{1+k}{k} \frac{T_{f0}}{T_{1d0} + T_{f0}} \right); \quad (8-73)$$

время гашения поля

$$t_{\text{гаш}} = t_d + T_{1d0} \ln \left(Nk \frac{T_{1d0}}{T_{f0}} \right). \quad (8-74)$$

Изменение магнитного потока Φ_d на первой стадии гашения определяется изменением н. с. ротора, т. е. суммы приведенных токов обмотки возбуждения и демпферной обмотки, что приводит к выражению

$$\Phi_d = \Phi_{d0} \left[(1+k) e^{-\frac{t}{T_{1d0} + T_{f0}}} - k \right], \quad (8-75)$$

а на второй стадии—изменением только тока в демпферной обмотке, т. е.

$$\Phi_d = \Phi_{d0} k \frac{T_{1d0}}{T_{f0}} e^{-\frac{t}{T_{1d0}}}. \quad (8-76)$$

На рис. 8-15,б приведены кривые изменения отдельных величин при гашении поля дугогасящей решеткой. Они построены для тех же исходных условий, что и кривые рис. 8-14; но добавлена лишь демпферная обмотка с указанными выше параметрами. Сравнение показы-

вает, что, хотя время горения дуги сократилось, время гашения поля возросло почти в 2,5 раза. Из этого примера наглядно следует, что демпферные обмотки существенно снижают эффективность гашения поля дугогасящей решеткой и, естественно, тем сильнее, чем больше их постоянная времени T_{1d0} . Поэтому у турбогенераторов это сказывается гораздо больше, чем у гидрогенераторов.

Известным приемом нахождения экстремума функции из (8-74) легко установить, что минимум времени гашения наступает при $k = \frac{T_{f0}}{T_{1d0}}$. При этом, как следует из (8-73), время горения дуги $t_d = 0$, т. е. в данном случае дуга гаснет сразу и весь процесс гашения поля определяется затуханием тока только демпферной обмотки. В соответствии с этим получается, что никакого поглощения энергии дугогасящей решеткой не имеет места. Такой результат противоречит физике явления. Он явился следствием того, что (8-73) получено при отсутствии рассеяния ($\sigma = 0$).

Для правильной оценки продолжительности горения дуги в данном случае следует использовать энергетический баланс.

В дугогасительной решетке выделяется энергия, запасенная полем рассеяния обмотки возбуждения,

$$W = \frac{1}{2} L_{\sigma f} i_{f0}^2 = \frac{1}{2} \sigma_f L_f i_{f0}^2 = \frac{1}{2} \frac{x_{\sigma f}}{x_f} T_{f0} r_f i_{f0}^2 \quad (8-77)$$

и энергия, доставляемая возбудителем за время горения дуги. Последняя составляющая относительно мала и ею можно пренебречь.

С достаточной точностью можно считать, что ток в обмотке возбуждения при горении дуги снижается по линейному закону. Поэтому энергия, поглощаемая решеткой за время горения дуги, будет

$$W_d = \frac{1}{2} u_d i_{f0} t_d = \frac{1}{2} (1+k) u_{f0} i_{f0} t_d. \quad (8-78)$$

Из последнего равенства, найдем время горения дуги:

$$t_d = \frac{1}{(1+k)} \cdot \frac{x_{\sigma f}}{x_f} T_{f0}. \quad (8-79)$$

Этим выражением следует пользоваться для определения t_d при значениях k , близких к T_{f0}/T_{1d0} .

Отметим, что у гидрогенераторов отношение T_{f0}/T_{1d0} обычно велико (достигает нескольких десятков), поэтому определяющим при выборе значения k является величина допустимого напряжения. У турбогенераторов это отношение, напротив, невелико (порядка 2—5), что позволяет для сокращения времени гашения выбрать значение k равным или близким к значению отношения T_{f0}/T_{1d0} . В силу указанных причин при гашении поля у турбогенераторов время горения дуги в решетке, как правило, значительно меньше, чем при гашении поля гидрогенераторов. Однако из-за влияния демпферных обмоток общая продолжительность гашения поля турбогенераторов больше, чем у гидрогенераторов.

До сих пор предполагалось, что гашение поля осуществляется при работе машины на холостом ходу, т. е. при разомкнутой цепи статора. Однако все полученные выше уравнения и формулы легко распространить на случай, когда статор короткозамкнут. Для этого достаточно в полученные выше формулы ввести вместо постоянных времени T_{f0} и T_{1d0} их значения при замкнутом статоре, которые, как известно (см. гл. 7), составляют:

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

и

$$T'_{1d} = T_{1d0} \left(1 - \frac{x_{ad}^2}{x_{1d} x_d} \right).$$

Поскольку при замкнутом статоре постоянные времени обмоток ротора меньше, процесс гашения поля в этих условиях протекает быстрее. Сокращение времени гашения по сравнению со значением его при гашении на холостом ходу составляет: для турбогенераторов — приблизительно в 10 раз и для гидрогенераторов — в 3 раза. Нужно иметь в виду, что при гашении поля в условиях короткого замыкания предшествующий ток в обмотке возбуждения может включать в себя не только вынужденную, но и свободную составляющие. Равным образом и в демпферных обмотках могут быть обе эти составляющие тока предшествующего режима.

Существенное влияние на количественную оценку отдельных величин при гашении поля может иметь насыщение магнитной системы машины. Для знакомства с учетом этого фактора читатель должен обратиться к специальной литературе [Л. 72].

При ионном возбуждении гашение поля осуществляют путем перевода выпрямительной установки в инверторный режим. При этом условия гашения поля могут быть созданы близкими к оптимальным.

Для иллюстрации процессов гашения поля на рис. 8-16 приведено несколько характерных осциллограмм этих процессов у различных генераторов¹. Обращает на себя внимание то, что при гашении с помощью решетки, а также инвертированием выпрямительной установки характер изменения тока i_f очень близок к прямолинейному, соответствующему оптимальным условиям гашения. Продолжительность вхождения дуги в решетку, как видно, составляет сотые доли секунды.

Опыты гашения поля машин на постоянное разрядное сопротивление часто используют для определения постоянных времени обмотки возбуждения и демпферной обмотки. В самом деле, произведя опыт гашения поля один раз при замыкании обмотки возбуждения накоротко ($k=0$), а другой—при замыкании на известное разрядное сопротивление (k) и определив по осциллограммам напряжения статора в обоих случаях постоянные времени гашения $T_{\text{гаш } k=0}$ и $T_{\text{гаш } k}$, можно в соответствии с (8-64) написать:

$$\begin{aligned} \text{и} \quad T_{\text{гаш } k=0} &= T_{1d0} + T_{f0} \\ T_{\text{гаш } k} &= T_{1d0} + T_{f0} \frac{1}{1+k}, \end{aligned}$$

откуда искомые величины будут:

$$T_{f0} = (T_{\text{гаш } k=0} - T_{\text{гаш } k}) \frac{1+k}{k} \quad (8-80)$$

$$\text{и} \quad T_{1d0} = [T_{\text{гаш } k} (1+k) - T_{\text{гаш } k=0}] \frac{1}{k}. \quad (8-81)$$

Если опыты проводят не на холостом ходу, а при закороченном статоре, то постоянные времени гашения

¹ Осциллограммы заимствованы из [Л. 72].

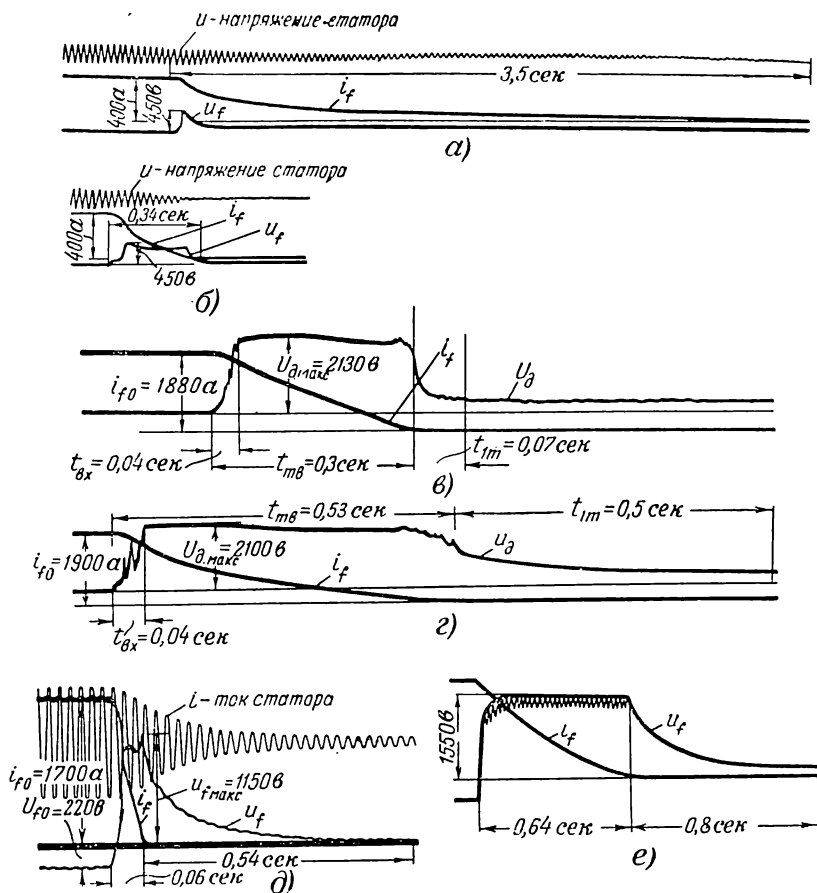


Рис. 8-16. Осциллограммы гашения поля.

а — генератора 4,5 Мва, разряд на постоянное активное сопротивление; б — то же, разряд на дугогасящую решетку; в — гидрогенератора 105 Мвт, разряд на дугогасящую решетку, при коротком замыкании с номинальным возбуждением; г — то же при холостом ходе; д — турбогенератора 200 Мвт, разряд на дугогасящую решетку при коротком замыкании; е — гидрогенератора 105 Мвт при нонном возбуждении на холостом ходу.

определяют по осциллограммам тока статора; при этом из последних выражений находят значения $T'_{f'}$ и T'_{1d} , по которым не представляет труда определить значения постоянных времени T_{f0} и T_{1d0} .

В табл. 8-2 приведены краткие сведения по автоматам гашения поля с дугогасящей решеткой, выпускаемым заводом «Электросила». Автомат АГП-1 включает

ся в один из полюсов цепи возбуждения. Автоматы новой серии (АГП-3 и др.) могут быть включены как в один, так и в оба полюса цепи возбуждения. Последнее осуществляют главным образом у крупных машин; при этом число пластин дугогасящей решетки удваивается и соответственно в 2 раза возрастает суммарное напряжение на горячей дуге.

Таблица 8-2

Характеристики автоматов гашения магнитного поля

Обозначение типа	Номинальный ток, а	Число пластин	Напряжение на решетке, в	Примечание
АГП-1	2 000	75	2 250	} Новая серия АГП
АГП-3	300	30	900	
АГП-6	600	30	900	
АГП-12	1 200	40	1 200	
АГП-24	2 400	40	1 200	
АГП-40	4 000	40	1 200	

Пример 8-4. Для турбогенератора типа ТВ2-100-2 известны следующие параметры: 100 Мвт, 117 Мва, 13,8 кв; $x_o=0,11$; $x''_d=0,138$; $x'_d=0,203$; $x_d=1,80$; $x_f=1,78$; $x_{1d}=1,73$; $T_{f0}=9,75$ сек; $T_{1d0}=3,25$ сек; $r_f=0,415$ ом (при горячем состоянии обмотки); ток возбуждения при холостом ходе с номинальным напряжением 270 а, то же при номинальной нагрузке 650 а, испытательное напряжение обмотки возбуждения 3 200 в.

Определить время гашения поля этого турбогенератора при использовании: а) постоянного разрядного сопротивления и б) дугогасящей решетки.

Решение выполнить для условий, когда статор замкнут накоротко и возбуждение имеет двухкратную форсировку (относительно номинального режима). В обоих случаях должно соблюдаться соотношение $u_{fm} \approx U_{доп}$.

а) Гашение на разрядное сопротивление

Напряжение на кольцах ротора в предшествующем режиме $u_{f0}=0,415(2 \cdot 650)=540$ в. Допустимое напряжение $U_{доп}=0,7 \cdot 3\,200=2\,240$ в. Допустимое разрядное сопротивление $r=\frac{2\,240}{540}r_f=4,15r_f$.

Постоянные времени при замкнутом статоре:

$$T'_f=9,75 \frac{0,203}{1,80}=1,1 \text{ сек}; T'_{1d}=3,25 \left(1 - \frac{1,69^2}{1,73 \cdot 1,80}\right)=0,27 \text{ сек (здесь } x_{ad}=1,80 - 0,11=1,69).$$

Постоянная времени гашения поля

$$T_{\text{гаш}} = 0,27 + 1,1 \frac{1}{4,15 + 1} = 0,48 \text{ сек.}$$

Ток возбуждения, при котором гаснет дуга переменного тока,

$$i_{j \text{ гаш}} = 270 \frac{150}{13800} = 3 \text{ а.}$$

Следовательно, $N = (2 \cdot 650)/3 = 434$ и время гашения

$$t_{\text{гаш}} = 0,48 \ln 434 = 2,9 \text{ сек.}$$

б) Гашение на дугогасящую решетку

Допустимое напряжение на решетке:

$$u_d = U_{\text{доп}} + u_{f0} = 2240 + 540 = 2780 \text{ в.}$$

Необходимое число пластин в решетке $n = \frac{2780}{30} = 93$.

В соответствии с табл. 8-2 принимаем два автомата АГП-12, считая их включенными в каждый полюс цепи возбуждения. При этом число пластин будет $2 \cdot 40 = 80$, напряжение на решетке $u_d = 30 \cdot 80 = 2400 \text{ в}$ и значение $k = \frac{2400 - 540}{540} = 3,4$.

Постоянные времени гашения:

при горении дуги $T_{\text{гаш}1} \approx 0,27 + 1,1 = 1,37 \text{ сек};$

после ее погасания $T_{\text{гаш}2} = 0,27 \text{ сек.}$

Время горения дуги [по (8-79) с учетом того, что статор короткозамкнут]

$$t_d = \frac{1}{1 + 3,4} \cdot \frac{0,09}{1,78} \cdot 1,1 = 0,013 \text{ сек};$$

время гашения поля [по (8-74) с учетом того, что статор короткозамкнут]

$$t_{\text{гаш}} = 0,013 + 0,27 \ln \left(325 \cdot 3,4 \frac{0,27}{1,10} \right) = 1,53 \text{ сек.}$$

Рекомендуем читателю самостоятельно провести аналогичный расчет при условии, что в предшествующем режиме данный генератор работал на холостом ходу с номинальным напряжением.

Пример 8-5. После обработки осциллограмм напряжения статора, снятых при опытах гашения поля генератора, найдены следующие значения постоянных времени:

$$T_{\text{гаш } k=0} = 6,5 \text{ сек и } T_{\text{гаш } k} = 2,5 \text{ сек при } k = 3.$$

Следовательно, постоянные времени обмотки возбуждения и демпферной обмотки данного генератора по (8-80) и (8-81) будут:

$$T_{f0} = (6,5 - 2,5) \cdot \frac{1 + 3}{3} = 5,3 \text{ сек и } T_{id0} = (2,5 \cdot 4 - 6,5) \cdot \frac{1}{3} = 1,2 \text{ сек.}$$

8-8. ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. Как изменится процесс форсировки возбуждения, если в цепь возбуждения генератора включить последовательно дополнительную индуктивность?

2. Чем объясняется, что напряжение статора при форсировке возбуждения в основном зависит от э. д. с. вращения?

3. В чем и как проявляется влияние демпферных обмоток на процесс форсировки возбуждения?

4. От каких факторов зависит скорость форсировки возбуждения при электромашинах с самовозбуждением и с независимым возбуждением?

5. Как сказывается состояние цепи статора на процессе форсировки возбуждения?

6. Что такое постоянная времени T_e ?

7. Провести решение примера 8-1 для случая, когда $x_d=0,75$ (вместо $x_d=1,0$).

8. Раскрыть неопределенность выражения $F_d(t)$ для случая, когда $T_e=T''_d$.

9. Для генератора известны постоянные времени: обмотки возбуждения — 5 сек, возбудителя — 1 сек и подвозбудителя — 0,5 сек. Демпферные обмотки отсутствуют.

Найти выражения функции $F_d(t)$ для двух условий: а) когда генератор работает на холостом ходу и б) когда статор генератора короткозамкнут; при этом известно, что $x_d=1,0$ и $x'_d=0,2$.

10. В чем проявляется особенность последовательного возбуждения при форсировке возбуждения?

11. Как сказывается компаундирование на протекании электромагнитного переходного процесса в цепи возбуждения синхронной машины?

12. Как осуществляется форсировка нонного возбуждения и как она практически может быть учтена?

13. Какие требования предъявляются к устройству гашения поля синхронной машины?

14. Что называется временем гашения поля?

15. Из каких соображений выбирается величина гасительного сопротивления?

16. Что понимается под оптимальными условиями гашения поля?

17. В чем преимущества дугогасящей решетки по сравнению с постоянным гасительным сопротивлением?

18. Какая схема включения дугогасящей решетки целесообразнее?

19. Как сказывается наличие демпферных обмоток на процессе гашения поля?

20. Провести решение примера 8-4, считая, что $T_{1d0}=2$ сек (вместо 3,25 сек), а все остальные параметры сохранены без изменения.

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

ВНЕЗАПНОЕ КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

9-1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

В настоящей главе рассмотрен электромагнитный переходный процесс в синхронной машине при внезапном трехфазном коротком замыкании. При этом предполагается, что короткое замыкание отсекает рассматриваемую машину от других машин, с которыми она в предшествующем режиме работала параллельно. Другими словами, наличие всех остальных машин системы (как генераторов, так и двигателей или синхронных компенсаторов) не сказывается на протекании переходного процесса данной машины. Внешняя цепь ее статора при коротком замыкании характеризуется некоторым постоянным сопротивлением, преимущественно индуктивным.

Как видно из дальнейшего изложения, даже при принятых значительных упрощениях математические выкладки проводимого анализа рассматриваемого переходного процесса достаточно громоздки, особенно для машины с демпферными обмотками. Дополнительно вводимые допущения (для преодоления ряда математических трудностей в решении) приведены в ходе изложения материала.

Вначале рассматривается переходный процесс при условии, что синхронная машина не имеет автоматического регулирования возбуждения. В дальнейшем (см. § 9-4) введен учет влияния такого регулирования, используя материал, изложенный в гл. 8. Поскольку короткое замыкание является аварийным состоянием машины, автоматическое регулирование возбуждения в данном случае сводится к простой форсировке возбуждения. При этом, как отмечалось ранее, предполагается, что последняя прекращается тотчас же, как только напряжение генератора достигает нормального значения.

Практический интерес представляет протекание процесса при каскадном (или ступенчатом) отключении короткого замыкания и его повторном включении. Этот вопрос применительно к условиям питания от одного источника рассмотрен в конце главы.

9-2. ВНЕЗАПНОЕ КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ БЕЗ ДЕМПФЕРНЫХ ОБМОТОК

При металлическом трехфазном коротком замыкании напряжение каждой фазы в месте короткого $U=0$. Следовательно, приращение напряжения в этой точке при возникновении такого повреждения будет $\Delta U = -U_0$, или в операторной форме $\Delta U(p) = -U_0/p$. Аналогично приращения составляющих этого напряжения будут:

$$\Delta u_d = -u_{d0} \div \Delta u_d(p) = -\frac{u_{d0}}{p}; \quad (9-1)$$

$$\Delta u_q = -u_{q0} \div \Delta u_q(p) = -\frac{u_{q0}}{p}. \quad (9-2)$$

При отсутствии у генератора автоматического регулирования возбуждения $\Delta u_f = 0$. Тогда из (7-64) имеем:

$$\Delta i_f(p) = \frac{-px_{ad}\Delta i_d(p)}{r_f + px_f} = -\frac{x_{ad}\Delta i_d(p)p}{r_f(1 + T_{f0}p)} \quad (9-3)$$

и из (7-65)

$$\Delta \Psi_d(p) = x_d(p) \Delta i_d(p). \quad (9-4)$$

Для рассматриваемого переходного процесса уравнения (7-48) и (7-49) с учетом (7-61) после группировки слагаемых можно представить в виде:

$$\Delta u_d(p) = -\frac{u_{d0}}{p} = -(r + px_d(p)) \Delta i_d(p) - x_q \Delta i_q(p); \quad (9-5)$$

$$\Delta u_q(p) = -\frac{u_{q0}}{p} = x_d(p) \Delta i_d(p) - (r + px_q) \Delta i_q(p), \quad (9-6)$$

откуда приращения токов:

$$\Delta i_d(p) = \frac{u_{d0}(r + px_q) - u_{q0}x_q}{pD(p)}; \quad (9-7)$$

$$\Delta i_q(p) = \frac{u_{q0}(r + px_d(p)) + u_{d0}x_d(p)}{pD(p)}; \quad (9-8)$$

здесь определитель

$$D(p) = (r + px_d(p))(r + px_q) + x_d(p)x_q. \quad (9-9)$$

Раскроем последнее выражение, подставив в него вместо $x_d(p)$ выражение (7-67). После ряда преобразований получим:

$$D(p) = \frac{1}{1 + T_{j0}p} \left\{ x'_d x_q p^3 + \left[x'_d r + x_q \left(\frac{x_d}{T_{j0}} + r \right) \right] p^2 + \right. \\ \left. + \left[x'_d x_q + r \left(\frac{x_d + x_q}{T_{j0}} + r \right) \right] p + \frac{x_d x_q + r^2}{T_{j0}} \right\}. \quad (9-10)$$

Приравняв определитель нулю, получим характеристическое уравнение

$$x'_d x_q p^3 + \left[x'_d r + x_q \left(\frac{x_d}{T_{j0}} + r \right) \right] p^2 + \\ + \left[x'_d x_q + r \left(\frac{x_d + x_q}{T_{j0}} + r \right) \right] p + \frac{x_d x_q + r^2}{T_{j0}} = 0. \quad (9-11)$$

Как видно, оно является полным кубическим уравнением относительно p . Это указывает на то, что каждое из приращений токов (Δi_d , Δi_q) включает в себя три свободные составляющие. Проведенная замена переменных (т. е. переход к осям d , q) позволила свести задачу к решению линейных операторных уравнений с постоянными коэффициентами, однако, разумеется, необходимость определения корней характеристического уравнения все равно осталась, что в общем случае представляет большие трудности. Уже для рассматриваемых условий, которые являются самыми элементарными, требуется решить уравнение третьей степени, что достаточно просто лишь в числовых значениях.

Анализ характеристического уравнения (9-11) приводит к выводу, что при относительно малых значениях r , как это обычно имеет место, корни этого уравнения с достаточной для практики точностью можно определять, принимая поочередно $r_f = 0$ и $r = 0$.

Так, при $r_f = 0$ (или $T_{j0} = \infty$) характеристическое уравнение приобретает более простой вид:

$$[x'_d x_q p^2 + r(x'_d + x_q)p + (x'_d x_q + r^2)]p = 0. \quad (9-12)$$

Его корни соответственно равны:

$$p_{1,2} = - \frac{(x'_d + x_q)r}{2x'_d x_q} \pm j \sqrt{1 - \left[\frac{(x_q - x'_d)r}{2x'_d x_q} \right]^2} \quad (9-13)$$

и

$$p_3 = 0.$$

Два первых корня, как видно, выражаются сопряженными комплексами. Их действительная часть отрицательна, что указывает на затухание соответствующих им свободных токов с постоянной времени

$$T_a = \frac{2x'_d x_q}{r(x'_d + x_q)} = \frac{x_2}{r}, \quad (9-14)$$

где

$$x_2 = \frac{2x'_d x_q}{x'_d + x_q} \quad (9-15)$$

представляет собой реактивность обратной последовательности машины, определяемую как отношение напряжения обратной последовательности основной частоты к току обратной последовательности той же частоты (подробнее см. § 13-2).

Значения мнимых частей этих корней

$$\pm j \sqrt{1 - \left[\frac{(x_q + x'_d) r}{2x'_d x_q} \right]^2} = \pm j \omega_{1,2} \quad (9-16)$$

представляют относительные угловые частоты изменений соответствующих свободных токов, выраженных в осях d, q .

Вычитаемое под радикалом в (9-16) обычно ничтожно мало¹ по сравнению с единицей, что позволяет практически им пренебречь. Тогда вместо (9-13) получим упрощенно:

$$p_{1,2} \approx -\frac{1}{T_a} \pm j. \quad (9-13a)$$

В то время как найденные при $r_f = 0$ значения корней p_1 и p_2 достаточно близки к действительности, значение третьего корня p_3 при том же допущении не отражает истинного характера изменения соответствующей ему свободной составляющей тока. В самом деле, $p_3 = 0$ указывает на то, что эта составляющая тока остается

¹ Например, для машины с $x_q = 0,65$ и $x'_d = 0,30$ снижение относительной угловой частоты на 1% будет при $r = 0,16$, в то время как обмотка статора такой машины средней мощности имеет $r = 0,002$.

неизменной; это противоречит физической сущности рассматриваемого процесса.

Близкое к действительности значение корня p_3 можно получить, полагая $r=0$, но $r_f \neq 0$. При этом (9-11) переходит в простое уравнение:

$$(p^2 + 1)\left(x'_d p + \frac{x_d}{T_{f0}}\right) = 0, \quad (9-17)$$

первые два корня которого получаются чисто мнимыми сопряженными:

$$p_{1,2} = \pm j,$$

а третий корень

$$p_3 = -\frac{x_d}{T_{f0} x'_d}, \quad (9-18)$$

являясь вещественной отрицательной величиной, указывает на то, что отвечающий ему свободный ток затухает по экспоненте с постоянной времени

$$T'_d = -\frac{1}{p_3} = T_{f0} \frac{x'_d}{x_d}, \quad (9-19)$$

выражение для которой уже было получено в § 7-9 [см. (7-73)].

При необходимости значение корня p_3 можно несколько уточнить, введя приближенный учет активного сопротивления цепи статора. Для этого следует пренебречь в (9-11) первыми двумя членами и слагаемым $\frac{x_d + x_q}{T_{f0}}$ в коэффициенте третьего члена. Из полученного упрощенного уравнения находим:

$$p_3 = -\frac{x_d x_q + r^2}{T_{f0}(x'_d x_q + r^2)}; \quad (9-20)$$

соответствующая постоянная времени будет

$$T'_d = T_{f0} \frac{x'_d x_q + r^2}{x_d x_q + r^2}. \quad (9-21)$$

Следует отметить, что несмотря на искусственность и приближенность решения, выражения (9-13) и (9-20) позволяют с вполне достаточной точностью оценить значения корней характеристического уравнения (9-11).

Для иллюстрации на рис. 9-1 приведены кривые изменения p_3 и слагаемых корней p_1 и p_2 в зависимости от r для синхронной машины со следующими параметрами: $x_d=1,0$; $x_q=0,65$; $x'_d=0,30$ и $T_{f0}=5$ сек. Относительная частота свободных токов с ростом r падает и в данном

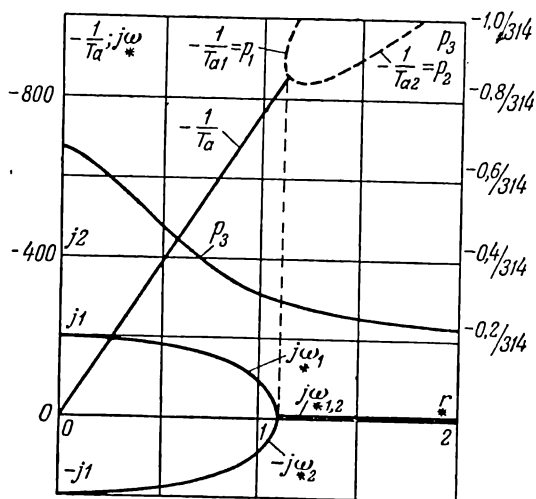


Рис. 9-1. Кривые изменения корней характеристического уравнения в зависимости от активного сопротивления цепи статора.

случае при $r \geq 1,11$ равна нулю. Соответственно при $r \geq 1,11$ действительные части корней p_1 и p_2 изменяются по участкам кривых, проведенным пунктиром.

Когда корни характеристического уравнения определены, то переход от изображений (9-7) и (9-8) к их оригиналам уже не представляет принципиальных трудностей. Для каждого слагаемого этих выражений можно применить известную формулу разложения или формулу включения на постоянные напряжения u_{d0} и u_{q0} . Однако и здесь для упрощения искомых зависимостей представляется возможным без внесения заметной погрешности использовать еще дополнительное допущение. Последнее состоит в следующем: поскольку активные сопротивления ротора и статора машины относительно малы, при определении принужденных токов и начальных значений свободных токов практически мож-

но пренебречь всеми активными сопротивлениями одновременно, а не поочередно, как это делалось при определении корней характеристического уравнения. В этом случае, очевидно, учет активных сопротивлений находит отражение только в значениях соответствующих постоянных времени, характеризующих затухание свободных токов.

При $r=0$ и $r_f=0$ определитель вместо (9-9) будет

$$D(p) = (1+p^2) x'_d x_q \quad (9-22)$$

и выражения (9-7) и (9-8) приобретут простой вид:

$$\Delta i_d(p) = \frac{u_{d0}}{(1+p^2) x'_d} - \frac{u_{q0}}{p(1+p^2) x'_d}; \quad (9-23)$$

$$\Delta i_q(p) = \frac{u_{q0}}{(1+p^2) x_q} + \frac{u_{d0}}{p(1+p^2) x_q}. \quad (9-24)$$

Непосредственно из таблиц преобразования функций по Лапласу имеем:

$$\frac{1}{1+p^2} \doteq \sin t \quad \text{и} \quad \frac{1}{p(1+p^2)} \doteq 1 - \cos t,$$

поэтому оригиналами выражений (9-23) и (9-24) будут:

$$\Delta i_d = \frac{u_{d0}}{x'_d} \sin t - \frac{u_{q0}}{x'_d} (1 - \cos t); \quad (9-25)$$

$$\Delta i_q = \frac{u_{q0}}{x_q} \sin t + \frac{u_{d0}}{x_q} (1 - \cos t). \quad (9-26)$$

Прибавив к полученным приращениям токов предшествующие значения i_{d0} и i_{q0} и принимая во внимание, что

$$E'_{q0} = u_{q0} - x'_d i_{d0} \quad \text{и} \quad u_{d0} = -x_q i_{q0},$$

получим:

$$i_d = -\frac{E'_{q0}}{x'_d} + \frac{u_{d0}}{x'_d} \sin t + \frac{u_{q0}}{x'_d} \cos t; \quad (9-27)$$

$$i_q = \frac{u_{q0}}{x_q} \sin t - \frac{u_{d0}}{x_q} \cos t. \quad (9-28)$$

Далее, используя (7-23), можно перейти от переменных в осях d, q к переменным в фазных осях A, B, C ,

Так, например, для фазы A после ряда преобразований имеем:

$$i_A = \frac{E'_{q0}}{x'_d} \cos(t + \gamma_0) - \frac{u_{q0}(x'_d + x_q)}{2x'_d x_q} \cos \gamma_0 - \\ - \frac{u_{d0}(x'_d + x_q)}{2x'_d x_q} \sin \gamma_0 - \frac{u_{q0}(x_q - x'_d)}{2x'_d x_q} \cos(2t + \gamma_0) + \\ + \frac{u_{d0}(x_q - x'_d)}{2x'_d x_q} \sin(2t + \gamma_0). \quad (9-29)$$

Здесь, как видно, пока еще не учтено затухание свободных токов. В частности, первый член уравнения представляет собой периодическую слагающую основной частоты, амплитуда которой при $r_f=0$ остается постоянной и равной начальному переходному току. Эта слагающая вызвана э. д. с. вращения и ее изменение легко выявить, рассматривая отдельно действие этой э. д. с. при представлении машины ее операторной реактивностью $x_d(p)$. Другими словами, для приращения этой слагающей $\Delta i_{dп}$ в операторной форме получим:

$$\Delta i_{dп}(p) = -\frac{u_{q0}}{p x_d(p)} = -\frac{u_{q0}(1 + T_{f0} p)}{p(x_d + T_{f0} x'_d p)}, \quad (9-30)$$

которое после перехода к оригиналу при значении p , определяемом из (9-18), дает:

$$\Delta i_{dп} = -\frac{u_{q0}}{x_d} - \left(\frac{u_{q0}}{x'_d} - \frac{u_{q0}}{x_d} \right) e^{-t/T'_{f0}}. \quad (9-31)$$

Прибавив предшествующий ток i_{d0} и сделав небольшие преобразования, получим:

$$i_{dп} = \Delta i_{dп} + i_{d0} = -\frac{E_{q0}}{x_d} - \left(\frac{E'_{q0}}{x'_d} - \frac{E_{q0}}{x_d} \right) e^{-t/T'_{f0}}. \quad (9-31a)$$

Полученная закономерность изменения тока $i_{dп}$ в координатах d, q в то же время характеризует изменение огибающей кривой периодической слагающей основной частоты тока статора. Эта слагающая в рассматриваемых условиях (пренебрежение активными сопротивлениями цепи статора и отсутствие замкнутого контура в поперечной оси ротора) является только продольной.

Ее действующее значение в произвольный момент определяется аналогичным выражением, т. е.

$$I_{\text{пт}} = \frac{E_{q0}}{x_d} + \left(\frac{E'_{q0}}{x'_d} - \frac{E_{q0}}{x_d} \right) e^{-t/T'_d} = \\ = I + (I'_{|0|} - I) e^{-t/T'_d} = I + I'_{\text{св}|0|} e^{-t/T'_d}, \quad (9-31б)$$

где $I = \frac{E_{q0}}{x_d}$ — установившийся ток короткого замыкания;
 $\left(\frac{E'_{q0}}{x'_d} - \frac{E_{q0}}{x_d} \right) = I'_{|0|} - I = I'_{\text{св}|0|}$ — начальный свободный переходный ток.

Для мгновенного значения периодической слагающей основной частоты фазы A имеем:

$$i_{\text{п}A} = \left[\frac{E_{q0}}{x_d} + \left(\frac{E'_{q0}}{x'_d} - \frac{E_{q0}}{x_d} \right) e^{-t/T'_d} \right] \cos(t + \gamma_0). \quad (9-32)$$

Остальные члены в (9-29) обусловлены действием трансформаторной э. д. с. и их затухание происходит с постоянной времени T_a , определяемой (9-14).

Таким образом, полное выражение для мгновенного значения тока фазы A с учетом затухания свободных слагающих будет:

$$i_A = \left[\frac{E_{q0}}{x_d} + \left(\frac{E'_{q0}}{x'_d} - \frac{E_{q0}}{x_d} \right) e^{-t/T'_d} \right] \cos(t + \gamma_0) - \\ - [u_{q0} \cos \gamma_0 + u_{d0} \sin \gamma_0] \frac{(x'_d + x_q)}{2x'_d x_q} e^{-t/T_a} - \\ - [u_{q0} \cos(2t + \gamma_0) - u_{d0} \sin(2t + \gamma_0)] \frac{(x_q - x'_d)}{2x'_d x_q} e^{-t/T_a}. \quad (9-33)$$

Здесь первые два члена образуют периодическую слагающую тока основной частоты, третий и четвертый члены — аperiodическую слагающую и, наконец, два последних члена — вторую гармонику тока.

Из структуры (9-33) видно, что вторая гармоника обусловлена несимметрией ротора ($x_q \neq x'_d$). Ее возникновение вызвано аperiodической слагающей тока статора, что непосредственно следует из простых физических представлений. В самом деле, поскольку магнитный поток от аperiodической слагающей токов трех фаз статора практически неподвижен в пространстве, в об-

мотке возбуждения он наводит Э. д. с. синхронной частоты, которая создает в этой обмотке переменный ток той же частоты. В результате возникнет пульсирующий магнитный поток, неподвижный относительно ротора. Чтобы проще и нагляднее представить влияние этого потока на статор, разложим его на два вращающихся в противоположные стороны. Один из них, очевидно, неподвижен относительно статора и частично компенсирует вызвавший его поток, а другой вращается относительно статора с двойной синхронной скоростью и вызывает в нем вторую гармонику тока.

Полученные выражения справедливы при коротком замыкании как на выводах машины, так и в произвольной точке присоединенной сети. В последнем случае под u_{d0} и u_{q0} следует понимать составляющие предшествующего напряжения в рассматриваемой точке короткого замыкания, а к каждой из соответствующих реактивностей машины должна быть прибавлена внешняя реактивность до места короткого. Аналогично и в (9-14) величина r должна включать в себя активное сопротивление внешней цепи до точки короткого. Из выражения для второй гармоники следует, что с увеличением удаленности короткого замыкания величина этой гармоники падает.

Обратимся теперь к обмотке возбуждения. Выражение для тока в ней можно получить, используя соотношение (9-3). Однако при ранее принятых допущениях его можно установить проще.

Для компенсации магнитного потока, созданного током $\Delta i_{dп|0|}$, с целью сохранения в начальный момент предшествующего потокосцепления обмотки возбуждения в последней возникнет свободный ток i_{fa} , начальное значение которого (приведенное к статору) определяется из равенства

$$\overset{\circ}{i}_{fa|0|} x_f = -\Delta i_{dп|0|} x_{ad} = \frac{u_{q0}}{x'_d} x_{ad},$$

откуда

$$\overset{\circ}{i}_{fa|0|} = \frac{x_{ad}}{x_f} \cdot \frac{u_{q0}}{x'_d},$$

или

$$\overset{\circ}{i}_{fa|0|} = \frac{x_d - x'_d}{x_{ad}} \cdot \frac{u_{q0}}{x'_d}. \quad (9-34)$$

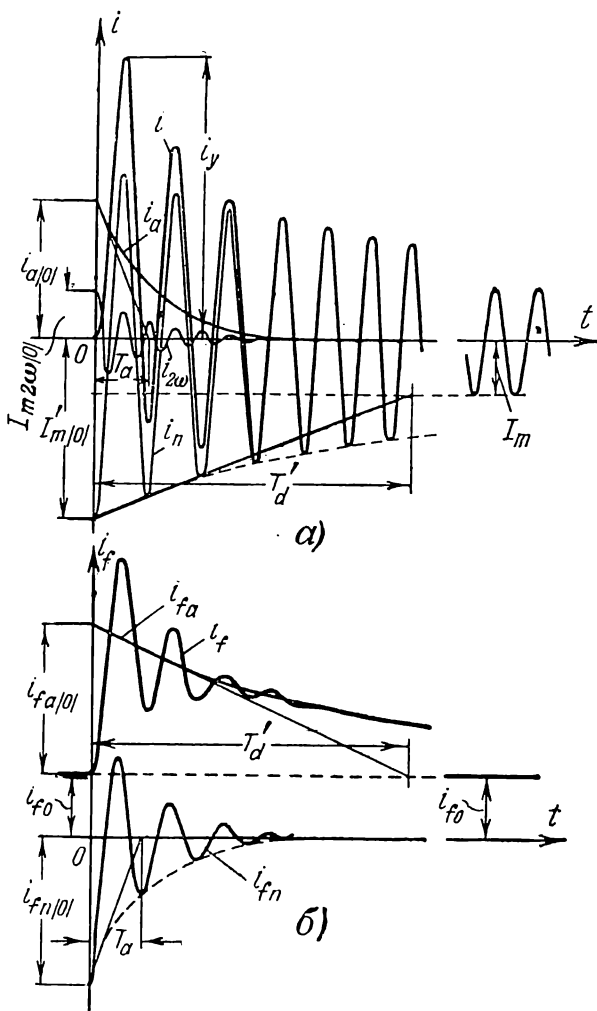


Рис. 9-2. Кривые изменения токов при внезапном коротком замыкании синхронной машины без демпферных обмоток.

а — обмотка статора; б — обмотка возбуждения.

Этот ток обмотки возбуждения, очевидно, затухает с постоянной времени T'_d .

С другой стороны, как отмечалось выше, от апериодической слагающей тока статора в обмотке возбуждения наводится переменный ток практически синхронной частоты, затухающий с постоянной времени T_a . Начальное значение этого тока должно быть равно $\dot{i}_{fa|0|}$, но противоположно ему по знаку, чтобы обеспечить сохранение предшествующего тока в обмотке возбуждения $\dot{i}_{f0}$ в начальный момент короткого замыкания.

Таким образом, выражение для тока в обмотке возбуждения при внезапном коротком замыкании будет

$$\dot{i}_f = \dot{i}_{f0} + \frac{x_d - x'_d}{x_{ad}} \frac{u_{q0}}{x'_d} e^{-t/T'_d} - \frac{x_d - x'_d}{x_{ad}} \cdot \frac{u_{q0}}{x'_d} e^{-t/T_a} \cos t. \quad (9-35)$$

Нужно отметить, что в то время как ток в фазах статора при коротком замыкании зависит от значения начального угла γ_0 , ток в обмотке возбуждения не зависит от него. Это объясняется тем, что свободные токи обмотки возбуждения связаны с результирующими магнитными потоками, образуемыми соответствующими свободными токами фазных обмоток статора, и величины этих потоков не зависят от положения ротора в момент возникновения короткого замыкания.

На рис. 9-2 приведены кривые изменения токов статора и ротора при внезапном коротком замыкании синхронного генератора, предварительно работавшего на холостом ходу. Для большей наглядности кривых основная частота тока резко сокращена. Периодической слагающей тока статора i_{π} соответствует апериодическая слагающая тока обмотки возбуждения i_{fa} , и соответственно апериодическая слагающая тока статора i_a связана с периодической слагающей тока обмотки возбуждения $i_{f\pi}$ и второй гармоникой статора $i_{2\omega}$. Постоянная времени T'_d , как правило, значительно превышает T_a .

Пример 9-1. Для гидрогенератора известны следующие параметры: $x_d = 1,0$; $x_q = 0,6$; $x'_d = 0,15$; $x'_q = 0,3$; $r = 0,005$ и $T_{f0} = 5$ сек.

Написать в численном виде выражения для тока фазы A и тока обмотки возбуждения при внезапном коротком замыкании на выводах генератора, считая, что до короткого замыкания он работал на холостом ходу с номинальным напряжением.

Согласно заданным условиям $E_{q0} = E'_{q0} = u_{q0} = U_n = 1$ и $u_{d0} = 0$. Следовательно, $I'_{|0|} = 1/0,3 = 3,33$ и $I = 1/1 = 1$.

Начальное значение аperiodической слагающей при $\gamma_0 = 0$

$$i_{a|0|} = \frac{u_{q0}(x_q + x'_d)}{2x'_d x_q} = \frac{1(0,6 + 0,3)}{2 \cdot 0,3 \cdot 0,6} = 2,5.$$

Начальное значение второй гармоники при $\gamma_0 = 0$

$$I_{m2\omega} = \frac{u_{q0}(x_q - x'_d)}{2x'_d x_q} = \frac{1(0,6 - 0,3)}{2 \cdot 0,3 \cdot 0,6} = 0,83.$$

Постоянные времени

$$T'_d = 5 \frac{0,3}{1,0} = 1,5 \text{ сек} \text{ и } T_a = \frac{2 \cdot 0,3 \cdot 0,6}{(0,3 + 0,6) \cdot 0,005 \cdot 314} = 0,255 \text{ сек}.$$

Ток фазы A по (9-33) будет

$$i_A = \left(1 + 2,33e^{-\frac{t}{1,5}} \right) \cos(\omega t + \gamma_0) - 2,5e^{-\frac{t}{0,255}} \cos \gamma_0 - \\ - 0,83e^{-\frac{t}{0,255}} \cos(2\omega t + \gamma_0),$$

а ток в обмотке возбуждения (приведенный к статору) по (9-35)

$$i_f = \frac{1}{0,85} + \frac{(1 - 0,3)}{0,85} \cdot \frac{1}{0,3} e^{-\frac{t}{1,5}} - \frac{(1 - 0,3)}{0,85} \cdot \frac{1}{0,3} e^{-\frac{t}{0,255}} \cos \omega t = \\ = 1,18 + 2,75e^{-\frac{t}{1,5}} - 2,75e^{-\frac{t}{0,255}} \cos \omega t.$$

По этим выражениям при $\gamma_0 = \pi$ построены кривые рис. 9-2. Начальная амплитуда второй гармоники в данном случае составляет $\frac{0,83}{3,33} \cdot 100 = 25\%$ начального переходного тока.

Пример 9-2. Определить, какой должна быть удаленность короткого замыкания в предыдущем примере, чтобы начальное значение второй гармоники не превышало 10% начального переходного тока.

Для заданного условия имеем:

$$I_{2\omega|0|} : I'_{|0|} = \frac{(0,6 - 0,3)}{2(0,6 + x_{вн})(0,3 + x_{вн})} : \frac{1}{(0,3 + x_{вн})} \leq 0,1,$$

откуда искомая внешняя реактивность $x_{вн} \geq 0,9$.

9-3. ВНЕЗАПНОЕ КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ синхронной МАШИНЫ С ДЕМПФЕРНЫМИ ОБМОТКАМИ

Установленные в § 7-9 операторные реактивности синхронной машины с демпферными обмотками используем для определения закономерностей, характеризующих электромагнитный переходный процесс при внезапном коротком замыкании. Последовательность нахождения этих закономерностей та же, что и в предыдущем параграфе. Нетрудно убедиться, что при отсутствии автоматического регулирования возбуждения ($\Delta u_f = 0$) выражения для приращений токов $\Delta i_d(p)$ и $\Delta i_q(p)$ аналогичны (9-7) и (9-8), где вместо x_q нужно ввести $x_q(p)$ по (7-76), а реактивность $x_d(p)$ должна быть определена по (7-86) или (7-90), т. е. с учетом продольной демпферной обмотки. Следовательно, для этих приращений токов имеем:

$$\Delta i_d(p) = \frac{u_{d0}(r + px_q(p)) - u_{q0}x_q(p)}{pD(p)}, \quad (9-36)$$

$$\Delta i_q(p) = \frac{u_{q0}(r + px_d(p)) + u_{d0}x_d(p)}{pD(p)}, \quad (9-37)$$

где

$$D(p) = (r + px_d(p))(r + px_q(p)) + x_d(p)x_q(p). \quad (9-38)$$

Каждая дополнительная обмотка на роторе повышает порядок определителя данной системы. Если по осям d и q расположено по одной демпферной обмотке, то p в определителе (9-38) уже достигает пятой степени. При этом решение характеристического уравнения, получающегося от приравнивания определителя нулю, в общем виде невозможно. Достаточно близкое к действительности решение можно получить, так же как и при отсутствии демпферных обмоток, путем поочередного пренебрежения активными сопротивлениями цепей ротора и статора.

При $r_f = r_{1d} = r_{1q} = 0$ (т. е. $T_{f0} = T_{1d0} = T_{1q0} = \infty$) $x_d(p) = x''_d$ и $x_q(p) = x''_q$; характеристическое уравнение приобретает вид (9-12), где вместо x'_d и x_q нужно ввести соответственно x''_d и x''_q . Поэтому корни p_1 и p_2 могут быть определены по выражению (9-13), в котором должна быть произведена такая же замена реактивностей. В част-

ности, постоянная времени затухания свободных токов, определяемых этими корнями, будет

$$T_a = \frac{2x''_d x''_q}{r(x''_d + x''_q)} = \frac{x_2}{r}, \quad (9-39)$$

где

$$x_2 = \frac{2x''_d x''_q}{x''_d + x''_q} \quad (9-40)$$

— реактивность обратной последовательности машины с демпферными обмотками в обеих осях ротора.

Остальные корни находим при $r=0$. В этом случае аналогично (9-17) имеем:

$$(1 + p^2) x_d(p) x_q(p) = 0. \quad (9-41)$$

Следовательно, корни p_3 и p_4 , определяющие изменение свободных токов в обмотках по оси d , находим из $x_d(p) = 0$, а корень p_5 , определяющий изменение свободных токов в обмотках по оси q , — из $x_q(p) = 0$.

В соответствии с (7-90) для нахождения p_3 и p_4 имеем уравнение

$$\sigma' T'_f T'_{1d} p^2 + (T'_f + T'_{1d}) p + 1 = 0, \quad (9-42)$$

которое по структуре, как и следовало ожидать, идентично характеристическому уравнению, получаемому из (4-7) при $z_{11}(p) = 0$. Поэтому согласно (4-8) → (4-11), проведя соответствующую замену индексов у величин, можно написать:

$$p_{3,4} = -\frac{(T'_f + T'_{1d})}{2\sigma' T'_f T'_{1d}} (1 \mp q'), \quad (9-43)$$

где

$$q' = \sqrt{1 - \frac{4\sigma' T'_f T'_{1d}}{(T'_f + T'_{1d})^2}} \quad (9-44)$$

и постоянные времени, определяемые этими корнями:

$$T'_d = -\frac{1}{p_3} = \frac{2}{(1 - q')} \cdot \frac{\sigma' T'_f T'_{1d}}{(T'_f + T'_{1d})} = \frac{1 + q'}{2} (T'_f + T'_{1d}); \quad (9-45)$$

$$T''_d = -\frac{1}{p_4} = \frac{2}{(1 + q')} \cdot \frac{\sigma' T'_f T'_{1d}}{T'_f + T'_{1d}}. \quad (9-46)$$

При относительно малых значениях σ' , как показано в § 4-3, можно допустить приближенное решение

уравнения (9-42), т. е. эти постоянные времени согласно (4-27) и (4-28) определять из выражений:

$$T'_d = -\frac{1}{p_3} \approx T'_f + T'_{1d}; \quad (9-47)$$

$$T''_d = -\frac{1}{p_4} \approx \frac{\sigma' T'_f T'_{1d}}{T'_f + T'_{1d}}. \quad (9-48)$$

Следует отметить, что при достаточно близких коротких замыканиях из-за большой реакции статора его магнитная связь с ротором сильно падает, что приводит к увеличению коэффициента рассеяния σ' ; при этом ошибка от применения приближенных выражений (9-47) и (9-48) возрастает.

Для определения корня p_5 согласно (7-76) имеем:

$$x_q + T_{1q0} x''_q p = 0, \quad (9-49)$$

откуда

$$p = p_5 = -\frac{x_q}{T_{1q0} x''_q} \quad (9-50)$$

и определяемая им постоянная времени

$$T''_q = -\frac{1}{p_5} = T_{1q0} \frac{x''_q}{x_q}; \quad (9-51)$$

Дальнейшее решение можно вести подобно тому, как это сделано для машины без демпферных обмоток (см. § 9-2). Очевидно, выражения для аperiodической слагающей и связанной с ней второй гармоникой тока статора сохраняют тот же вид, что и в (9-33), где лишь x'_d и x_q должны быть заменены соответственно x''_d и x''_q .

Принципиальное различие получается в структуре выражения для периодической слагающей тока статора. Остановимся на выводе этого выражения.

Для приращения продольной слагающей $\Delta i_{dп}(p)$, обусловленной э. д. с. вращения, согласно (9-30) и (7-91) * имеем:

$$\Delta i_{dп}(p) = -\frac{u_{q0}}{p x_d(p)} = -\frac{u_{q0} T'_{d0} T''_{d0} (p - p_{30})(p - p_{40})}{p x_d T'_d T''_d (p - p_3)(p - p_4)}, \quad (9-52)$$

* Индексация корней здесь принята в соответствии с установленной выше, т. е. 1 и 2 заменены 3 и 4.

где $T'_{d0} = -\frac{1}{p_{30}}$ и $T''_{d0} = -\frac{1}{p_{40}}$ — постоянные времени, аналогичные T'_d и T''_d , но при разомкнутом статоре.

После перехода от изображения к оригиналу получим:

$$\begin{aligned} \Delta i_{d\pi} = \Delta i_d + i'_{dсв} + i''_{dсв} = & -\frac{u_{q0}}{x_d} - \\ & -\frac{u_{q0}(T'_{d0} - T'_d)(T'_d - T''_{d0})}{x_d T'_d (T'_d - T''_d)} e^{-t/T'_d} - \\ & -\frac{u_{q0}(T'_{d0} - T''_d)(T''_{d0} - T''_d)}{x_d T''_d (T'_d - T''_d)} e^{-t/T''_d}, \end{aligned} \quad (9-53)$$

где Δi_d — приращение принужденного тока;

$i'_{dсв}$ — свободный переходный ток, затухающий относительно медленно с постоянной времени T'_d ;

$i''_{dсв}$ — свободный сверхпереходный ток, затухающий быстро с постоянной времени T''_d .

Аналогичным образом, используя соотношения (7-81) и (7-82), могут быть получены выражения для свободных токов в продольных контурах ротора. Эти выражения имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} i_{fa} = i'_{fсв} + i''_{fсв} = & \frac{(x_d - x'_d) u_{q0} T_{f0} (T'_d - T_{ld\sigma})}{x_{ad} x_d T'_d (T'_d - T''_d)} e^{-t/T'_d} - \\ & - \frac{(x_d - x'_d) u_{q0} T_{f0} (T''_d - T_{ld\sigma})}{x_{ad} x_d T''_d (T'_d - T''_d)} e^{-t/T''_d} \end{aligned} \quad (9-54)$$

и

$$\begin{aligned} i_{lda} = i'_{ldсв} + i''_{ldсв} = & \frac{x_{ad} u_{q0} T_{ld0} (T'_d - T_{f\sigma})}{x_{ld} x_d T'_d (T'_d - T''_d)} e^{-t/T'_d} - \\ & - \frac{x_{ad} u_{q0} T_{ld0} (T''_d - T_{f\sigma})}{x_{ld} x_d T''_d (T'_d - T''_d)} e^{-t/T''_d}, \end{aligned} \quad (9-55)$$

где $T_{f\sigma} = \frac{x_{\sigma f}}{r_f}$ и $T_{ld\sigma} = \frac{x_{\sigma ld}}{r_{ld}}$ — постоянные времени обмотки возбуждения и продольной демпферной обмотки, обусловленные их полями рассеяния.

Каждый из этих токов, как видно, состоит из свободных токов $i'_{fсв}$, $i''_{fсв}$ и $i'_{ldсв}$, $i''_{ldсв}$, затухающих с постоянными времени T'_d и T''_d . В зависимости от соотно-

щений между T''_d , $T_{f\sigma}$ и $T_{ld\sigma}$ токи i''_{fcb} и i''_{1dcb} могут иметь тот или иной знак. Обычно ток i''_{fcb} противоположен току i'_{fcb} , а i''_{1dcb} совпадает с i'_{1dcb} .

Нетрудно убедиться, что при отсутствии продольной демпферной обмотки (т. е. $T''_{d0} = T''_d = T_{ld\sigma} = 0$) выражение (9-55) дает $i_{1da} = 0$, а (9-53) и (9-54) переходят соответственно в (9-31) и (9-34).

В ненасыщенной машине рассматриваемые свободные токи статора и ротора (приведенные к статору) в произвольный момент времени связаны соотношениями

$$(i'_{fcb} + i'_{1dcb}) x_{ad} + i'_{dcv} x_d = 0$$

и

$$(i''_{fcb} + i''_{1dcb}) x_{ad} + i''_{dcv} x_d = 0.$$

Сложив (9-53) с предшествующим током i_{d0} , получим выражение для тока i_{dp} , которое, как указывалось в § 9-2, идентично выражению для действующего значения продольной периодической слагающей тока статора (или огибающей кривой этой слагающей тока). Последнее имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} I_{dp} &= \frac{E_{q0}}{x_d} + \frac{U_{q0}}{x_d} \frac{(T'_{d0} - T'_d)(T'_d - T''_{d0})}{T'_d(T'_d - T''_d)} e^{-t/T'_d} + \\ &+ \frac{U_{q0}}{x_d} \cdot \frac{(T'_{d0} - T''_d)(T''_{d0} - T''_d)}{T'_d(T'_d - T''_d)} e^{-t/T'_d} = \\ &= I_d + I'_{dcv|0} e^{-t/T'_d} + I''_{dcv|0} e^{-t/T'_d}, \quad (9-53a) \end{aligned}$$

где $I_d = \frac{E_{q0}}{x_d}$ — установившийся ток короткого замыкания;

$I'_{dcv|0} = \frac{U_{q0}}{x_d} \cdot \frac{(T'_{d0} - T'_d)(T'_d - T''_{d0})}{T'_d(T'_d - T''_d)}$ — начальный свободный переходный ток;

$I''_{dcv|0} = \frac{U_{q0}}{x_d} \cdot \frac{(T'_{d0} - T''_d)(T''_{d0} - T''_d)}{T''_d(T'_d - T''_d)}$ — начальный свободный сверхпереходный ток.

На рис. 9-3 приведены кривые изменения рассматриваемых токов при внезапном коротком замыкании на

выводах синхронной машины. Для сравнения там же показаны кривые при отсутствии демпферной обмотки¹.

Влияние продольной демпферной обмотки сказывается как на величине тока I_{dnt} , так и на характере его изменения. В течение всего нестационарного процесса он несколько больше, причем в начальной стадии его затухание происходит быстрее, а затем медленнее, чем при отсутствии продольной демпферной обмотки. Это влияние идентично тому, которое оказывает замкнутая обмотка, магнитно связанная с другими обмотками (см. § 4-2).

Важно отметить, что величина $I'_{d|0|}$ зависит от того, имеется ли у машины продольная демпферная обмотка или нет, в то время как величина $i'_{f|0|}$ в обоих случаях практически одинакова. Для большей наглядности произведем незначительные упрощения выражения (9-53а), пренебрегая величинами T''_{d0} и T''_{d0} в разностях с T'_d и T'_{d0} . С учетом (7-92) и (9-47) оно будет:

$$I_{dnt} = \frac{E_{q0}}{x_d} + \left(\frac{E'_{q0}}{x'_{d(1d)}} - \frac{E_{q0}}{x_d} \right) e^{-t/T'_d} + \\ + \left(\frac{E''_{q0}}{x''_d} - \frac{E'_{q0}}{x'_{d(1d)}} \right) e^{-t/T'_d}, \quad (9-56)$$

где

$$x'_{d(1d)} = x_d \frac{T'_d}{T'_{d0}} \approx x_d \frac{T'_f + T'_{1d}}{T'_{f0} + T'_{1d0}} = x'_d \frac{1 + T'_{1d}/T'_f}{1 + T'_{1d0}/T'_{f0}}. \quad (9-57)$$

Следовательно, при определении начального переходного тока $I'_{d|0|} = E'_{q0}/x'_{d(1d)}$ здесь используется x'_d с поправкой на влияние продольной демпферной обмотки, причем эта поправка зависит от удаленности короткого замыкания. Она всегда меньше единицы и обычно находится в пределах

$$x'_{d(1d)} = (0,9 \div 1,0) x'_d.$$

Чем меньше T'_{1d0} по сравнению с T'_{f0} , тем ближе $x'_{d(1d)}$ к x'_d , и если пренебречь T'_{1d} по сравнению с T'_f , то в соответствии с (9-47), (9-48) и (9-57) получим:

$$T'_d \approx T'_f; \quad (9-58)$$

¹ Относящиеся к данному случаю величины отмечены на рис. 9-3 дополнительным индексом б/д.о.

$$T''_d \approx \sigma' T'_{1d}; \quad (9-59)$$

$$x'_{d(1d)} \approx x'_d, \quad (9-60)$$

и тогда вместо (9-56) имеем:

$$I_{dпт} = \frac{E_{q0}}{x_d} + \left(\frac{E'_{q0}}{x'_d} - \frac{E_{q0}}{x_d} \right) e^{-t/T'_d} + \left(\frac{E''_{q0}}{x''_d} - \frac{E'_{q0}}{x'_d} \right) e^{-t/T''_d}, \quad (9-61)$$

откуда следует, что наличие продольной демпферной обмотки сказывается лишь в том, что к свободному переходному току $I'_{dсв}$, который имеет место при отсутствии демпферной обмотки, достаточно прибавить свободный сверхпереходный ток $I''_{dсв}$, затухание которого обусловлено активным сопротивлением только демпферной обмотки.

Однако такая упрощенная запись тока $I_{dп}$ и ее трактовка находятся в противоречии с физикой явления, что нужно иметь в виду во избежание неправильных представлений. В самом деле, как известно, магнитная связь между обмоткой возбуждения и продольной демпферной обмоткой исключает какое-либо независимое изменение тока в каждой из них. Ток статора $I_{dп}$ отражает совместное действие токов в обмотках по продольной оси ротора. При этом оказывается, что когда $T_{1d0} \ll T_{f0}$, изменение тока $I'_{dсв}$ зависит главным образом от обмотки возбуждения, а изменение тока $I''_{dсв}$ — от продольной демпферной обмотки. Именно в силу преобладающего влияния каждой из обмоток на изменение только одного из свободных токов практически представляется возможным при $T_{1d0} \ll T_{f0}$ использовать выражение (9-61). Оно вполне пригодно для явнополюсных машин (гидрогенераторов), у которых обычно $T_{1d0} = (0,04 \div 0,1) T_{f0}$. Для турбогенераторов, где приблизительно $T_{1d0} = (0,2 \div 0,5) T_{f0}$, оно дает большую погрешность¹.

Для приращения поперечной слагающей в операторной форме $\Delta i_{qp}(p)$ аналогично (9-30) и в соответствии с (7-76) имеем:

$$\Delta i_{qp}(p) = \frac{u_{d0}}{p x_q(p)} = \frac{u_{d0}(1 + T_{1q0}p)}{p(x_q + T_{1q0}x''_qp)}, \quad (9-62)$$

¹ В большинстве литературных источников обычно приводится упрощенное выражение (9-61) без должной оговорки его применимости и условности физической интерпретации. Полная четкость и ясность в этот вопрос внесены Л. Г. Мамиконянцем [Л. 75].

откуда после перехода к оригиналу при значении p , определяемом по (9-50), получим:

$$\Delta i_{qп} = \Delta i_q + i''_{qсв} = \frac{u_{d0}}{x_q} + \left(\frac{u_{d0}}{x''_q} - \frac{u_{d0}}{x_q} \right) e^{-t/T''_q}. \quad (9-63)$$

Чтобы получить полные величины продольной и поперечной периодических слагающих, нужно к найденным приращениям $\Delta i_{dп}$ и $\Delta i_{qп}$ прибавить предшествующие токи i_{d0} и i_{q0} , что дает:

$$i_{dп} = -\frac{E_{q0}}{x_d} + i'_{dсв} + i''_{dсв} \quad (9-64)$$

и

$$i_{qп} = i''_{qсв}. \quad (9-65)$$

Наконец, используя (7-23), найдем выражение для периодической слагающей тока фазы А:

$$i_{пА} = i_{dп} \cos(t + \gamma_0) + i_{qп} \sin(t + \gamma_0). \quad (9-66)$$

В соответствии с указанным выше для тока фазы А аналогично (9-33) можно написать:

$$\begin{aligned} i_A = i_{пА} - [u_{q0} \cos \gamma_0 + u_{d0} \sin \gamma_0] \frac{x''_d + x''_q}{2x''_d x''_q} e^{-t/T_a} - \\ - [u_{q0} \cos(2t + \gamma_0) - u_{d0} \sin(2t + \gamma_0)] \frac{x''_q - x''_d}{2x''_d x''_q} e^{-t/T_a}. \end{aligned} \quad (9-67)$$

Для токов в контурах ротора имеем:

$$i_f = i_{f0} + i'_{fсв} + i''_{fсв} - (i'_{fсв|0|} + i''_{fсв|0|}) e^{-t/T_a} \times \times \cos t; \quad (9-68)$$

$$i_{1d} = i'_{1dсв} + i''_{1dсв} - (i'_{1dсв|0|} + i''_{1dсв|0|}) e^{-t/T_a} \cos t; \quad (9-69)$$

$$i_{1q} = i''_{1qсв} - i''_{1qсв|0|} e^{-t/T_a} \cos t. \quad (9-70)$$

При расчете короткого замыкания в произвольной точке присоединенной сети нужно ко всем реактивностям статора прибавить внешнюю реактивность до точки короткого. При этом под u_{d0} и u_{q0} следует понимать составляющие предшествующего напряжения в рассматриваемой точке короткого замыкания.

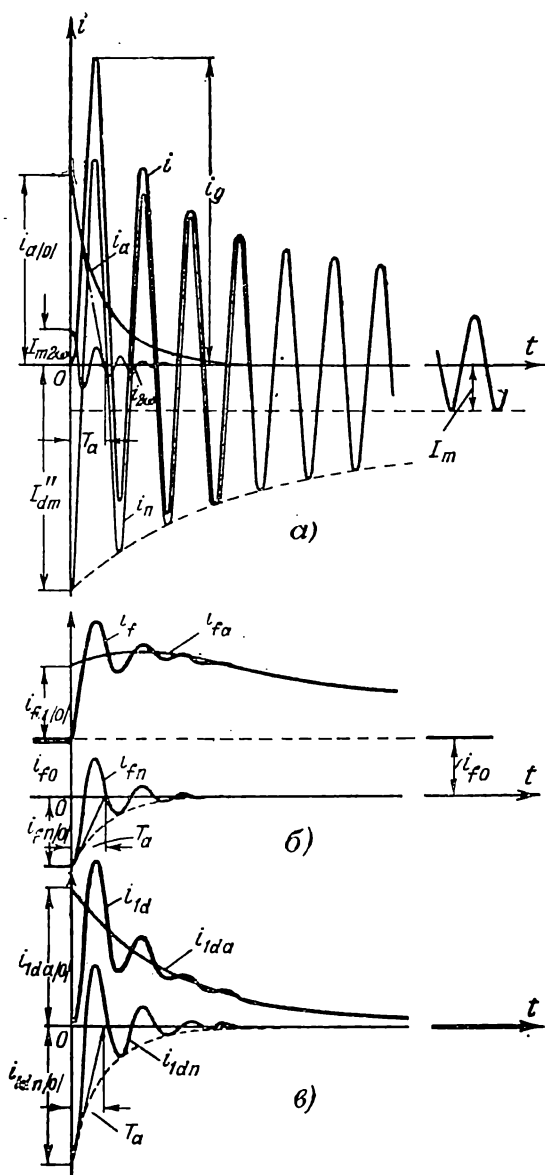


Рис. 9-4. Кривые изменения токов при внезапном коротком замыкании синхронной машины с демпферными обмотками.

а — обмотка статора; б — обмотка возбуждения; в — продольная демпферная обмотка.

На рис. 9-4 приведены осциллограммы токов статора и ротора и их отдельных слагающих при внезапном коротком замыкании синхронного генератора, предварительно работавшего на холостом ходу. Чтобы не усложнять иллюстрации, периодическая слагающая тока статора и связанные с ней аperiodические слагающие токов ротора даны без разложения.

Демпферные обмотки в обеих осях ротора обычно уменьшают его электромагнитную несимметрию при переходном процессе, т. е. различие между x''_d и x''_q обычно меньше, чем между x'_d и x_q , что приводит к уменьшению второй гармоники. У турбогенераторов (где $x''_d \approx x''_q$) эта гармоника почти совсем отсутствует.

Пример 9-3. Предполагается, что у генератора, параметры которого приведены в примере 9-1, в обеих осях ротора созданы демпферные обмотки с параметрами $x_{1d}=0,95$ и $T_{1d0}=2$ сек, $x_{1q}=0,7$ и $T_{1q0}=1,4$ сек.

Составить численные выражения для тока фазы А и токов в контурах ротора при внезапном коротком замыкании на выводах, считая, что до короткого замыкания генератор работал на холостом ходу с номинальным напряжением.

Находим недостающие реактивности генератора:

$$x_{ad} = x_d - x_\sigma = 1 - 0,15 = 0,85; \quad x_f = \frac{x_{ad}^2}{x_d - x'_d} = \frac{0,85^2}{1 - 0,3} = 1,03;$$

$$x_{cf} = x_f - x_{ad} = 1,03 - 0,85 = 0,18; \quad x_{\sigma 1d} = x_{1d} - x_{ad} = \\ = 0,95 - 0,85 = 0,1;$$

$$x''_d = x_\sigma + (x_{ad} \parallel x_{cf} \parallel x_{\sigma 1d}) = 0,15 + (0,85 \parallel 0,18 \parallel 0,1) = 0,21;$$

$$x_{aq} = x_q - x_\sigma = 0,6 - 0,15 = 0,45; \quad x''_q = x_q - \frac{x_{aq}^2}{x_{1q}} = \\ = 0,6 - \frac{0,45^2}{0,7} = 0,31;$$

$$x_2 = \frac{2x''_d x''_q}{x''_d + x''_q} = \frac{2 \cdot 0,21 \cdot 0,31}{0,21 + 0,31} = 0,25;$$

$$x'_{ad} = x_{ad} \parallel x_\sigma = 0,85 \parallel 0,15 = 0,13;$$

$$x'_{cf} = x_{cf} + x'_{ad} = 0,18 + 0,13 = 0,31; \quad x'_{1d} = x_{\sigma 1d} + x'_{ad} = \\ = 0,1 + 0,13 = 0,23.$$

Коэффициент рассеяния и постоянные времени:
при разомкнутом статоре

$$\sigma_0 = 1 - \frac{x_{ad}^2}{x_f x_{1d}} = 1 - \frac{0,85^2}{1,03 \cdot 0,95} = 0,26;$$

$$q_0 = \sqrt{1 - \frac{4\sigma_0 T_{f0} T_{1d0}}{(T_{f0} + T_{1d0})^2}} = \sqrt{1 - \frac{4 \cdot 0,26 \cdot 5 \cdot 2}{(5 + 2)^2}} = 0,89;$$

$$T'_{d0} = \frac{1 + q_0}{2} (T_{f0} + T_{1d0}) = \frac{1 + 0,89}{2} (5 + 2) = 6,6 \text{ сек};$$

$$T''_{d0} = T_{f0} + T_{1d0} - T'_{d0} = 5 + 2 - 6,6 = 0,4 \text{ сек};$$

при коротком замыкании:

$$\sigma' = 1 - \frac{x_{ad}'^2}{x_f' x_{1d}'} = 1 - \frac{0,13^2}{0,23 \cdot 0,31} = 0,77;$$

$$T'_f = T_{f0} \frac{x_f'}{x_f} = 5 \frac{0,31}{1,03} = 1,5 \text{ сек};$$

$$T'_{1d} = T_{1d0} \frac{x_{1d}'}{x_{1d}} = 2 \frac{0,23}{0,95} = 0,48 \text{ сек};$$

$$q' = \sqrt{1 - \frac{4\sigma' T_f' T_{1d}'}{(T_f' + T_{1d}')^2}} = \sqrt{1 - \frac{4 \cdot 0,77 \cdot 1,5 \cdot 0,48}{(1,5 + 0,48)^2}} = 0,66;$$

$$T'_d = \frac{1 + q'}{2} (T_f' + T_{1d}') = \frac{1 + 0,66}{2} (1,5 + 0,48) = 1,64 \text{ сек};$$

$$T''_d = T_f' + T_{1d}' - T'_d = 1,5 + 0,48 - 1,64 = 0,34 \text{ сек};$$

$$T_a = \frac{x_2}{r} \cdot \frac{1}{\omega} = \frac{0,25}{0,005} \cdot \frac{1}{314} = 0,16 \text{ сек}.$$

В соответствии с заданными условиями $E_{q0} = U_{q0} = 1$ и $U_{d0} = 0$. Следовательно, установившийся ток $I = \frac{E_{q0}}{x_d} = \frac{1}{1} = 1$.

По (9-53а) начальные значения свободных токов статора:

$$I'_{dсв|0|} = \frac{1(6,6 - 1,64)(1,64 - 0,4)}{1 \cdot 1,64 \cdot (1,64 - 0,34)} = 2,88;$$

$$I''_{dсв|0|} = \frac{1(6,6 - 0,34)(0,4 - 0,34)}{1 \cdot 0,34(1,64 - 0,34)} = 0,88.$$

Определив предварительно $T_{f\sigma} = T_{f0} \frac{x_{\sigma f}}{x_f} = 5 \frac{0,18}{1,03} = 0,87 \text{ сек}$

и $T_{1d\sigma} = T_{1d0} \frac{x_{\sigma 1d}}{x_{1d}} = 2 \frac{0,10}{0,95} = 0,21 \text{ сек}$, найдем из (9-54) и (9-55)

начальные значения свободных токов в продольных контурах ротора:

$$\begin{aligned} i'_{fсв | 0|} &= \frac{(1 - 0,3) \cdot 1,5 (1,64 - 0,21)}{0,85 \cdot 1 \cdot 1,64 (1,64 - 0,34)} = 2,76; \\ i''_{fсв | 0|} &= - \frac{(1 - 0,3) \cdot 1,5 (0,34 - 0,21)}{0,85 \cdot 1 \cdot 0,34 (1,64 - 0,34)} = -1,17; \\ i'_{1dсв | 0|} &= \frac{0,85 \cdot 1 \cdot 2 (1,64 - 0,87)}{0,95 \cdot 1 \cdot 1,64 (1,64 - 0,34)} = 0,64; \\ i''_{1dсв | 0|} &= - \frac{0,85 \cdot 1 \cdot 2 (0,34 - 0,87)}{0,95 \cdot 1 \cdot 0,34 (1,64 - 0,34)} = 2,22. \end{aligned}$$

Правильность произведенных подсчетов можно проверить по тому, в какой мере соблюдаются балансы потокосцеплений:

$$\begin{aligned} (i'_{fсв | 0|} + i'_{1dсв | 0|}) x_{ad} &= (2,76 + 0,64) \cdot 0,85 = 2,89 \approx \\ &\approx 2,88 \cdot 1 = I'_{dсв | 0|} x_d \end{aligned}$$

и

$$\begin{aligned} (i''_{fсв | 0|} + i''_{1dсв | 0|}) x_{ad} &= (-1,17 + 2,22) \cdot 0,85 = 0,89 \approx 0,88 \cdot 1 = \\ &= I''_{dсв | 0|} x_d, \end{aligned}$$

т. е. получилось практически полное совпадение.

Начальное значение апериодической слагающей тока статора

$$i_a | 0| = \frac{u_{q0} (x''_d + x''_q)}{2x''_d x''_q} = \frac{u_{q0}}{x_2} = \frac{1}{0,25} = 4,0$$

и начальная амплитуда второй гармоники

$$I_{m2\omega} = \frac{u_{q0} (x''_q - x''_d)}{2x''_d x''_q} = \frac{1 (0,31 - 0,21)}{2 \cdot 0,31 \cdot 0,21} = 0,76.$$

Окончательное выражение для тока в фазе *A* согласно (9-67) будет

$$\begin{aligned} i_A &= \left(1 + 2,88e^{-\frac{t}{1,64}} + 0,88e^{-\frac{t}{0,34}} \right) \cos(\omega t + \gamma_0) - \\ &- 4 \cos \gamma_0 e^{-\frac{t}{0,16}} - 0,76e^{-\frac{t}{0,16}} \cos(2\omega t + \gamma_0). \end{aligned}$$

По (9-68) и (9-69) для токов в продольных контурах ротора найдем:

$$\begin{aligned} i_f &= 1,18 + 2,76e^{-\frac{t}{1,64}} - 1,17e^{-\frac{t}{0,34}} - (2,76 - 1,17) e^{-\frac{t}{0,16}} \cos \omega t \\ &\left(\text{где } i_{f0} = \frac{i_f}{x_{ad}} = \frac{1}{0,85} = 1,18 \right); \\ i_{1d} &= 0,64e^{-\frac{t}{1,64}} + 2,22e^{-\frac{t}{0,34}} - (0,64 + 2,22) e^{-\frac{t}{0,16}} \cos \omega t. \end{aligned}$$

Полученные выражения использованы при построении кривых на рис. 9-4, где принято $\gamma_0 = \pi$. Начальная амплитуда второй гармоники составляет $\frac{0,76}{4,76} \cdot 100 = 16\%$ начального сверхпереходного тока.

Если определение периодической слагающей тока статора произвести по упрощенному выражению (9-61) с использованием (9-58)—(9-60), то для ее огибающей получится следующее выражение:

$$I_{\text{пт}} = 1 + 2,33e^{-\frac{t}{1,5}} + 1,43e^{-\frac{t}{0,37}}.$$

Наибольшая погрешность этого выражения составляет примерно—9% и она имеет место при $t = 0,68 \text{ сек.}$ Такая погрешность, как отмечалось выше, обусловлена тем, что демпферная обмотка обладает достаточно большой постоянной времени.

9-4. ВЛИЯНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ ПРИ ВНЕЗАПНОМ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

При снижении напряжения генератора, вызванном коротким замыканием, приходит в действие его устройство автоматического регулирования возбуждения, стремясь поднять напряжение до нормального уровня. Как показано в § 5-6, возможность такого подъема при заданном предельном токе возбуждения зависит от удаленности короткого замыкания. Если при коротком замыкании внешняя реактивность $x_{\text{вн}} \geq x_{\text{кр}}$, то напряжение генератора будет доведено до нормального, причем это произойдет тем раньше, чем больше удаленность короткого замыкания.

Под устройством автоматического регулирования возбуждения условимся понимать здесь простейшее устройство релейной форсировки возбуждения. При этом будем считать, что переходный процесс короткого замыкания практически заканчивается, как только восстановлено напряжение генератора. Другими словами, в соответствии с установленным в § 8-3 определением примем, что при наличии АРВ продолжительность переходного процесса короткого замыкания равна критическому времени.

В начальный момент короткого замыкания в силу инерции магнитных потоков, сцепленных с обмотками, никакого влияния АРВ, естественно, быть не может. Дальнейшее проявление АРВ сказывается в росте тока

возбуждения и связанных с ним составляющих токов статора и продольной демпферной обмотки (см. § 8-3). Этот процесс протекает относительно медленно, в силу чего он приводит к изменению практически только э. д. с. вращения статора и, следовательно, вызванной ею периодической слагающей тока статора¹. Аperiodическая слагающая и связанная с нею вторая гармоника тока статора остаются теми же, что и при отсутствии АРВ, что позволяет их не учитывать при дальнейшем рассмотрении данного вопроса.

Итак, при наличии АРВ затухание свободных токов, возникших в обмотке статора и обмотке возбуждения при внезапном коротком замыкании, в какой-то мере компенсируется увеличением токов от действия АРВ. В зависимости от соотношения между величинами этих токов и закономерностями их изменения результирующая кривая тока приобретает тот или иной характер.

Обратимся к простейшему случаю, когда к обмотке возбуждения генератора без демпферных обмоток в момент короткого замыкания подводится сразу предельное напряжение $u_{fпр}$, что в (8-16) соответствует $T_e=0$. При таком значении T_e из (8-24) имеем:

$$F(t) = 1 - e^{-t/T'_d}.$$

Поскольку насыщение генератора не учитывается, для получения выражения действующего значения периодической слагающей тока короткого замыкания с учетом АРВ достаточно к соответствующему выражению без учета АРВ (см. § 9-2 и 9-3) прибавить приращение тока под действием АРВ. В данном случае это приводит к выражению

$$\begin{aligned} I_{пт} &= I + (I'_{01} - I) e^{-t/T'_d} + (I_{пр} - I) (1 - e^{-t/T'_d}) = \\ &= I_{пр} + (I'_{01} - I_{пр}) e^{-\frac{t}{T'_d}}, \end{aligned}$$

где $I_{пр} = \frac{E_{qпр}}{x_d}$ — установившийся ток короткого замыкания при предельном токе возбуждения $i_{fпр}$;

I — то же при предшествующем токе возбуждения i_{f0} .

¹ В демпферной обмотке иная картина: в ней ток наводится э. д. с. трансформации, вызванной изменением тока возбуждения.

Из полученного выражения следует, что в зависимости от соотношения между $I'_{\text{ог}}$ и $I_{\text{пр}}$ ток $I_{\text{пт}}$ может затухать, возрастать или оставаться неизменным, как это показано на рис. 9-5. Такие же закономерности изменения будут для э. д. с. E'_q и E_q .

При учете конечного значения T_e и влияния демпферных обмоток закономерность изменения действующего значения периодической слагающей тока статора значительно сложнее. В общем виде ее можно выразить следующим образом:

$$I_{\text{пт}} = I_{\text{пт6/АРВ}} + \Delta I_{\text{пр}} F_d(t) \leq \frac{U_{\text{н}}}{x_{\text{вн}}}, \quad (9-71)$$

где $I_{\text{пт6/АРВ}}$ — значение той же слагающей тока при отсутствии АРВ, определяемое по соответствующим выражениям § 9-2 и 9-3;

$\Delta I_{\text{пр}} = \left(\frac{E_{q\text{пр}}}{x_d} - \frac{E_{q0}}{x_d} \right)$ — предельное приращение установившегося тока короткого замыкания, равное разности установившихся токов при предельном и предшествующем возбуждениях;
 $F_d(t)$ — функция, определяемая по (8-24) или по соответствующим выражениям, приведенным в табл. 8-1.

Поставленное в (9-71) ограничение вытекает из принятого условия, что если под действием АРВ напряжение генератора достигло нормальной величины, то ток в дальнейшем остается неизменным.

Аналогичные выражения можно написать для апериодических слагающих токов в обмотке возбуждения и продольной демпферной обмотке (они справедливы в течение критического времени):

$$i_{fat \leq t_{\text{кр}}} = i_{fa6/\text{АРВ}} + \Delta i_{f\text{пр}} F_f(t) \quad (9-72)$$

и

$$i_{lat \leq t_{\text{кр}}} = i_{la6/\text{АРВ}} + \Delta i_{l\text{пр}} F_{ld}(t), \quad (9-73)$$

где $\Delta i_{f\text{пр}} = (i_{f\text{пр}} - i_{f0})$ — предельное приращение тока возбуждения;

$F_f(t)$, $F_{ld}(t)$ — функции, определяемые по выражениям из табл. 8-1,

На рис. 9-6 приведены кривые изменения действующего значения периодической слагающей тока статора и аperiodических слагающих токов в продольных контурах ротора при коротком замыкании на выводах генератора. Пунктиром проведены кривые при отсутствии АРВ, а сплошными линиями — при наличии АРВ, причем отдельно показаны изменения приращений токов от действия АРВ.

В начальной стадии процесса короткого замыкания, как видно, действие АРВ едва заметно. Затем оно проявляется все интенсивнее и далее приращение тока постепенно стремится к своему конечному значению. Такая картина имеет место в статоре и обмотке возбуждения, где действие АРВ постепенно увеличивает значения токов. По-иному сказывается действие АРВ на токе в продольной демпферной обмотке. Здесь приращение тока противоположно свободному току, наведенному при коротком замыкании, что приводит к снижению тока в этой обмотке. Максимум тока Δi_{ide} наступает в момент, когда скорость изменения Δi_{fe} достигает своего максимума.

Теперь обратимся к рис. 9-7, где приведены кривые изменения действующих значений периодической слагающей тока статора и напряжения генератора при трех характерных удаленностях короткого замыкания: $x_{вн} = 0$; $x_{вн} = x_{кр}$; $x_{вн} > x_{кр}$. Для сравнения там же приведены аналогичные кривые при отсутствии АРВ (пунктирные линии). При малой удаленности короткого замыкания кривая тока генератора с АРВ проходит значительно выше, сохраняя вид затухающей кривой. По мере увеличения удаленности короткого замыкания характер кривой тока меняется. После снижения до неко-

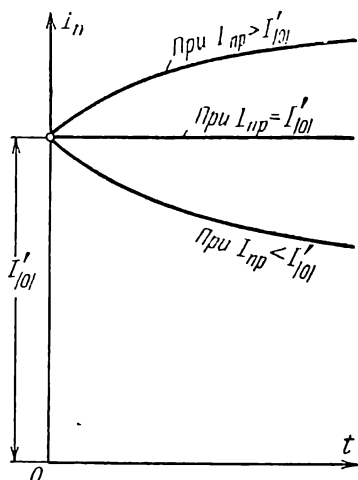


Рис. 9-5. Кривые изменения периодической слагающей тока статора при внезапном коротком замыкании генератора с АРВ при $T_c = 0$ и различных значениях предельного тока возбуждения.

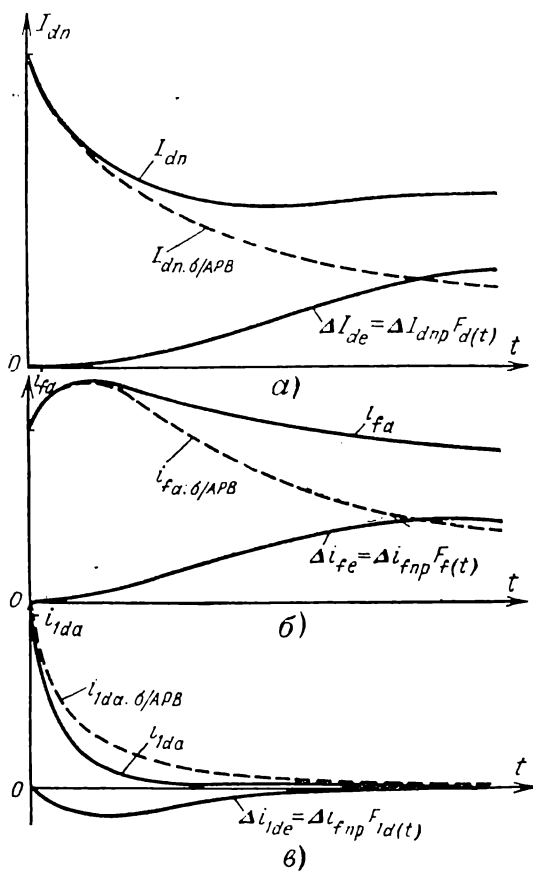


Рис. 9-6. Влияние АРВ на изменение токов при внезапном коротком замыкании синхронной машины.

а — обмотка статора; б — обмотка возбуждения;
в — продольная демпферная обмотка.

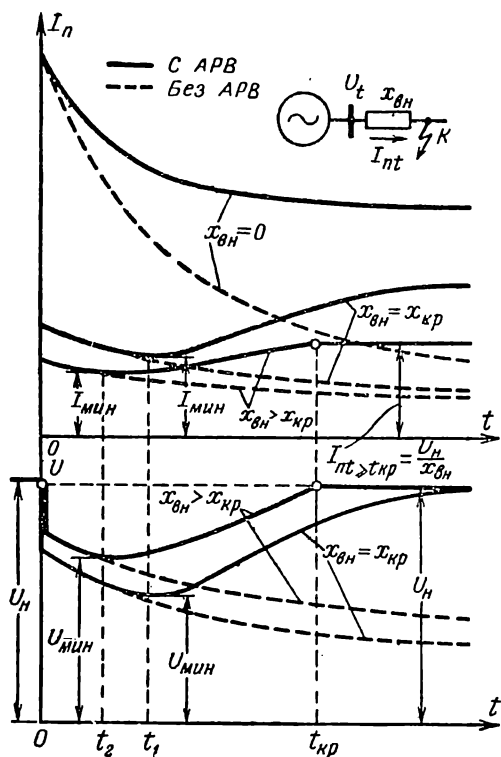


Рис. 9-7. Влияние АРВ на изменение тока и напряжения синхронного генератора при различных удаленностях короткого замыкания.

торого минимума ток статора вновь постепенно возрастает, стремясь к конечному значению; при этом спустя известный промежуток его значения могут превзойти значение в начальный момент.

Из равенства $\frac{E''_{q0}}{x''_d + x_{вн}} = \frac{E_{qпр}}{x_d + x_{вн}}$ найдем внешнюю реактивность:

$$x_{вн} = \frac{E''_{q0}x_d - E_{qпр}x''_d}{E_{qпр} - E''_{q0}}, \quad (9-74)$$

при коротком замыкании за которой начальный сверхпереходный и установившийся токи одинаковы.

При $x_{\text{вн}} > x''_{\text{вн}}$ установившийся ток I больше начального сверхпереходного тока $I''_{\text{л0}}$, причем наибольшее различие между ними наступает при $x_{\text{вн}} = x_{\text{кр}}$. С дальнейшим ростом $x_{\text{вн}}$ различие между этими токами снова уменьшается. Характерная кривая $I''_{\text{л0}}/I = f(x_{\text{вн}})$ при-

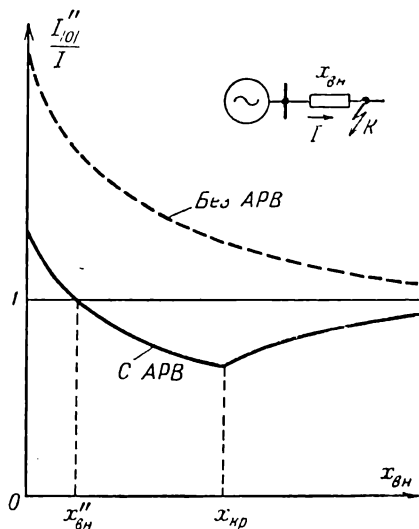


Рис. 9-8. Изменение отношения $I''_{\text{л0}}/I$ в зависимости от удаленности короткого замыкания.

ведена на рис. 9-8. Если при отсутствии АРВ (пунктирная кривая) это отношение всегда больше единицы и в пределе стремится к ней, то при наличии АРВ (сплошная кривая) оно падает до наименьшего значения (порядка 0,6—0,8) при $x_{\text{вн}} = x_{\text{кр}}$ и затем также стремится к единице, оставаясь меньше ее. Таким образом, в то время как при отсутствии АРВ величина отношения $I''_{\text{л0}}/I$ в известной мере характеризует удаленность короткого замыкания, при наличии АРВ эта величина уже не может

служить подобной характеристикой, поскольку одному и тому же ее значению соответствуют две резко отличающиеся удаленности.

Вернемся к рис. 9-7. Как видно, при $x_{\text{вн}} > x_{\text{кр}}$ напряжение через $t_{\text{кр}}$ достигает нормального значения и далее остается постоянным. Соответственно ток при $t > t_{\text{кр}}$ также остается неизменным и равным $U_{\text{н}}/x_{\text{вн}}$.

Напомним, что с увеличением удаленности короткого замыкания затухание и нарастание токов происходят медленнее. Однако коль скоро снижение напряжения при этом меньше, его восстановление под действием АРВ происходит в более короткий отрезок времени (хо-

¹ Она зависит от параметров и предшествующего режима машины.

тя и с меньшей скоростью), т. е. критическое время уменьшается с ростом удаленности короткого замыкания.

Минимум тока или напряжения зависит от параметров синхронной машины и удаленности короткого замыкания. С увеличением удаленности короткого он наступает раньше и в пределе стремится к $t=0$.

Пример 9-4. Для генератора с параметрами, указанными в примерах 9-1 и 9-3, составить численное выражение для действующего значения периодической слагающей тока статора при внезапном коротком замыкании на его выводах. Дополнительно принять, что генератор снабжен АРВ и его предельный ток возбуждения $i_{\text{нр}}=3,4$, а постоянная времени $T_e=0,5$ сек. Помимо того, определить относительную величину этой слагающей тока для $t=1$ сек.

В решении примера 9-3 найдены следующие значения постоянных времени:

$$T'_d = 1,64 \text{ сек}; T''_d = 0,34 \text{ сек}; T_{\text{ld}\sigma} = 0,21 \text{ сек}.$$

По соответствующему выражению из табл. 8-1 находим функцию приращения принужденного тока статора:

$$\begin{aligned} F_d(t) = & 1 - \frac{(1,64 - 0,21) \cdot 1,64}{(1,64 - 0,34)(1,64 - 0,5)} e^{-\frac{t}{1,64}} - \\ & - \frac{(0,34 - 0,21) \cdot 0,34}{(0,34 - 1,64)(0,34 - 0,5)} e^{-\frac{t}{0,34}} - \\ & - \frac{(0,5 - 0,21) \cdot 0,5}{(0,5 - 1,64)(0,5 - 0,34)} e^{-\frac{t}{0,5}} = 1 - 1,58e^{-\frac{t}{1,64}} - \\ & - 0,21e^{-\frac{t}{0,34}} + 0,79e^{-\frac{t}{0,5}}. \end{aligned}$$

Предельное приращение установившегося тока составляет

$$\Delta I_{\text{нр}} = \frac{3,4}{1} - \frac{1}{1} = 2,4.$$

Прибавив к полученному в примере 9-3 выражению для периодической слагающей тока приращение тока от действия АРВ, получим:

$$I_{\text{пт}} = 1 + 2,88e^{-\frac{t}{1,64}} + 0,88e^{-\frac{t}{0,34}} + 2,4F_d(t).$$

Для $t=1$ сек имеем: $F_d(t)=0,25$ и $I_{\text{н}}=1+2,88 \cdot 0,54+0,88 \cdot 0,05+2,4 \cdot 0,25=2,6+0,6=3,2$, т. е. действие АРВ привело к увеличению тока на 23%.

Аналогично можно найти аperiodическую слагающую тока обмотки возбуждения. По соответствующему выражению табл. 8-1 имеем:

$$F_f(t) = 1 - 1,28e^{-\frac{t}{1,64}} + 0,23e^{-\frac{t}{0,34}} + 0,05e^{-\frac{t}{0,5}}.$$

С учетом найденного в примере 9-3 выражения для этой слагающей тока теперь можно написать:

$$i_{fa} = 1,18 + 2,76e^{-\frac{t}{1,64}} - 1,17e^{-\frac{t}{0,34}} + \frac{(3,4 - 1)}{0,85} F_f(t),$$

что при $t = 1$ сек дает $i_{fa}^0 = 3,54$ или $i_{fa} = 0,85 \cdot 3,54 = 3$.

Отметим, что если принять $T_e = 0$, то

$$F_d(t) = 1 - 1,08e^{-\frac{t}{1,64}} + 0,08e^{-\frac{t}{0,34}}.$$

и при $t = 1$ сек значение функции $F_d(t) = 0,42$ (вместо 0,25), т. е. через 1 сек ток статора $I_n = 3,6$ (вместо 3,2).

Пример 9-5. Определить наименьшее действующее значение периодической слагающей тока при трехфазном коротком замыкании на выводах генератора, имеющего следующие параметры: $x_d' = 0,25$; $x_d = 1,0$; $T_{f0} = 2$ сек; $i_{np} = 4$; $T_e = 0,5$ сек. Генератор снабжен АРВ; до короткого замыкания работал на холостом ходу с номинальным напряжением.

Находим постоянную времени $T_d' = 2 \frac{0,25}{1,0} = 0,5$ сек.

Коль скоро получилось $T_d' = T_e$, то для определения $F_d(t)$ используем (8-25). При этом для периодической слагающей тока статора имеем:

$$I_{nt} = \frac{1}{1} + \left(\frac{1}{0,25} - \frac{1}{1} \right) e^{-\frac{t}{0,5}} + \left(\frac{4}{1} - \frac{1}{1} \right) \times \\ \times \left[1 - e^{-\frac{t}{0,5}} \left(1 + \frac{t}{0,5} \right) \right] = 4 - 6te^{-\frac{t}{0,5}}.$$

Из уравнения

$$\frac{dI_{nt}}{dt} = (2t - 1) e^{-\frac{t}{0,5}} = 0$$

находим, что минимум тока наступает при $t = 0,5$ сек; его величина составляет

$$I_{n.min} = 4 - 6 \cdot 0,5e^{-\frac{0,5}{0,5}} = 2,9.$$

Пример 9-6. Короткое замыкание произошло за реактивностью $x=0,6^*$, присоединенной к генератору с параметрами: $x'_d=0,2$; $x_d=1,6$; $T_{j0}=6$ сек и предшествующими э. д. с. $E'_{q0}=1,1$ и $E_{q0}=1,8$. Определить необходимую величину предельного тока возбуждения, чтобы при $T_e=0,3$ сек напряжение генератора через 1,4 сек достигло нормального значения.

Находим величины токов: $I'_{|0|} = \frac{1,1}{0,2+0,6} = 1,38$; $I = \frac{1,8}{1,6+0,6} = 0,82$. Постоянная времени $T'_d = 6 \frac{0,2+0,6}{1,6+0,6} = 2,18$ сек; значение функции $F_d(t)$ для $t=1,4$ сек, имея в виду, что $e^{-\frac{1,4}{2,18}} = 0,53$ и $e^{-\frac{1,4}{0,3}} \approx 0$, будет

$$F_d(t) = 1 - \frac{2,18 \cdot 0,53}{2,18 - 0,3} = 0,39.$$

В соответствии с заданным условием $\frac{1}{0,6} = 1,67 = 0,82 + (1,38 - 0,82) \cdot 0,53 + \left(\frac{E_{qпр}}{1,6+0,6} - 0,82 \right) 0,39$, откуда $E_{qпр} = 4,9$ и, следовательно, искомый ток $i_{jпр} = 4,9$.

Если у данного генератора $i_{jпр} = 4,3$, то чтобы обеспечить поставленное требование, очевидно, нужно иметь меньшую величину T_e . Для ее определения из равенства

$$1,67 = 0,82 + (1,38 - 0,82) \cdot 0,53 + \left(\frac{4,3}{1,6+0,6} - 0,82 \right) F_d(t)$$

предварительно определяем значение $F_d(t) = 0,49$. Из выражения

$$F_d(t) = 0,49 \approx 1 - \frac{2,18 \cdot 0,53}{2,18 - T_e}$$

находим $T_e \approx 0,09$ сек.

9-5. КАСКАДНОЕ ОТКЛЮЧЕНИЕ И ПОВТОРНОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

При питании короткого замыкания по нескольким ветвям их отключение происходит обычно неодновременно. Это может быть вызвано как случайными обстоятельствами (например, неодновременностью работы отключающих аппаратов), так и преднамеренно, когда для защиты от коротких замыканий используют релейные схемы, построенные на определенной очередности или каскадности действия отключающих аппаратов отдельных ветвей.

* Ее значение выражено в относительных единицах при номинальной мощности и напряжении генератора.

В § 1-1 уже отмечалось, что после отключения короткого замыкания широко применяют автоматическое повторное включение (АПВ) отключившихся участков или элементов схемы. В тех случаях, когда короткое замыкание остается, действие АПВ приводит к повторному включению на короткое.

Интервалы между ступенями каскадного отключения и между повторными включениями обычно таковы, что возникшие в предшествующем переходном режиме свободные токи еще не затухли и действие устройств автоматического регулирования возбуждения еще не стабилизировалось.

Таким образом, при каскадном отключении короткого замыкания или при его повторном включении происходит по существу смена одного переходного процесса другим. При этом может оказаться, что условия повторного короткого замыкания тяжелее первоначальных, т. е. ток при повторном коротком замыкании достигнет большей величины.

Граничные условия внезапного перехода от одного процесса к другому (независимо от того, является ли первый стационарным или нет) в полной мере характеризуются неизменностью сверхпереходной (или переходной) э. д. с. в момент нарушения текущего процесса. Это позволяет определить в начале каждого изменения процесса значения периодической слагающей тока статора и соответственно аperiodических слагающих токов в контурах ротора. Постоянные времени изменения этих слагающих токов в пределах каждого этапа рассматриваемого процесса определяются параметрами тех элементов схемы, которые участвуют в каждом из этих этапов.

Что касается аperiodической слагающей тока статора и связанных с ней периодических слагающих токов ротора, то их начальные значения легко найти из условия сохранения в момент нарушения процесса предшествующих значений токов в данных цепях. Соответственно по параметрам элементов схемы для каждого этапа рассматриваемого процесса находят постоянную времени затухания этих слагающих токов или принимают для нее приближенно некоторое среднее значение (см. § 3-5). Благодаря очень быстрому затуханию этих слагающих токов они практически уже отсутствуют к моменту изменения процесса.

Проследим на приведенном ниже примере изменение отдельных величин при характерном цикле каскадного отключения и повторного включения короткого замыкания.

Пример 9-7. Для схемы, представленной на рис. 9-9,а, построить кривые изменения во времени токов $I_{\text{н}t}$, $i_{\text{ф}t}$, э. д. с. E_{qt} , E'_{qt} и напряжения U_t генератора для следующего цикла переходного процесса:

- 1) в точке K происходит внезапное короткое замыкание;
- 2) через 0,5 сек после короткого отключается выключатель $B-1$;
- 3) спустя еще 0,5 сек происходит отключение выключателя $B-2$;
- 4) еще через 0,5 сек производится повторное включение выключателя $B-1$ на сохранившееся в точке K короткое замыкание.

Параметры генератора: $x_d=1,0$; $x'_d=0,255$; $T_{j0}=2$ сек; $i_{\text{нр}}=4$; $T_e=0$; до короткого замыкания генератор работал на холостом ходу с номинальным напряжением.

Указанные на схеме значения реактивностей внешней цепи выражены в относительных единицах при номинальных условиях генератора.

Построение кривых произвести как при отсутствии, так и при наличии автоматического регулирования возбуждения.

а) При отсутствии АРВ

Внешняя реактивность на первом этапе рассматриваемого цикла $x_{\text{вн}}=0,3 \nparallel (0,15+0,45)=0,2$ и, следовательно, постоянная времени

$$T'_d = 2 \frac{0,255 + 0,2}{1,0 + 0,2} = 0,76 \text{ сек.}$$

Значения токов $I'_{|0|} = \frac{1}{0,255 + 0,2} = 2,2$ и $I = \frac{1}{1,0 + 0,2} = 0,83$; э. д. с. $E_{q|0|} = 2,2 (1,0 + 0,2) = 2,64$; $E'_q = 0,83 (0,255 + 0,2) = 0,38$ и напряжения $U_{|0|} = 2,2 \cdot 0,2 = 0,44$; $U = 0,83 \cdot 0,2 = 0,17$.

Следовательно, выражения для искомых величин на отрезке времени от 0 до 0,5 сек и их значения в конце данного отрезка будут:

$$I_{\text{н}t} = 0,83 + (2,2 - 0,83) e^{-\frac{t}{0,76}}, \text{ что при } t = 0,5 \text{ сек дает } I_{\text{н}} = 1,54;$$

$$E_{qt} = i_{\text{ф}t} = 1 + (2,64 - 1) e^{-\frac{t}{0,76}}, \quad \text{то же} \quad i_f = 1,85;$$

$$E'_{qt} = 0,38 + (1,0 - 0,38) e^{-\frac{t}{0,76}}, \quad \text{" " } E'_q = 0,70;$$

$$U_t = 0,17 + (0,44 - 0,17) e^{-\frac{t}{0,76}}, \quad \text{" " } U = 0,31.$$

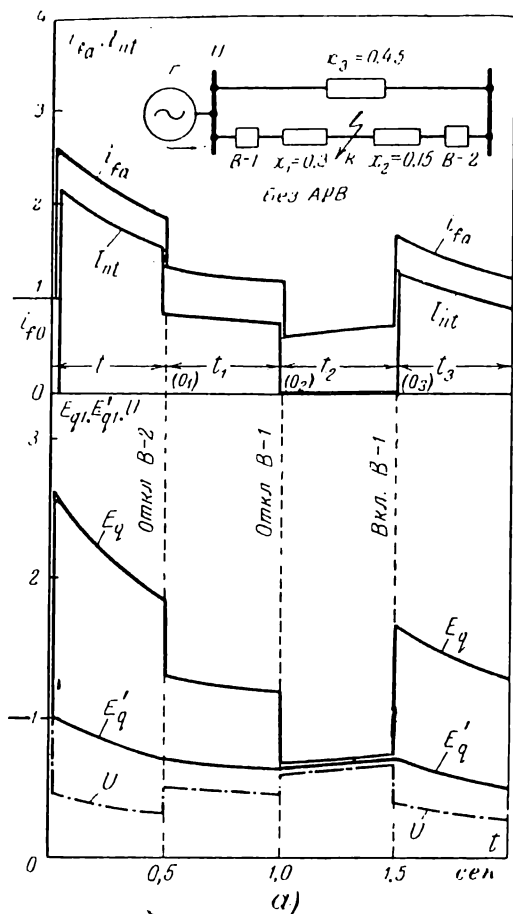
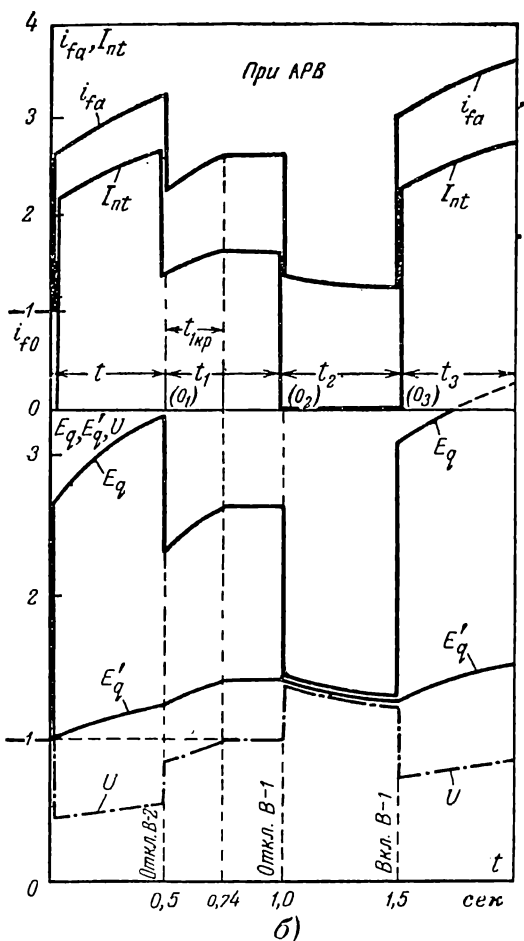


Рис. 9-9. Изменение токов, э. д. с. и напряже-
включении корот
а — при отсутствии АРВ;

На втором этапе внешняя реактивность $x_{нн} = 0,6$ и постоянная времени

$$T'_d = 2 \frac{0,255 + 0,6}{1,0 + 0,6} = 1,07 \text{ сек.}$$

Значения токов на этом этапе $I'_{|01|} = \frac{0,7}{0,255 + 0,6} = 0,82$ и $I = \frac{1}{1,0 + 0,6} = 0,63$. Аналогично предыдущему находим: $E_{q|01|} = 1,31$;



ния при каскадном отключении и повторного замыкания.

б — при наличии АРВ.

$E'_q = 0,54$; $U_{01} = 0,49$; $U = 0,38$, и по соответствующим выражениям значения этих величин для $t_1 = 0,5$ сек (т. е. спустя 1 сек после возникновения короткого) будут: $I_n = 0,75$; $E_q = i_{fa} = 1,31$; $E'_q = 0,64$ и $U = 0,45$.

На третьем этапе, после отключения В-2, имеем $x_{nn} = \infty$ и $T'_d = T_{j0} = 2$ сек; соответственно $I_n = 0$ и $E'_q t_2 = E_q t_2 = U t_2 = 1 + (0,64 - 1)e^{-\frac{t_2}{2}}$, откуда для $t_2 = 0,5$ сек имеем $E'_q = 0,72$; ток $i_{fa} = E_q$.

Наконец, на четвертом этапе (при повторном включении $B-I$) внешняя реактивность $x_{вн} = 0,3$ и $T'_d = 0,86$ сек; значения токов и э. д. с. будут:

$$I'_{|03|} = \frac{0,72}{0,255 + 0,3} = 1,3 \text{ и } I = \frac{1}{1,0 + 0,3} = 0,77;$$

$$E_{q|03|} = 1,3(1 + 0,3) = 1,69 = i_{f|03|};$$

$$E'_{q|03|} = 0,77(0,255 + 0,3) = 0,43; \quad U_{|03|} = 1,3 \cdot 0,3 = 0,39;$$

$U = 0,77 \cdot 0,3 = 0,23$, и их выражения:

$$I_{пт3} = 0,77 + (1,3 - 0,77) e^{-\frac{t_3}{0,86}};$$

$$E_{qт3} = i_f = 1 + (1,69 - 1) e^{-\frac{t_3}{0,86}};$$

$$E'_{qт3} = 0,43 + (0,72 - 0,43) e^{-\frac{t_3}{0,86}};$$

$$U_{т3} = 0,39 + (0,43 - 0,39) e^{-\frac{t_3}{0,86}}.$$

Искомые кривые приведены на рис. 9-9, а.

б) При наличии APB

На первом этапе цикла, поскольку $x_{кр} = \frac{1}{4-1} = 0,33 > x_{вн} = 0,2$, генератор работает в режиме подъема возбуждения; при этом установившийся ток был бы $I = 4/(1 + 0,2) = 3,32$; тогда $E'_q = 1,52$ и $U = 0,67$. Следовательно, выражения для искомых величин (при $T_e = 0$) будут:

$$I_{пт} = 3,32 + (2,2 - 3,32) e^{-\frac{t}{0,76}}, \text{ что при } t = 0,5 \text{ сек дает } I_{пт} = 2,75;$$

$$E_{qt} = i_{fпт} = 4 + (2,64 - 4) e^{-\frac{t}{0,76}} \quad \text{то же} \quad E_q = 3,3;$$

$$E'_{qt} = 1,52 + (1 - 1,52) e^{-\frac{t}{0,76}}, \quad \text{" " " " } E'_q = 1,25;$$

$$U_t = 0,67 + (0,44 - 0,67) e^{-\frac{t}{0,76}}, \quad \text{" " " " } U = 0,55.$$

При установившемся режиме второго этапа напряжение генератора достигнет нормального значения, так как $x_{вн} = 0,6 > x_{кр} = 0,33$.

Значения токов будут $I_{|01|} = \frac{1,25}{0,255 + 0,6} = 1,46$ и $I = \frac{4}{1 + 0,6} = 2,5$; э. д. с. $E_{q|01|} = 1,46(1 + 0,6) = 2,34$; $E'_q = 2,5(0,255 + 0,6) = 2,14$ и напряжений $U_{|01|} = 1,46 \cdot 0,6 = 0,88$ и $U = 2,5 \cdot 0,6 = 1,5$.

Выражение для тока должно быть ограничено величиной $I = \frac{1}{0,6} = 1,67$, т. е. $I_{пт} = 2,5 + (1,46 - 2,5) e^{-\frac{t_{кр}}{1,07}} \leq 1,67$, откуда находим, что критическое время на втором этапе составляет $t_{кр} = 0,24$ сек (или $t = 0,5 + 0,24 = 0,74$ сек с момента возникновения короткого).

Значения остальных величин при $t_1 = 0,24$ сек будут:

$$E_q = i_{fa} = 1,67 (1 + 0,6) = 2,67; \quad E'_q = 1 + 0,167 \cdot 0,255 = 1,43;$$

которые сохраняются и при $t_1 = 0,5$ сек.

На третьем этапе имеем:

$$I_{пт} = 0;$$

$$E'_{qt_2} = E_{qt_2} = U_{t_2} = 1 + (1,43 - 1) e^{-\frac{t_2}{2}} \quad \text{и} \quad i_{fat_2} = E_{qt_2},$$

откуда при $t_2 = 0,5$ сек $E'_q = E_q = U = 1,34$.

На последнем, четвертом, этапе находим:

$$I'_{|0,3|} = \frac{1,34}{0,255 + 0,3} = 2,41; \quad I = \frac{4}{1,0 + 0,3} = 3,08$$

и, следовательно, $E_{q|0,3|} = i_{fa|0,3|} = 2,41 (1 + 0,3) = 3,13$; $E'_q = 3,08 (0,255 + 0,3) = 1,71$; $U_{|0,3|} = 2,41 \cdot 0,3 = 0,72$ и $U = 3,08 \cdot 0,3 = 0,92$, причем изменение от начальных к конечным значениям происходит по экспоненте с постоянной времени $T'_d = 0,86$ сек.

На рис. 9-9,б приведены искомые кривые для рассматриваемых условий.

Следует отметить, что в данном случае при наличии АРВ ток при повторном включении короткого замыкания (в начальной стадии последнего этапа) превышает (примерно на 10%) начальное значение тока при возникновении короткого замыкания (первый этап процесса). Это превышение, как видно, зависит от паузы между полным отключением короткого замыкания и его повторным включением, в течение которой происходит изменение тока в обмотке возбуждения.

9-6. ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. В чем состоит условность допущений, принимаемых при нахождении корней характеристического уравнения электромагнитного переходного процесса синхронной машины?

2. Каковы угловые частоты изменения свободных токов, возникающих в синхронной машине при внезапном коротком замыкании, и от каких факторов они зависят?

3. Как изменяется величина постоянной времени T'_d с увеличением активного сопротивления цепи статора?

4. Чем вызвана и от чего зависит вторая гармоника тока короткого замыкания?

5. Провести решение примера 9-1 для тех же условий, но считая, что до короткого замыкания генератор работал с номинальной нагрузкой при отстающем $\cos \varphi_0 = 0,85$.

6. В чем и как скажется на результатах примера 9-1 изменение величины реактивности x'_d при сохранении всех прочих параметров машины неизменными?

7. В чем проявляется влияние демпферных обмоток на протекание процесса внезапного короткого замыкания синхронной машины?

8. При каком условии практически достаточную точность обеспечивает приближенное выражение (9-61) и в чем заключается условность трактовки этого выражения?

9. Провести решение примера 9-3, считая, что у ротора рассматриваемой синхронной машины создана только одна поперечная демпферная обмотка.

10. Турбогенератор через трансформатор связан с сетью 230 кВ. Найти выражение для периодической слагающей тока статора при трехфазном коротком замыкании на выводах высшего напряжения трансформатора.

Турбогенератор 100 Мвт; $\cos \varphi = 0,8$; 15,75 кВ; 4,6 кА; ОЗ = 0,74; $x'_d = 0,2$; $x''_d = 0,13$; $x'''_d = 0,15$; $x_\sigma = 0,1$; $T_{j0} = 8,8$ сек; $T'_{d0} = 11,45$ сек; $T''_{d0} = 0,25$ сек; $T'''_{d0} = 2,5$ сек.

Трансформатор 120 МВА; 242/15,75 кВ; $u_k = 11,5\%$.

До возникновения короткого замыкания турбогенератор работал с нагрузкой 80 Мвт при $\cos \varphi_0 = 0,8$ и $U_0 = 16,5$ кВ; его АРВ был отключен.

11. Сопоставить решение предыдущей задачи с ее приближенным решением, получаемым по выражению (9-61).

12. Как сказывается действие АРВ на протекание процесса внезапного короткого замыкания синхронной машины?

13. От каких факторов зависит наименьшая величина тока короткого замыкания при наличии АРВ у генератора?

14. Для синхронного генератора с параметрами $x_d = 1,0$; $x'_d = 0,25$; $T_{j0} = 4$ сек; $i_{jпр} = 4,0$; $T_e = 0,5$ сек определить наименьшее значение периодической слагающей тока при внезапном коротком замыкании на выводах генератора. До короткого замыкания генератор работал на холостом ходу с номинальным напряжением; его АРВ включен.

15. Гидрогенератор имеет параметры $x_d = 1,0$; $x'_d = 0,3$; $T_{j0} = 5$ сек; $i_{jпр} = 3$; $T_e = 0$. Определить, в какой момент времени напряжение генератора достигнет нормального значения, если трехфазное короткое произойдет за $x_{вн} = 0,7$. До короткого замыкания генератор работал на холостом ходу при номинальном напряжении.

16. Для условий предыдущей задачи определить, какой величины должен быть предельный ток возбуждения генератора, чтобы при коротком замыкании в заданной точке сети напряжение генератора достигло нормального значения через 1 сек.

17. Провести решение задачи п. 10, считая, что АРВ генератора включен и дополнительно известны $i_{jпр} = 4,3$ и $T_e = 0,4$ сек. Помимо периодической слагающей тока статора, определить также апериодические слагающие токов в обмотке возбуждения и продольной демпферной обмотке.

18. Показать, насколько изменятся результаты решения предыдущей задачи, если принять $T_c=0$.

19. Для генератора известны следующие параметры: $x_d=1,0$; $x_{ad}=0,85$; $x_f=1,03$; $x_{1d}=0,95$; $T_{f0}=5$ сек; $T_{1d0}=1$ сек. Определить максимум свободного апериодического тока в обмотке возбуждения при внезапном коротком замыкании на выводах генератора.

20. Для условий задачи п. 15 считать, что отключение короткого замыкания произошло в момент, когда напряжение генератора достигло нормального значения. Спустя 0,7 сек после отключения короткого произведено повторное включение на короткое замыкание. Составить выражение для изменения напряжения генератора на каждом этапе рассматриваемого цикла АПВ.

21. Провести решение примера 9-7 для иной очередности каскадного отключения и действия АПВ:

- 1) в точке K происходит внезапное короткое замыкание;
- 2) через 0,5 сек после короткого отключается $B-2$;
- 3) спустя еще 0,5 сек происходит отключение $B-1$;
- 4) еще через 0,5 сек происходит повторное включение выключателя $B-2$ на сохранившееся в точке K короткое.

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ

ВЗАИМНОЕ ВЛИЯНИЕ СИНХРОННЫХ МАШИН ПРИ ПЕРЕХОДНОМ ПРОЦЕССЕ

10-1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

До сих пор электромагнитные переходные процессы синхронной машины рассматривались при ее изолированной работе от других машин. Теперь остановимся на вопросе о том, как сказывается взаимное влияние машин на протекании переходного процесса, вызванного, в частности, внезапным коротким замыканием.

Анализ данного вопроса в общем виде при произвольном числе машин представляет чрезвычайно сложную задачу. Поэтому чтобы иметь некоторое, главным образом качественное, представление об указанном влиянии, ограничимся рассмотрением простейшего случая, когда имеются лишь два источника (или когда схема с большим числом источников может быть приведена к схеме с двумя эквивалентными источниками). При этом вначале будем считать, что никакие электромеханические процессы не имеют места и оба источника все время продолжают работать с синхронной частотой. Все принятые в § 2-2 основные допущения сохраняются.

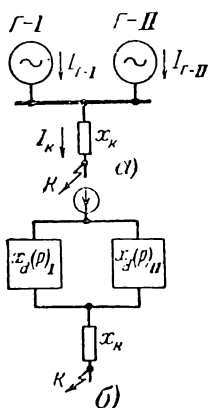
В дальнейшем (см. § 10-3) рассмотрим также влияние изменения углового сдвига между векторами э. д. с. синхронных машин (т. е. их качаний) на изменение то-

ков при переходном процессе внезапного короткого замыкания. Учет возникающих качаний машин требует одновременного рассмотрения электромагнитных и электромеханических явлений, поэтому, естественно, является еще более сложной задачей. Для упрощения принято, что в схеме имеется только один генератор и он работает параллельно с системой, являющейся практически источником бесконечной мощности (т. е. напряжение и частота в месте присоединения системы неизменны). При этом качания генератора рассматриваются по отношению к такой системе.

Чтобы не затронуто математических выкладок, будем считать, что участвующие в данном анализе генераторы не имеют демпферных обмоток.

10-2. ВЗАИМНОЕ ВЛИЯНИЕ СИНХРОННЫХ МАШИН ПРИ ВНЕЗАПНОМ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

В качестве исходной примем элементарную схему рис. 10-1, *а*, где два генератора, связанные общими шинами, участвуют в питании короткого замыкания, возникшего за присоединенной к шинам реактивностью x_k .



Допустим, что эти генераторы отличаются только величинами своих постоянных времени T_{f0I} и T_{f0II} , а все остальные параметры у них одинаковы; в предшествующем режиме генераторы работали на холостом ходу с номинальным напряжением.

Найдем закономерности изменения свободных токов при различных соотношениях между T_{f0I} и T_{f0II} , т. е. в зависимости от $n = T_{f0II}/T_{f0I}$.

Примем соотношение $x_d = 4x'_d$; тогда операторные реактивности генераторов (см. § 7-9) будут:

$$x_d(p)_I = \frac{(4 + T_{f0I}p)x'_d}{1 + T_{f0I}p}$$

и

$$x_d(p)_{II} = \frac{(4 + nT_{f0I}p)x'_d}{1 + nT_{f0I}p}$$

Рис. 10-1. Исходная схема к определению взаимного влияния синхронных машин при внезапном коротком замыкании.

а — принципиальная схема; *б* — схема замещения.

и результирующая операторная реактивность схемы рис. 10-1, б при $x_K = x'_d$

$$x_d(p)_\Sigma = [x_d(p)_I // x_d(p)_{II}] + x_K = \\ = \frac{3x'_d [nT_{f01}^2 p^2 + 3(1+n)T_{f01}p + 8]}{2nT_{f01}^2 p^2 + 5(1+n)T_{f01}p + 8}.$$

Из характеристического уравнения

$$nT_{f01}^2 p^2 + 3(1+n)T_{f01}p + 8 = 0$$

находим корни:

$$p_{1,2} = \frac{-3(1+n) \pm \sqrt{9(1+n)^2 - 32n}}{2nT_{f01}}$$

и соответственно постоянные времени

$$T_{1,2} = -\frac{1}{p_{1,2}} = \left[\frac{3(1+n) \pm \sqrt{9(1+n)^2 - 32n}}{16} \right] T_{f01}.$$

Операторные выражения для свободных токов будут: в месте короткого замыкания

$$I_{K.cв}(p) = \frac{1}{x_d(p)_\Sigma} = \frac{2nT_{f01}^2 p^2 + 5(1+n)T_{f01}p + 8}{3x'_d [nT_{f01}^2 p^2 + 3(1+n)T_{f01}p + 8]};$$

генератора $\Gamma-I$

$$I_{\Gamma-I.cв}(p) = \frac{nT_{f01}^2 p^2 + (4+n)T_{f01}p + 4}{3x'_d [nT_{f01}^2 p^2 + 3(1+n)T_{f01}p + 8]};$$

генератора $\Gamma-II$

$$I_{\Gamma-II.cв}(p) = \frac{nT_{f01}^2 p^2 + (1+4n)T_{f01}p + 4}{3x'_d [nT_{f01}^2 p^2 + 3(1+n)T_{f01}p + 8]}.$$

Задаваясь рядом значений n , найдем величины T_1 и T_2 и затем, переходя от изображения к оригиналам, начальные значения составляющих $I_{cв1}$ и $I_{cв2}$ свободных токов в каждой ветви схемы рис. 10-1, а. Результаты такого подсчета при изменении n в пределах от 0 до 2 представлены кривыми на рис. 10-2, где T_1 и T_2 выражены в долях T_{f01} , а $I_{cв1}$ и $I_{cв2}$ — в долях полного свободного тока $I_{K.cв}$ в месте короткого замыкания.

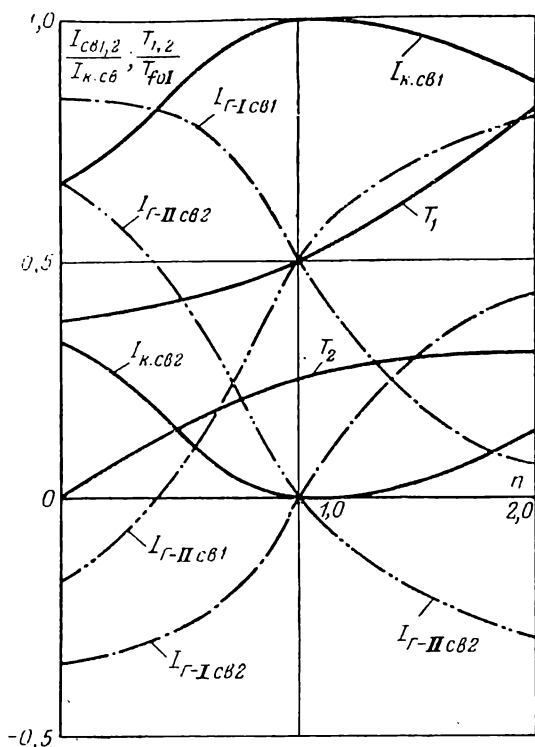


Рис. 10-2. Изменение постоянных времени T_1 и T_2 и составляющих начальных свободных токов в зависимости от соотношения между постоянными времени обмоток возбуждения генераторов $n = T_{f01}/T_{f02}$.

Поскольку параметры генераторов приняты одинаковыми (кроме T_{f0}), начальные значения свободных токов $I_{г-к.св [0]}$ и $I_{г-п.св [0]}$ одинаковы. Это равенство нарушается при предельных условиях ($n=0$ и $n=\infty$), на чем дополнительно остановимся ниже.

При идентичности генераторов ($n=1$) их свободные токи, как и следовало ожидать, не только одинаковы, но каждый из них состоит только из одной составляющей, затухающей с T_1 . По мере отклонения от $n=1$ величины T_1 и T_2 изменяются в одном и том же направлении, но с различной интенсивностью. При этом, как видно из рис. 10-2, происходит перераспределение составляющих свободных токов.

Проследим, как проявляется различие между $T_{f_{01}}$ и $T_{f_{011}}$, т. е. отклонение n от единицы. При уменьшении $T_{f_{011}}$ от величины, равной $T_{f_{01}}$ (т. е. $n < 1$), обе составляющие свободного тока генератора $I-I$, т. е. $I_{I-I_{CB1}}$ и $I_{I-I_{CB2}}$, возрастают, имея противоположные знаки. В месте короткого замыкания и в генераторе $I-II$ составляющие I_{CB1} падают, а I_{CB2} — напротив, увеличиваются. При некотором значении n составляющая $I_{I-I_{CB1}}$ проходит через нуль и при дальнейшем снижении n растет в отрицательной зоне. С увеличением $T_{f_{011}}$ (т. е. $n > 1$) аналогичные закономерности повторяются при взаимной перемене номеров генераторов.

Таким образом, изменение T_1 и T_2 и перераспределение составляющих I_{CB1} и I_{CB2} в той или иной степени меняют кривые свободных токов во времени по сравнению с теми, которые имеют место при $T_{f_{011}} = T_{f_{01}}$. В качестве характерных примеров на рис. 10-3, в и г приведены временные зависимости свободных токов $I_{K,CB}$, $I_{I-I_{CB}}$ и $I_{II-I_{CB}}$ при n , равном 0,5 (рис. 10-3, в); 2,0 и 4,0 (рис. 10-3, г). Токи здесь выражены в долях $I_{K,CB|0|}$, а время t — в долях $T_{f_{01}}$, что придает зависимостям более общий характер. Для сравнения проведены аналогичные кривые при полной симметрии схемы (т. е. при $n = 1$).

Как видно из рис. 10-3, в и г, в зависимости от того, в какую сторону изменилась величина $T_{f_{011}}$, затухание тока в месте короткого замыкания происходит соответственно быстрее или медленнее. В генераторе с меньшей постоянной времени T_{f_0} свободный ток затухает быстрее и его значения в промежуточные моменты переходного процесса меньше, чем при $T_{f_{011}} = T_{f_{01}}$. В генераторе с большей T_{f_0} наблюдается обратная картина, причем чем больше различие между этими постоянными времени, тем медленнее происходит изменение свободного тока этого генератора в начальной стадии процесса. Более того, начиная с известного для данной схемы соотношения между $T_{f_{011}}$ и $T_{f_{01}}$, свободный ток генератора с большей постоянной времени в начальной стадии процесса не затухает, а, напротив, возрастает, хотя никакого автоматического регулирования возбуждения не имеется.

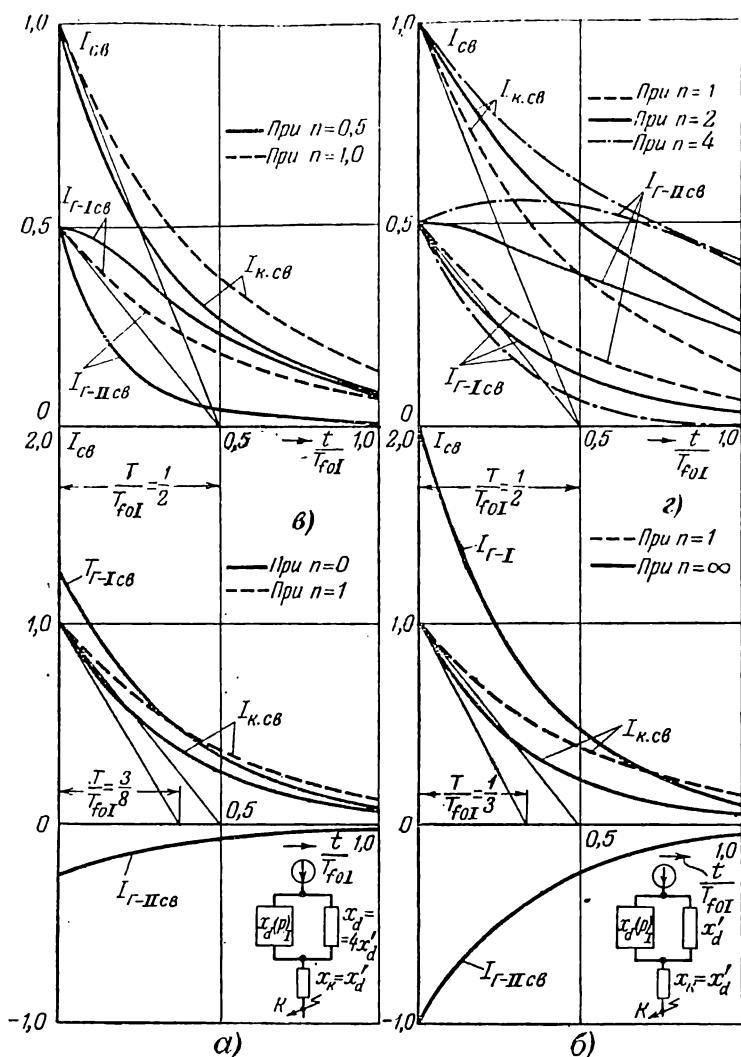


Рис. 10-3. Изменение свободных токов во времени при разных соотношениях между постоянными времени обмоток возбуждения генераторов $n = T_{foII}/T_{foI}$.

Это возрастание является следствием быстрого затухания свободного тока другого генератора.

Последнее обстоятельство просто и наглядно выявить в предельных (в отношении n) случаях, которые

по существу соответствуют замене генератора $\Gamma-II$ источником бесконечной мощности, приключенным через соответствующую реактивность. Так, при $n=0$ имеем $x_d(p)_{II}=4x'_d$ и схема замещения будет иметь вид, представленный на рис. 10-3,а, откуда, в частности, можно сразу написать для постоянной времени свободного тока:

$$T = T_{f01} \frac{x'_d + (x'_d // 4x'_d)}{x_d + (x'_d // 4x'_d)} = \frac{3}{8} T_{f01}.$$

При этом свободный ток генератора $\Gamma-II$ противоположен его принужденному току, что приводит к нарастанию полного тока в этой ветви. Характер изменения свободных токов для данного случая виден по кривым рис. 10-3,а.

Еще более заметное возрастание тока генератора $\Gamma-II$ получается в другом предельном случае, когда $n=\infty$ (рис. 10-3,б). Здесь постоянная времени $T=1/3T_{f01}$. В обоих предельных случаях свободный ток генератора $\Gamma-I$ больше свободного тока в месте короткого замыкания.

10-3. ВЛИЯНИЕ КАЧАНИЙ СИНХРОННЫХ МАШИН ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

В зависимости от величины испытываемого машиной при коротком замыкании толчка качания машины могут быть затухающими или, напротив, прогрессивно возрастающими, при которых она выпадает из синхронизма. При сильных толчках выпадение наступает без всяких качаний. Анализ поведения машины в подобных условиях является по существу задачей исследования ее динамической устойчивости.

Как отмечалось в § 10-1, для упрощения задачи в качестве исходной примем схему рис. 10-4,а, где генератор Γ связан с системой C , рассматриваемой как источник бесконечной мощности. Короткое замыкание предполагается за реактивностью x_k . Схема замещения для данного случая представлена на рис. 10-4,б.

Пусть предшествующий режим генератора характеризуется векторной диаграммой рис. 10-4,в (относящиеся к этому режиму векторы проведены пунктиром). Качания

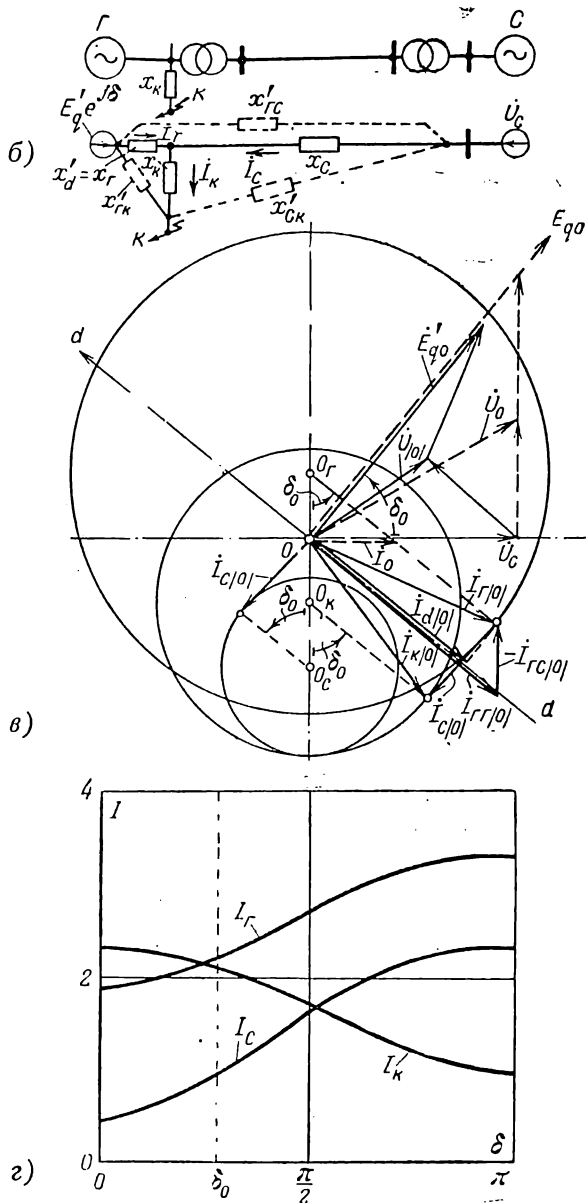


Рис. 10-4. К определению влияния качаний генераторов при коротком замыкании.

а — исходная схема; б — схема замещения; в — векторная и круговые диаграммы; г — изменение токов в зависимости от угла δ .

генератора определяются изменением угла δ между вращающимся синхронно вектором напряжения системы U_C и вектором э. д. с. E'_q (или $\dot{E}_q$).

Определив для схемы рис. 10-4, б результирующие собственные ($x'_{ГГ}$ и $x'_{СС}$) и взаимные ($x'_{ГС}$, $x'_{ГК}$ и $x'_{СК}$) реактивности, в соответствии с принятыми положительными направлениями токов для каждой ветви можно написать:

$$I_{Г} = \frac{E'_q}{x'_{ГГ}} e^{-j\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right)} - \frac{U_C}{x'_{ГСj}} e^{-j\frac{\pi}{2}}; \quad (10-1)$$

$$I_{С} = \frac{U_C}{x'_{СС}} e^{-j\frac{\pi}{2}} - \frac{E'_q}{x'_{ГСj}} e^{-j\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right)}; \quad (10-2)$$

$$I_{К} = \frac{E'_q}{x'_{ГК}} e^{-j\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right)} + \frac{U_C}{x'_{СК}} e^{-j\frac{\pi}{2}}. \quad (10-3)$$

Нетрудно убедиться, что при постоянном модуле э. д. с. E'_q с изменением угла δ концы векторов токов $I_{Г}$, $I_{С}$ и $I_{К}$ перемещаются по соответствующим окружностям, как показано на рис. 10-4, в. Развертка этих круговых диаграмм приведена на рис. 10-4, г. С ростом угла δ ток генератора и ток системы увеличиваются, стремясь каждый к своему максимуму при $\delta = \pi$, а ток в месте короткого замыкания, напротив, уменьшается и достигает своего минимума при $\delta = \pi$. Напряжение генератора, т. е. напряжение на x_K , пропорционально току I_K и, следовательно, закономерность $U = f(\delta)$ выражается кривой $I_K = \varphi(\delta)$, но только в ином масштабе. Причиной снижения напряжения генератора (и соответственно тока I_K) является то обстоятельство, что с ростом угла δ растет и уравнильный ток между генератором и системой.

Приведенные на рис. 10-4, в и г векторная диаграмма и кривые $I = \varphi(\delta)$ построены при следующих числовых значениях элементов схемы рис. 10-4, а: $x_d = 1,0$; $x_q = 0,65$; $x'_d = 0,30$; $x'_C = 0,57$; $x_K = 0,32$; $U_C = 1,0$; $I_0 = 1,0$; $E'_{q0} = 1,31$; $E_q = I_f = 1,85$. Все величины выражены в относительных единицах при номинальных условиях генератора.

Установим связь между E'_q и значением угла δ , считая, что закономерность изменения последнего во времени известна. При этом пренебрегаем апериодической составляющей тока статора, что равносильно неучету трансформаторных э. д. с.

Основное дифференциальное уравнение цепи обмотки возбуждения (считая ее приведенной к статору)

$$\frac{d\Psi_f}{dt} + r_f i_f = u_f;$$

имея в виду, что в системе относительных единиц $\Psi_f = E_f = \frac{x_f}{x_{ad}} E'_q$; $x_{ad} i_f = E_q$; $\frac{u_f}{r_f} x_{ad} = i_{fe} x_{ad} = E_{qe}$; $\frac{x_f}{r_f} = T_{f0}$, его можно записать в виде

$$T_{f0} \frac{dE'_q}{dt} + E_q = E_{qe}, \quad (10-4)$$

где E_{qe} — э. д. с., обусловленная принужденным током возбуждения; при автоматическом регулировании возбуждения она является переменной величиной.

В соответствии с векторной диаграммой рис. 10-4, в для абсолютной величины э. д. с. E_q имеем:

$$E_q = E'_q + I_d (x_d - x'_d);$$

если в него подставить значение модуля тока I_d генератора

$$I_d = \frac{E'_q}{x'_{\Gamma\Gamma}} - \frac{U_c}{x'_{\Gamma C}} \cos \delta,$$

то после простых преобразований получим:

$$E_q = \frac{x_{\Gamma\Gamma}}{x'_{\Gamma\Gamma}} E'_q - \frac{(x_d - x'_d)}{x'_{\Gamma C}} U_c \cos \delta, \quad (10-5)$$

где $x_{\Gamma\Gamma} = x'_{\Gamma\Gamma} + (x_d - x'_d)$ — результирующая собственная реактивность генератора, когда он участвует реактивностью x_d (а не x'_d).

Теперь, подставив (10-5) в (10-4) и имея в виду, что $T'_d = T_{f0} \frac{x'_{\Gamma\Gamma}}{x_{\Gamma\Gamma}}$ и $x'_{\Gamma C} \frac{x_{\Gamma\Gamma}}{x'_{\Gamma\Gamma}} = x_{\Gamma C}$ (взаимная реактивность

при представлении генератора реактивностью x_d), окончательно получим:

$$T'_d \frac{dE'_q}{dt} + E'_q = \frac{x'_{fF}}{x_{fF}} E_{qe} + \frac{(x_d - x'_d)}{x_{fF}} U_c \cos \delta = B(t). \quad (10-6)$$

Интегрирование этого уравнения дает искомую закономерность $E'_q = f(t)$ с учетом качаний генератора. Поскольку в общем случае зависимость $\delta = \xi(t)$ не может

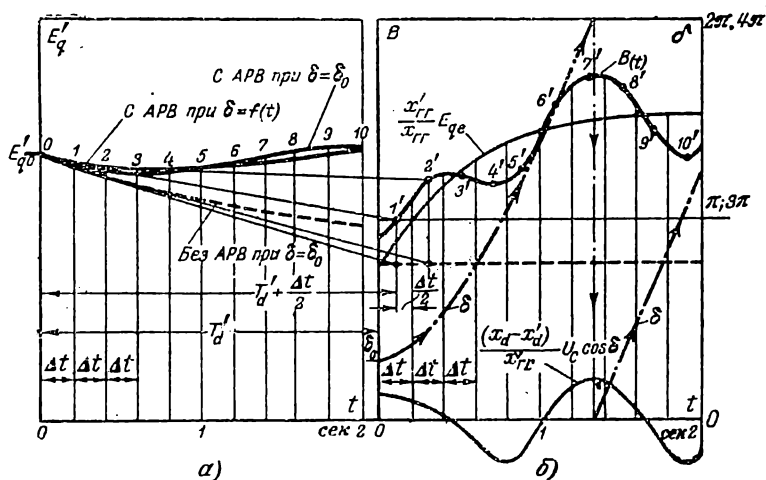


Рис. 10-5. К определению $E'_q = f(t)$ с учетом качаний генератора. а — построение кривой $E'_q = f(t)$; б — зависимость $\delta = \xi(t)$ и построение правой части уравнения (10-6).

быть выражена аналитической функцией, нельзя получить общее аналитическое решение поставленной задачи. Поэтому на практике обычно используют приближенное графическое или численное интегрирование (см. § 3-7).

Для условий схемы рис. 10-4,а изменение угла δ выражается кривой, представленной на рис. 10-5,б штрихпунктирной линией. Ее характер указывает на то, что при сохранении возникшего короткого замыкания генератор выпадает из синхронизма. На том же рисунке показаны кривые изменения каждого из слагаемых правой части уравнения (10-6) и их суммы. На расстоянии T'_d влево от оси ординат рис. 10-5,б строим (см. § 3-7) зависимость $E'_q = f(t)$, как показано на

рис. 10-5,а и б. Для сравнения аналогичные построения произведены без учета изменения угла δ , а также при отсутствии АРВ.

Несмотря на резкое изменение угла δ , оно сравнительно мало сказывается на изменении переходной э. д. с. E'_q (рис. 10-5,а). При наличии АРВ величина E'_q

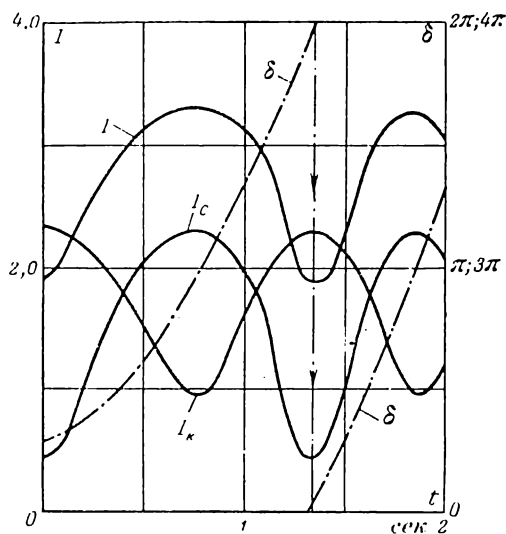


Рис. 10-6. Изменение угла δ и токов в функции времени для условий схемы рис. 10-4,б при $x_k=0,32$.

в рассматриваемом случае почти постоянна и равна своему начальному значению. Изменение токов во времени с учетом $\delta=\xi(t)$ представлено кривыми на рис. 10-6. С уменьшением продолжительности проворота ротора сокращается период колебания величин токов.

При большей удаленности короткого замыкания генератор после ряда качаний может остаться в синхронизме с системой даже при сохранении такого короткого. Подобные условия могут иметь место в схеме рис. 10-4,б, если принять, например, $x_k=0,52$. Соответствующие кривые изменения угла δ и токов во времени приведены на рис. 10-7. Здесь, как видно, влияние $\delta=\xi(t)$ сказывается меньше, особенно на токе в месте короткого замыкания.

Вернемся к уравнению (10-6). Его слагаемое, учитывающее влияние угла δ , обратно пропорционально взаимной реактивности

$$x_{ГС} = x_d + x_c + \frac{x_d x_c}{x_k},$$

величина которой может быть в пределах от $x_{ГС} = x_d + x_c$ (при $x_k = \infty$) до $x_{ГС} = \infty$ (при $x_k = 0$).

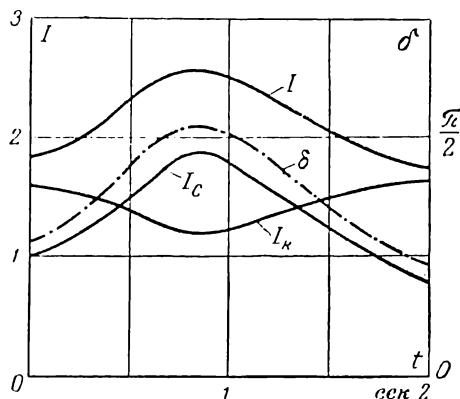


Рис. 10-7. Изменение угла δ и токов в функции времени при $x_k = 0,52$.

Чем слабее связь между генератором и системой в аварийных условиях, т. е. чем больше взаимная реактивность $x_{ГС}$, тем интенсивнее происходит изменение угла δ . Однако в целом с увеличением $x_{ГС}$ изменение угла δ проявляется на закономерности изменения E'_q в меньшей мере. Поэтому практически оказывается возможным пренебрегать влиянием качаний на изменение E'_q генератора. Что же касается самого учета качаний при коротких замыканиях, то он по существу может быть ограничен только соответствующим геометрическим суммированием токов от генератора и системы, как это подробнее изложено в § 11-8.

10-4. ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. Каковы предельные значения постоянных времени T_1 и T_2 в схеме рис. 10-1,а при изменении x_k от нуля до бесконечности, считая, что все прочие соотношения для данной схемы остаются прежними?

2. При каких условиях возможно увеличение свободного тока генератора в начальной стадии переходного процесса короткого замыкания?

3. Может ли быть увеличение свободного тока в месте короткого замыкания?

4. Для схемы рис. 10-8 известны следующие данные: генератор $G-I$: $x_d=1,0$; $x'_d=0,4$; $T_{f0}=5$ сек; генератор $G-II$: $x_d=1,4$; $x'_d=0,2$; $T_{f0}=7$ сек; $x=0,2$ и $x_k=0,5$. Все реактивности приведены к базисным условиям,

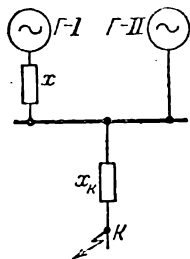


Рис. 10-8. К задаче 10-4.

Найти выражения для свободных токов в обоих генераторах и в месте короткого замыкания.

5. То же, что и в предыдущей задаче, но при условии, что у генератора $G-I$ постоянная времени $T_{f0}=\infty$.

6. Схему рис. 10-8 преобразовать в эквивалентный треугольник с операторными реактивностями и определить изменение свободного уравнительного тока между генераторами при коротком замыкании в точке K .

7. Оценить эквивалентные внешние реактивности от каждого генератора до места короткого замыкания, используя соответствующие взаимные реактивности для начального момента короткого замыкания в точке K схемы рис. 10-8. Считая найденные внешние реактивности постоянными, определить изменение свободного тока в месте короткого и сопоставить это изменение с полученным точным решением задачи п. 4.

8. Как сказываются качания генератора на протекании электромагнитного переходного процесса?

9. Как определить центры окружностей круговых диаграмм рис. 10-4, в?

10. Почему с изменением угла δ в пределах от 0 до π (рис. 10-4, в) токи источников питания возрастают, а ток в месте короткого, напротив, падает?

ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ

ПРАКТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

11-1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

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

При переходе к схемам с несколькими генераторами, как показано в предыдущей главе, задача точного расчета переходного процесса при коротком замыкании резко усложняется. Оставляя в стороне вопросы учета возникающих качаний генераторов и поведения присоединенных нагрузок, достаточно напомнить (см. § 10-2), что изменения свободных токов в каждом из генераторов взаимно связаны между собой. При автоматическом регулировании возбуждения аналогичная связь имеет место также в приращениях вынужденных токов. Трудность точного расчета дополнительно усугубляется различием параметров синхронной машины в продольной и поперечной осях ее ротора.

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

В силу указанных причин и имея в виду, что для решения многих практических задач не требуется знания точных результатов, были разработаны приближенные методы расчета переходного процесса короткого замыкания. В дальнейшем рассмотрены только те из них, которые в настоящее время достаточно широко используются главным образом в практике советской электросиловой техники.

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

Помимо ранее указанных допущений (см. § 2-1), в практических расчетах короткого замыкания дополнительно принимают, что:

1) закон изменения периодической слагающей тока короткого замыкания, установленный для схемы с одним генератором, можно использовать для приближенной оценки этой слагающей тока в схеме с произвольным числом генераторов;

2) учет апериодической слагающей тока короткого замыкания во всех случаях можно производить приближенно;

3) ротор каждой синхронной машины симметричен, т. е. параметры машины одинаковы при любом положении ротора.

Последнее допущение позволяет оперировать с э. д. с., напряжениями и токами без разложения их на продольные и поперечные составляющие. Одновременно оно исключает учет второй гармоники тока, образующейся от апериодической слагающей тока короткого замыкания при несимметричном роторе (см. § 9-2 и 9-3).

Различие между практическими методами расчета переходного процесса короткого замыкания преимущественно состоит в разном подходе к вычислению периодической слагающей тока короткого замыкания. Этот подход устанавливается и в известной мере диктуется требованиями и целевым назначением данного расчета. Те предположения и допущения, которые могут быть использованы в расчете, когда его задача ограничена, например, нахождением тока только в месте короткого замыкания и в особенности при большой удаленности последнего, оказываются уже непригодными, если требуется найти распределение тока по отдельным ветвям схемы, как это обычно необходимо при решении вопросов релейной защиты и автоматизации электрических систем. В последнем случае предъявляются большие требования к точности их результатов.

Не меньшие требования предъявляются к расчетам, проводимым для анализа аварий. Особая тщательность расчетов необходима в случаях, когда после аварии обнаружены повреждения оборудования и встает вопрос о рекламации к заводам-поставщикам или возникают спорные вопросы.

Наблюдения за переходными процессами короткого замыкания в электрических системах позволяют установить, что:

1) начальные значения токов, вычисленные практическими методами, хорошо согласуются с осциллографическими записями (ошибка в пределах $\pm 5\%$);

2) если короткое замыкание не сопровождается сильными качаниями генераторов, то практические методы (без учета качаний) позволяют с вполне удовлетворительной точностью (ошибка не превышает $\pm 10 \div 15\%$) вычислить значение тока в аварийной ветви в произвольный момент переходного процесса; для прочих ветвей схемы ошибка вычислений оказывается обычно большей, причем она растет по мере удаления от точки короткого замыкания и увеличения длительности короткого замыкания.

Применение специальных расчетных моделей (столов), на которых искомые величины можно получить в определенных масштабах по показаниям измерительных приборов, в значительной мере упрощает и ускоряет выполнение необходимых вычислений, особенно в сложных схемах. При этом точность получаемых результатов определяется не только точностью самой модели, но и точностью метода, использованного на этой модели.

11.2. РАСЧЕТ НАЧАЛЬНОГО СВЕРХПЕРЕХОДНОГО И УДАРНОГО ТОКОВ КОРотКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Вычисление периодической слагающей тока трехфазного короткого замыкания в начальный момент — начального сверхпереходного тока — принципиальных трудностей, вообще говоря, не представляет. Каждая синхронная машина, участвующая в заданной схеме, в начальный момент внезапного нарушения режима, как установлено в § 6-3, в полной мере характеризуется своими сверхпереходными реактивностями и э. д. с. в продольной и поперечной осях. Значения этих э. д. с. известны из предшествующего режима. В машинах без специальных демпферных обмоток благодаря естественному демпфированию роторов все же проявляется сверхпереходный процесс. Последний приближенно может быть учтен, если принять для таких машин $x''_d = (0,75 \div 0,9)x'_d$.

Таблица 11-1

Средние значения x'' и E''_0
(в относительных единицах при номинальных условиях)

№ п/п.	Наименование элемента	x''	E''_0
1	Турбогенератор	0,125	1,08
2	Гидрогенератор с демпферными обмотками	0,20	1,13
3	То же без демпферных обмоток	0,27	1,18
4	Синхронный двигатель	0,20	1,10
5	" компенсатор	0,20	1,20
6	Асинхронный двигатель	0,20	0,90
7	Обобщенная нагрузка	0,35	0,85

Поскольку в практических расчетах, как указывалось в § 11-1, принимают $x''_q = x''_d$, значения сверхпереходных э. д. с. определяют по выражению (6-37). Говоря о синхронных машинах, здесь имеют в виду не только генераторы, но и синхронные двигатели и компенсаторы.

Асинхронные двигатели и обобщенная нагрузка, как показано в § 6-4, в начальный момент внезапного нарушения режима также характеризуются своими x'' и E''_0 .

Таким образом, для вычисления начального сверхпереходного тока нужно составить схему замещения, введя в нее все генераторы, крупные синхронные и асинхронные двигатели и компенсаторы, а также обобщенные нагрузки отдельных достаточно крупных узлов своими приведенными значениями x'' и E''_0 . При отсутствии необходимых данных и во всех приближенных расчетах можно принимать средние значения¹ x'' и E''_0 , указанные в табл. 11-1. Дальнейшее решение такой схемы производится в соответствии с указаниями гл. 2. В частности, абсолютная величина начального сверхпереходного тока в месте короткого замыкания может быть определена как

$$I''_K = \frac{U_{K0}}{x''_{\Sigma}}, \quad (11-1)$$

где U_{K0} — предшествующее напряжение в месте короткого;

¹ Для генераторов мощностью до 100 Мвт.

x''_z — результирующая реактивность схемы относительно точки короткого.

Когда задан предшествующий режим, часто используют известный принцип наложения (см. § 2-7), в соответствии с которым режим в начальный момент короткого замыкания может быть получен наложением собственно аварийного режима на предшествующий режим. При этом для упрощения расчет собственно аварийного режима производят приближенно, учитывая только индуктивные сопротивления элементов; при известных условиях отбрасывают также нагрузочные ветви.

Как отмечалось ранее, поведение нагрузки в начальный момент короткого замыкания зависит от величины остаточного напряжения в точке ее присоединения или от ее удаленности относительно места короткого. Чтобы иметь наглядное представление о влиянии нагрузки в начальный момент короткого замыкания, на рис. 11-1 показаны элементарная схема и построенные для нее кривые изменения начальных сверхпереходных токов отдельных ветвей и остаточного напряжения генератора в функции удаленности короткого замыкания x_k . Кривые построены при условии, что мощность подключенной обобщенной нагрузки равна номинальной мощности генератора.

Из характера кривой $I''_n = f(x_k)$ следует, что при $x_k < 0,46$ нагрузка проявляет себя как дополнительный источник, причем достаточно заметное ее влияние сказывается лишь при малых значениях x_k . Далее, при $x_k > 0,46$ нагрузка продолжает потреблять ток от генератора, снижая тем несколько ток в ветви короткого. Очевидно, чем больше генератор удален от короткого замыкания и, напротив, чем ближе нагрузка к короткому замыканию, тем сильнее сказывается ее относительное участие в питании короткого замыкания. В рассматриваемых условиях наибольшее увеличение тока I''_n от дополнительного питания нагрузкой, которое имеет место при $x_k = 0$, составляет примерно 25%.

При выполнении практических расчетов начального сверхпереходного тока в месте короткого замыкания и ближайших к нему ветвях обычно учитывают только те нагрузки, которые непосредственно связаны с точкой

короткого. Это допущение упрощает расчет, не внося существенной погрешности.

При определении ударного тока короткого замыкания обычно учитывают затухание лишь апериодической составляющей тока, считая, что амплитуда сверхпереход-

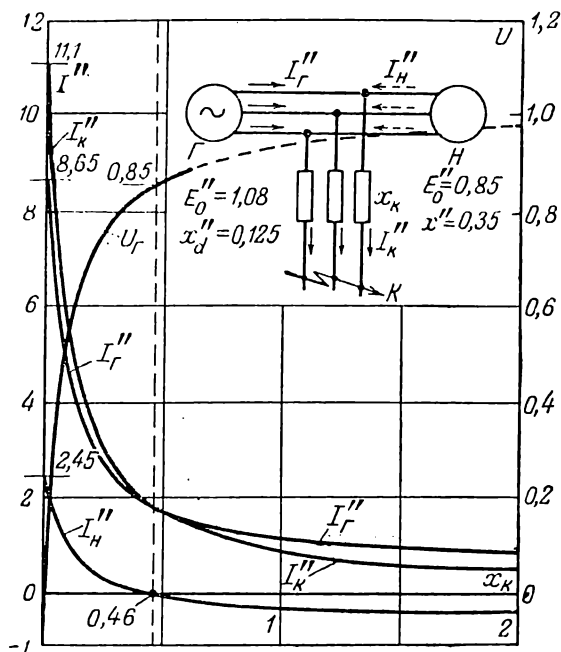


Рис. 11-1. Влияние нагрузки в начальный момент короткого замыкания.

ного тока за полпериода практически сохраняет свое начальное значение. При этом в соответствии с § 3-2 ударный ток, определяемый для наиболее тяжелых условий, будет

$$i_y = k_y \sqrt{2} I'', \quad (11-2)$$

где k_y — ударный коэффициент, определяемый по (3-9).

Ударный коэффициент, как известно, зависит от постоянной времени T_a , которая в свою очередь пропорциональна отношению x/r . Характерные значения этого отношения для отдельных элементов системы приведе-

ны в табл. 11-2. Ими можно пользоваться при отсутствии необходимых данных.

Для разветвленной схемы значение эквивалентной постоянной времени $T_{a.э}$ находят согласно указаниям § 3-5. При этом следует отметить, что использование для синхронных машин реактивностей x''_d вместо x_2 , которое нужно было бы для определения T_a (см. § 9-2 и 9-3), не имеет существенного значения, так как величины этих реактивностей достаточно близки друг к другу (см. § 13-2).

Таблица 11-2

Значения x/r для элементов электрической системы

№ п/п.	Наименование элемента	Отношение x/r
1	Турбогенераторы мощностью 12—60 <i>Мвт</i>	50—85
2	То же мощностью 100—500 <i>Мвт</i>	100—135
3	Гидрогенераторы без демпферных обмоток . .	60—90
4	То же с демпферными обмотками	40—60
5	Трансформаторы мощностью 5—30 <i>Мва</i>	7—17
6	То же мощностью 60—500 <i>Мва</i>	20—50
7	Реакторы 6—10 <i>кв</i> до 1 000 <i>а</i>	15—70
8	То же 1 500 <i>а</i> и выше	40—80
9	Воздушные линии	2—8
10	Трехжильные кабели с медными и алюминиевыми жилами сечением 3×95—3×185 <i>мм</i> ² .	0,2—0,8

По данным табл. 11-2 можно произвести ориентировочный подсчет отношения x/r для характерных точек электрической системы и затем определить соответствующие ему величины ударного коэффициента. Результаты такого подсчета приведены в табл. 11-3.

При учете асинхронных двигателей в качестве дополнительных источников питания нужно иметь в виду, что постоянные времени затухания периодической и аperiodической слагающих посылаемого ими тока одного порядка (0,05—0,15 *сек*), т. е. затухание периодической слагающей происходит столь же быстро, как и аperiodической слагающей. Поэтому в ударном коэффициенте для асинхронных двигателей должно быть учтено одновременное затухание обеих слагающих тока. Ряд проведенных испытаний асинхронных двигателей разных ти-

Значения отношения x/r и ударного коэффициента k_y при коротком замыкании в характерных точках электрической системы

№ п/п.	Место короткого замыкания и характеристика электрической цепи	Отношение x/r	Ударный коэффициент k_y
1	Сборные шины 6—10 кВ станций с генераторами мощностью 30—60 Мвт	40—80	1,92—1,96
2	За линейным реактором до 1000 а, присоединенным к сборным шинам станций по п. 1	20—60	1,85—1,95
3	Сборные шины повышенного напряжения станций с трансформаторами мощностью 100 Мва (в единице) и выше	30—60	1,89—1,95
4	То же с трансформаторами мощностью 30—100 Мва (в единице)	20—50	1,85—1,94
5	Сборные шины вторичного напряжения подстанций с трансформаторами мощностью 100 Мва (в единице) и выше; сопротивление трансформаторов составляет 90% и выше результирующего сопротивления до места короткого	20—40	1,85—1,92
6	То же с трансформаторами мощностью 30—100 Мва (в единице)	15—30	1,81—1,89
7	Точки системы, удаленные от генераторов (сборные шины вторичного напряжения подстанций с трансформаторами 20 Мва и ниже, сборные шины подстанций в распределительных сетях и др.)	15 и ниже	1,8 и ниже

пов и разной мощности в условиях внезапного короткого замыкания [Л. 77] позволил выявить примерный диапазон изменений величины их ударного коэффициента (заштрихованная зона на рис. 11-2). Проведенная на рис. 11-2 средняя кривая может быть использована для оценки ударного коэффициента в зависимости от мощности двигателя. Как видно, для крупных двигателей он порядка 1,8 и с уменьшением мощности двигателя снижается (при 200 квт он равен около 1,6).

Для мелких двигателей, а также для обобщенной нагрузки ударный коэффициент практически можно принимать $k_y = 1$.

Величина ударного коэффициента для синхронных двигателей примерно та же, что и для синхронных генераторов равновеликой мощности.

Таким образом, при отдельном учете асинхронных двигателей ударный ток в месте короткого замыкания будет

$$i_y = k_y \sqrt{2} I'' + k_{y.d} \sqrt{2} I''_d, \quad (11-3)$$

где I''_d — начальный сверхпереходный ток от асинхронных двигателей;

$k_{y.d}$ — ударный коэффициент для этих двигателей.

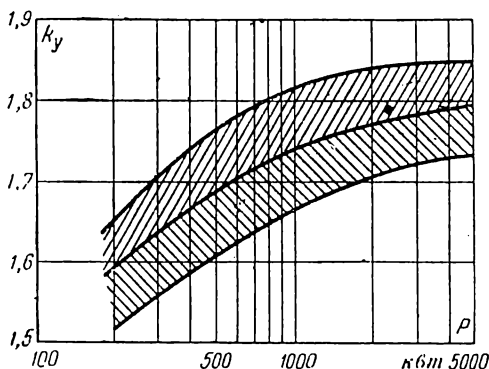


Рис. 11-2. Значения ударного коэффициента для асинхронных двигателей.

Пример 11-1. При трехфазном коротком замыкании в точке К схемы рис. 11-3,а вычислить начальный сверхпереходный ток в линии Л-1. Величины токов предшествующего режима указаны на схеме, причем они выражены в комплексной форме в предположении, что вектор напряжения системы по направлению совпадает с осью действительных положительных величин.

Генератор 353 Мва, 20 кВ; $x''_d = 0,173$; система — источник бесконечной мощности с неизменным напряжением 115 кВ. Трансформаторы: Т-1 360 Мва, 242/20 кВ; $u_k = 14\%$; Т-2 240 Мва, 214,5/121 кВ; $u_k = 14\%$; Т-3 120 Мва, 209/11 кВ; $u_k = 14\%$. Линии Л-1 и Л-2 одинаковы, каждая по 80 км; $x = 0,42$ Ом/км одной цепи.

Примем базисные условия: $S_6 = 500$ Мва и $U_{6II} = 115$ кВ. Тогда

$$U_{6II} = 115 \frac{214,5}{121} = 204 \text{ кВ}; U_{6I} = 204 \frac{20}{242} = 16,9 \text{ кВ}; U_{6IV} = 204 \frac{11}{209} = 10,75 \text{ кВ} \text{ и } I_{6II} = \frac{500}{\sqrt{3} \cdot 204} = 1,41 \text{ кА}.$$

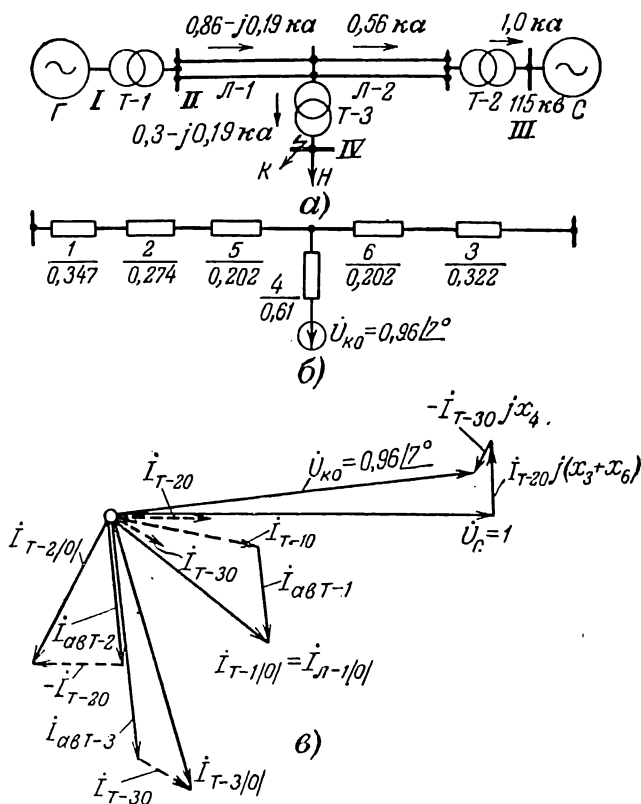


Рис. 11-3. К примеру 11-1.

а — исходная схема; б — схема замещения; в — векторная диаграмма.

Подсчитанные при этих условиях относительные величины реактивностей отдельных элементов указаны на схеме замещения рис. 11-3,б.

Найдем искомый ток путем наложения собственно аварийного тока, протекающего по линии Л-1, на заданный предшествующий ток этой линии. Для этого нужно предварительно найти напряжение, которое было в месте короткого до его возникновения. Это легко сделать построением векторной диаграммы, как показано на рис. 11-3,в, откуда $\dot{U}_{к.0} = 0,96 \angle 7^\circ$.

Результирующая реактивность схемы относительно места короткого замыкания¹

$$x_{\Sigma} = [(0,347 + 0,274 + 0,202) \parallel (0,322 + 0,202)] + 0,61 = 0,93.$$

¹ Нагрузка Н за трансформатором Т-3 отброшена, так как короткое замыкание в точке К отсекает ее.

Аварийная составляющая тока в линии Л-1

$$I_{ав} = \frac{0,96 \angle 7^\circ}{0,93 \angle 90^\circ} \cdot \frac{(0,93 - 0,61)}{(0,347 + 0,274 + 0,202)} = 0,4 \angle -83^\circ,$$

или

$$I_{ав} = 1,41 \cdot 0,4 \angle -83^\circ = 0,564 \angle -83^\circ = 0,07 - j0,56 \text{ кА}.$$

Искомый ток в обеих цепях линии Л-1

$$I = 0,86 - j0,19 + 0,07 - j0,56 = 0,93 - j0,75 = 1,2 \angle -39^\circ \text{ кА}.$$

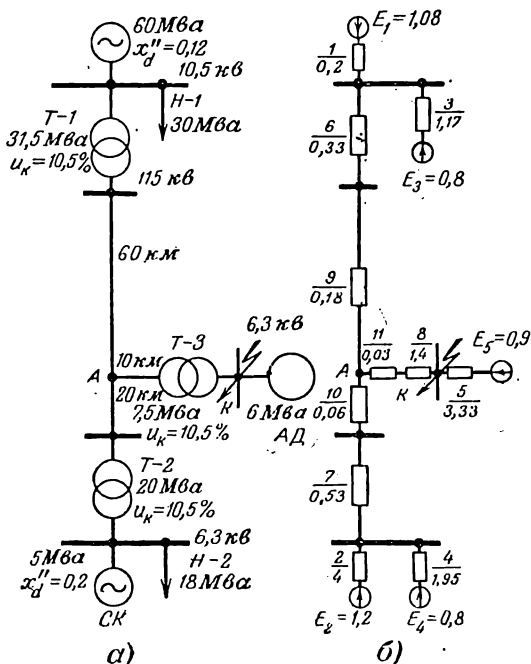


Рис. 11-4. К примеру 11-2.

а — исходная схема; б — схема замещения.

Аналогично нетрудно найти токи на других участках схемы. Они показаны на векторной диаграмме рис. 11-3, в.

Пример 11-2. Вычислить ударный ток при трехфазном коротком замыкании в точке К схемы рис. 11-4, а.

Произведем сначала расчет с учетом всех присоединенных нагрузок. В этом случае схема замещения имеет вид, представленный на рис. 11-4, б, где все реактивности выражены в относительных единицах при $S_6 = 100 \text{ Мва}$ и $U_6 = U_{ср}$, а относительные значения э. д. с. приняты по табл. 11-1.

Постепенным преобразованием схемы находим:

$$\begin{aligned}x_{12} &= 0,2 // 1,17 = 0,17; & E_6 &= E_1 // E_3 = 1,04; \\x_{13} &= 0,17 + 0,33 + 0,18 = 0,68; & x_{14} &= 1,95 // 4 = 1,31; \\E_7 &= E_2 // E_4 = 0,93; & x_{15} &= 1,31 + 0,53 + 0,06 = 1,9; \\x_{16} &= 1,9 // 0,68 = 0,5; & E_8 &= E_6 // E_7 = 1,01; \\x_{17} &= 0,5 + 0,03 + 1,4 = 1,93.\end{aligned}$$

Начальный сверхпереходный ток со стороны трансформатора $T-3$ в относительных единицах

$$I'' = \frac{1,01}{1,93} = 0,524.$$

Поскольку остаточное напряжение в точке A

$$U = 0,524(1,4 + 0,03) = 0,75,$$

это уже указывает, что нагрузки $H-1$ и $H-2$ не являются источниками питания, так как остаточные напряжения в точках их присоединения будут $U \geq 0,8$.

Теперь по данным табл. 11-2 оценим величины активных сопротивлений элементов схемы:

$$\begin{aligned}r_1 &= \frac{0,2}{80} = 2,5 \cdot 10^{-3}; & r_2 &= \frac{4}{40} = 100 \cdot 10^{-3}; & r_6 &= \frac{0,33}{17} = 19,4 \cdot 10^{-3}; \\r_7 &= \frac{0,53}{15} = 35,3 \cdot 10^{-3}; & r_8 &= \frac{1,4}{10} = 140 \cdot 10^{-3}; & r_9 &= \frac{0,18}{3} = 60 \cdot 10^{-3}; \\r_{10} &= \frac{0,06}{2,5} = 24 \cdot 10^{-3}; & r_{11} &= 12 \cdot 10^{-3}.\end{aligned}$$

Результирующее активное сопротивление схемы

$$r = \{[(2,5 + 19,4 + 60) // (100 + 35,3 + 24)] + 12 + 140\} 10^{-3} = 0,206.$$

Отношение $\frac{x}{r} = \frac{1,93}{0,206} = 9,4$; по кривой рис. 3-7 находим значение ударного коэффициента $k_y = 1,72$.

Таким образом, с учетом попытки от асинхронного двигателя $АД$, для которого по кривой рис. 11-2 принимаем $k_{y.д} = 1,8$, искомый ударный ток будет¹

$$i_y = 1,72 \sqrt{2} \cdot 0,524 \cdot 9,2 + 1,8 \sqrt{2} \cdot \frac{0,9}{3,33} \cdot 9,2 = 11,7 + 6,3 = 18,0 \text{ ка},$$

¹ Параметров асинхронного двигателя можно было вообще не приводить к базисным условиям и посылаемый им ток определять как

$$i_{y.д} = 1,8 \sqrt{2} \cdot \frac{0,9}{0,2} \cdot \frac{6}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 6,3 \text{ ка}.$$

где

$$I_0 = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 9,2 \text{ ка.}$$

В данном случае участие асинхронного двигателя составляет ~35%.

При более упрощенном расчете, если пренебречь нагрузками $H-1$ и $H-2$ и считать $E''_0=1$, общая реактивность схемы (без асинхронного двигателя) $x=2,4$ и, следовательно,

$$I'' = \frac{1}{2,04} = 0,49,$$

т. е. эта составляющая тока оказалась уменьшенной на 6,5%.

11-3. ПРИБЛИЖЕННЫЙ УЧЕТ СИСТЕМЫ

В практических расчетах коротких замыканий учет электрической системы часто производят приближенно. При отсутствии данных о ней ее рассматривают как источник бесконечной мощности, участие которого в питании короткого замыкания ограничено только сопротивлениями тех элементов (линии, трансформаторы, реакторы и пр.), через которые точка короткого замыкания связана с системой.

Если известна величина начального тока I'' или мощности $S''_к$ при трехфазном коротком замыкании в каком-либо узле системы, то по ней легко определить реактивность системы относительно этого узла:

$$x_c = \frac{U_{ср}}{\sqrt{3} I''} = \frac{U_{ср}^2}{S''_к}, \text{ ом} \quad (11-4)$$

или

$$X_{c(0)} = \frac{I_0}{I''} = \frac{S_0}{S''_к}, \quad (11-5)$$

где $U_{ср}$ — среднее напряжение той ступени, где известен ток I'' ;

I_0 — базисный ток на той же ступени, что и ток I'' .

За этой реактивностью считают подключенным источник бесконечной мощности.

Реактивность системы можно также приближенно оценить из условия предельного использования выключателя, установленного или намечаемого к установке в данном узле системы, т. е. считая, что ток или мощ-

ность при трехфазном коротком замыкании непосредственно за этим выключателем равны соответственно его номинальному отключаемому току $I_{от.н}$ или номинальной отключаемой мощности $S_{от.н}$ при напряжении данной ступени. В этом случае, очевидно, в (11-4) и (11-5) под током I'' или мощностью $S''_к$ следует понимать соответственно $I_{от.н}$ или $S_{от.н}$.

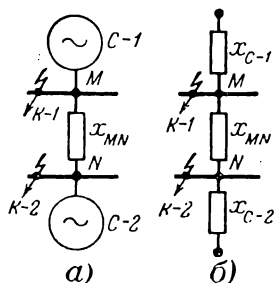


Рис. 11-5. К определению реактивности системы.

а — исходная схема; б — схема замещения.

Если в рассматриваемом узле имеется еще местная станция, которая при трехфазном коротком замыкании в этом узле создает ток $I''_{ст}$ или мощность $S''_{ст}$, то при оценке реактивности системы по условию предельного использования выключателя в данном узле следует исходить из величины тока ($I_{от.н} - I''_{ст}$) или мощности ($S_{от.н} - S''_{ст}$). При этом для упрощения, а также с целью некоторого запаса под током короткого замыкания (и соответствующей ему мощностью короткого замыкания) станции следует понимать периодическую слагающую тока короткого замыкания в начальный момент, т. е. начальный сверхпереходный ток (или соответствующую ему мощность $S''_{ст}$).

Возможны также более сложные случаи, когда связи с одной или несколькими неизвестными системами осуществляются в нескольких точках; в каждой из них могут быть заданы возможные или допустимые величины токов (или мощностей) короткого замыкания. Так, например, если при трехфазных коротких замыканиях поочередно в узлах M и N схемы рис. 11-5, а, связанных между собой реактивностью x_{MN} , начальные сверхпереходные токи составляют I''_M и I''_N , то результирующие реактивности всей схемы относительно этих узлов будут:

$$x_{M\Sigma} = \frac{U_{ср}}{\sqrt{3} I''_M},$$

и

$$x_{N\Sigma} = \frac{U_{ср}}{\sqrt{3} I''_N},$$

или в соответствии со схемой замещения рис. 11-5,б

$$\left. \begin{aligned} x_{M\Sigma} &= \frac{x_{C-1}(x_{C-2} + x_{MN})}{x_{C-1} + x_{C-2} + x_{MN}}; \\ x_{N\Sigma} &= \frac{x_{C-2}(x_{C-1} + x_{MN})}{x_{C-1} + x_{C-2} + x_{MN}}. \end{aligned} \right\} \quad (11-6)$$

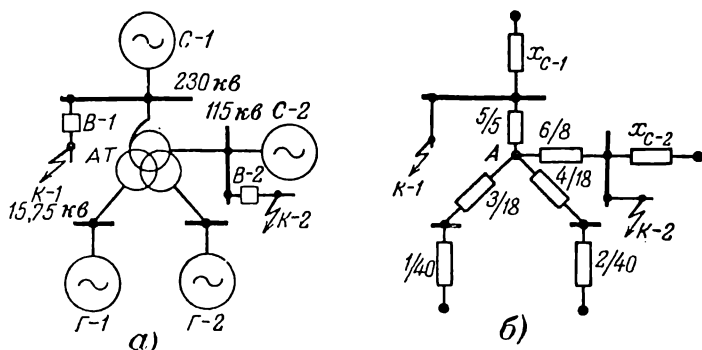


Рис. 11-6. К примеру 11-3.

а — исходная схема; б — схема замещения.

Из этих уравнений легко найти реактивности x_{C-1} и x_{C-2} , через которые обе системы присоединены к узлам M и N ; при этом системы считаются источниками бесконечной мощности, т. е. за x_{C-1} и x_{C-2} поддерживается синусоидальное напряжение постоянной амплитуды.

Привести среднее значение отношения x/r для системы в целом, вообще говоря, не представляется возможным, так как оно в значительной мере зависит от положения точки короткого замыкания в системе. Как следует из данных табл. 11-2 и 11-3, при преобладании в схеме воздушных линий и особенно кабелей отношение x/r падает, а по мере приближения точки короткого к шинам станции оно, напротив, возрастает. В случаях отсутствия сведений о примыкающих к данному узлу элементах системы в качестве первого приближения, обеспечивающего известный запас расчета, можно для системы принимать $x/r \approx 50$.

Пример 11-3. Определить реактивности систем, присоединенных к шинам 230 и 115 кВ схемы рис. 11-6,а, исходя из условия предельного использования выключателей $B-1$ и $B-2$ по их отключающей способности.

Генераторы Г-1 и Г-2 по 235 Мва, 15,75 кВ; $x''_d = 18,8\%$. Авто-трансформатор АТ 480 Мва, 230/115/15,75/15,75 кВ; $u_{BC} = 12,5\%$ $u_{BH} = 22,2\%$; $u_{CH} = 25,1\%$; $u_{HH} = 34,8\%$.

Выключатели: В-1 типа ВВН-220-10 с номинальной отключаемой мощностью 10 000 Мва, В-2 типа ВВН-110-6 с номинальной отключаемой мощностью 6 000 Мва.

На рис. 11-6,б приведена схема замещения, реактивности элементов которой выражены в процентах при $S_6 = 500$ Мва и $U_6 = U_{ср}$.

По заданному условию результирующие реактивности схемы должны быть:

относительно точки К-1

$$x_{\Sigma} = \frac{500}{10\,000} \cdot 100 = 5\%;$$

относительно точки К-2

$$x_{\Sigma} = \frac{500}{6\,000} \cdot 100 = 8,33\%.$$

Эквивалентная реактивность обоих генераторов относительно точки А

$$x = \frac{40 + 18}{2} = 29\%.$$

Теперь по отношению к каждой из точек К-1 и К-2 в соответствии с заданным условием можно написать:

$$\frac{1}{29 // (x_{C-2} + 8) + 5} + \frac{1}{x_{C-1}} = \frac{1}{5};$$

$$\frac{1}{29 // (x_{C-1} + 5) + 8} + \frac{1}{x_{C-2}} = \frac{1}{8,33}.$$

Решение этой системы уравнений дает искомые реактивности

$$x_{C-1} = 6,9\% \text{ и } x_{C-2} = 17\%.$$

11-4. РАСЧЕТ ДЛЯ ВЫБОРА ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ ПО ОТКЛЮЧАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

При выборе (или проверке) выключателей по отключающей способности требуется определить величину расчетного отключаемого тока $I_{от.рас}$ или расчетной отключаемой мощности $S_{от.рас} = \sqrt{3} U_{н} I_{от.рас}$. Под расчетным отключаемым током для рассматриваемого присоединения в схеме понимают наибольший ожидаемый ток короткого замыкания, кото-

рый выключатель должен отключить при наиболее неблагоприятных условиях. При этом величина этого тока определяется как действующее значение полного тока короткого замыкания к моменту размыкания дугогасительных контактов выключателя.

Время от возникновения короткого замыкания до размыкания дугогасительных контактов складывается из времени действия релейной защиты и собственного времени действия выключателя. В качестве расчетного обычно принимают возможное наименьшее время размыкания контактов выключателя. Так, время действия современной релейной защиты может быть оценено величиной

порядка 0,5 *пер*. Тогда в зависимости от быстродействия самого выключателя расчетное время размыкания контактов можно принимать по данным табл. 11-4.

Таким образом, для выбора (или проверки) выключателей по отключающей способности необходимо определить действующее значение полного тока короткого замыкания для достаточно малых отрезков времени с возникновения короткого. Большой точности при таком расчете обычно не требуется, так как величины номинальных отключаемых токов смежных (по установленной заводами шкале) выключателей отличаются в 1,5 и более раз. Поэтому в общем случае для оценки затухания апериодической слагающей тока короткого замыкания здесь можно исходить из эквивалентной постоянной времени T_a , определяемой по (3-20) и используемой при нахождении ударного коэффициента (см. § 11-2). Если при этом пренебречь затуханием периодической слагающей тока короткого замыкания, т. е. считать сверхпереходный ток неизменным и равным I'' , то для указанных в табл. 11-4 значений расчетного времени не представляет труда по (3-13) подсчитать при разных значениях x/r (или T_a) величины полного тока короткого замыкания. Результаты такого подсчета приведены в виде сплошных кривых на рис. 11-7. Отложенные по оси ор-

Таблица 11-4
Расчетное время размыкания контактов выключателей

Полное время отключения выключателя, <i>пер/сек</i>	Расчетное время размыкания контактов выключателя, <i>пер/сек</i>
8/0,16 и выше	4/0,08
5/0,10	3/0,06
3/0,06	2/0,04
2/0,04	1/0,02

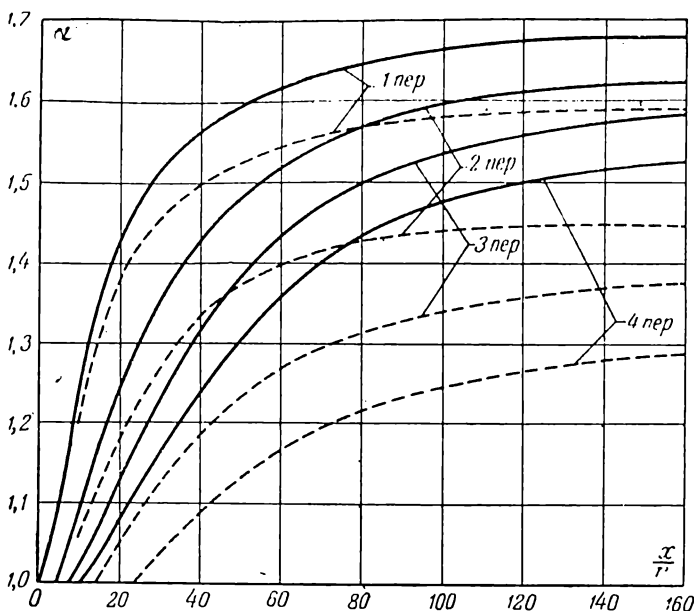


Рис. 11-7. Кривые для определения коэффициента α .
Сплошные кривые — без учета затухания периодической слагающей тока короткого замыкания; пунктирные кривые — с учетом затухания периодической слагающей тока короткого замыкания.

динат значения коэффициента α представляют собой отношения $I_{от.рас}/I''$. Следовательно, при найденном начальном сверхпереходном токе I''^* искомый расчетный отключаемый ток будет

$$I_{от.рас} = \alpha I''^*. \quad (11-7)$$

При коротком замыкании вблизи генераторов заметно сказывается также затухание и периодической слагающей тока (или свободного сверхпереходного тока, см. § 9-3). Дополнительный учет этого затухания (например, при $T''_d \approx 0,05$ сек) приводит соответственно к меньшим значениям коэффициента α , как это показывают аналогичные кривые на рис. 11-7, проведенные пунктиром. Последними следует пользоваться при определении расчет-

* Он может быть найден приближенно (см. § 11-2) как $I'' = \frac{U_{ср}}{\sqrt{3} x''_{\Sigma}} = \frac{I_6}{x''_{\Sigma(6)}}$.

ного отключаемого тока в цепях, находящихся вблизи генераторов, или при наличии не более одной ступени трансформации. В остальных случаях, как-то: при двух и более ступенях трансформации, за линейными реакторами и пр., значение коэффициента α нужно брать по сплошным кривым рис. 11-7.

Наконец, для весьма удаленных точек короткого замыкания (сборные шины вторичного напряжения подстанций с трансформаторами мощностью 20 Мва и ниже, сборные шины подстанций распределительных сетей и пр.) следует принимать $\alpha=1$.

В отдельных случаях, когда время действия релейной защиты заведомо больше 0,5 пер и собственное время выключателя заведомо больше 3,5 пер, расчетное время размыкания контактов принимается больше 4 пер и для него должно быть определено значение тока короткого замыкания, применяя иной метод расчета (см. § 11-5).

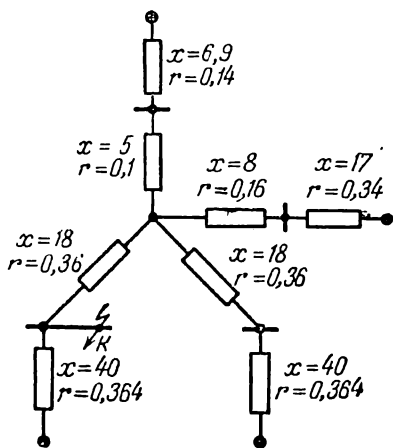


Рис. 11-8. К примеру 11-4.

Расчетный отключаемый ток определяется обычно при трехфазном коротком замыкании, как наиболее тяжелом. В системах с глухо заземленными нейтральными при известных условиях расчетным видом короткого замыкания может оказаться однофазное короткое. В этом случае следует руководствоваться указаниями § 15-7.

Пример 11-4. Для схемы рис. 11-6,а определить расчетный отключаемый ток выключателя, устанавливаемого в ответвлении от цепи генератора Г-1. Расчетное время размыкания контактов выключателя равно 4 пер. Реактивности элементов принять те же, что и в примере 11-3. Использовать также найденные в нем реактивности системы.

На рис. 11-8 показана схема замещения для данного случая. Реактивности и активные сопротивления ее элементов выражены в процентах при $S_6 = 500$ Мва и $U_6 = U_{ср}$. По данным табл. 11-2

для генераторов принято $\frac{x}{r} = 110$ и для остальных элементов $\frac{x}{r} = 50$.

Резльтирующие сопротивления относительно точки короткого замыкания составляют:

$$x_{\Sigma} = \{[(6,9 + 5) // (17 + 8) // (40 + 18)] + 18\} // 40 = 15,4\%;$$

$$r_{\Sigma} = \{[(0,14 + 0,1) // (0,34 + 0,16) // (0,364 + 0,36)] + 0,36\} // 0,364 = 0,21\%,$$

и их отношение $\frac{x_{\Sigma}}{r_{\Sigma}} = \frac{15,4}{0,21} = 74$, для которого по соответствующей кривой рис. 11-7 находим $\alpha = 1,2$. Искомый ток

$$I_{от.рас} = 1,2 \cdot \frac{100}{15,4} \cdot \frac{500}{\sqrt{3} \cdot 15,75} = 143 \text{ ка.}$$

11-5. МЕТОД РАСЧЕТНЫХ КРИВЫХ

Когда поставленная задача ограничена нахождением тока в месте короткого замыкания или остаточного напряжения непосредственно за аварийной ветвью, для проведения соответствующего расчета в течение многих лет широко используется метод расчетных кривых. Причиной этого являются его относительная простота и в большинстве случаев достаточная точность (в рамках указанной задачи).

Данный метод основан на применении специальных кривых, которые дают для произвольного момента процесса короткого замыкания значения периодической слагающей тока в месте короткого замыкания в функции так называемой расчетной реактивности схемы. Построение таких кривых произведено применительно к простейшей схеме рис. 11-9,а, где принято, что генератор предварительно работал с полной нагрузкой при $\cos \varphi = 0,8$ и номинальном напряжении. Соответственно этому нагрузка учтена полным сопротивлением, относительная величина которого $Z_{н} = 0,8 + j 0,6$ * считалась неизменной

* Учет нагрузки полным сопротивлением произведен для уточнения. Однако это дает малую поправку по сравнению с тем, когда нагрузка учтена приближенно с $x_{н} = j 1,2$.

в течение всего процесса короткого замыкания. Ветвь с реактивностью x_k , за которой предполагается трехфазное короткое замыкание, предварительно была не нагружена.

Для средних значений параметров генератора и при различной удаленности короткого замыкания в схеме рис. 11-9 по соответствующим выражениям § 9-3 и 9-4 вычислены величины периодической слагающей тока в месте короткого замыкания для ряда моментов времени процесса короткого. По полученным результатам построены расчетные кривые; при этом в качестве аргумента принята сумма реактивностей $x_{расч} = x''_d + x_k$, которая названа расчетной реактивностью (рис. 11-9, б).

В качестве примера на рис. 11-10 и 11-11 приведены расчетные кривые для типовых союзных генераторов средней мощности (до 50—100 Мвт)*. Значения тока и расчетной реактивности выражены в относительных единицах при номинальных условиях генератора. Разделение кривых по типу генераторов (турбо- и гидро-) вызвано тем, что их параметры значительно отличаются между собой (табл. 11-5).

Расчетные кривые построены до $x_{расч} = 3$. При $x_{расч} > 3$ изменение тока во времени столь незначительно, что его величину практически можно считать неизменной в течение всего процесса короткого замыкания и равной начальному значению.

С увеличением $x_{расч}$ различие в типах генераторов сказывается все меньше. Поэтому уже при $x_{расч} \geq 1$ расчетные кривые генераторов различных типов почти совпадают.

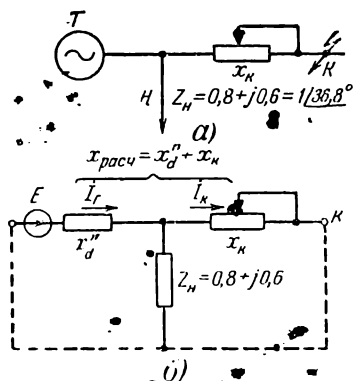


Рис. 11-9. Схема, принятая при построении расчетных кривых. а — исходная схема; б — схема замещения.

* Эти кривые разработаны в 1940 г. А. Б. Черинным и В. Я. Швагером. Аналогичные кривые ими построены также для генераторов без АРВ.

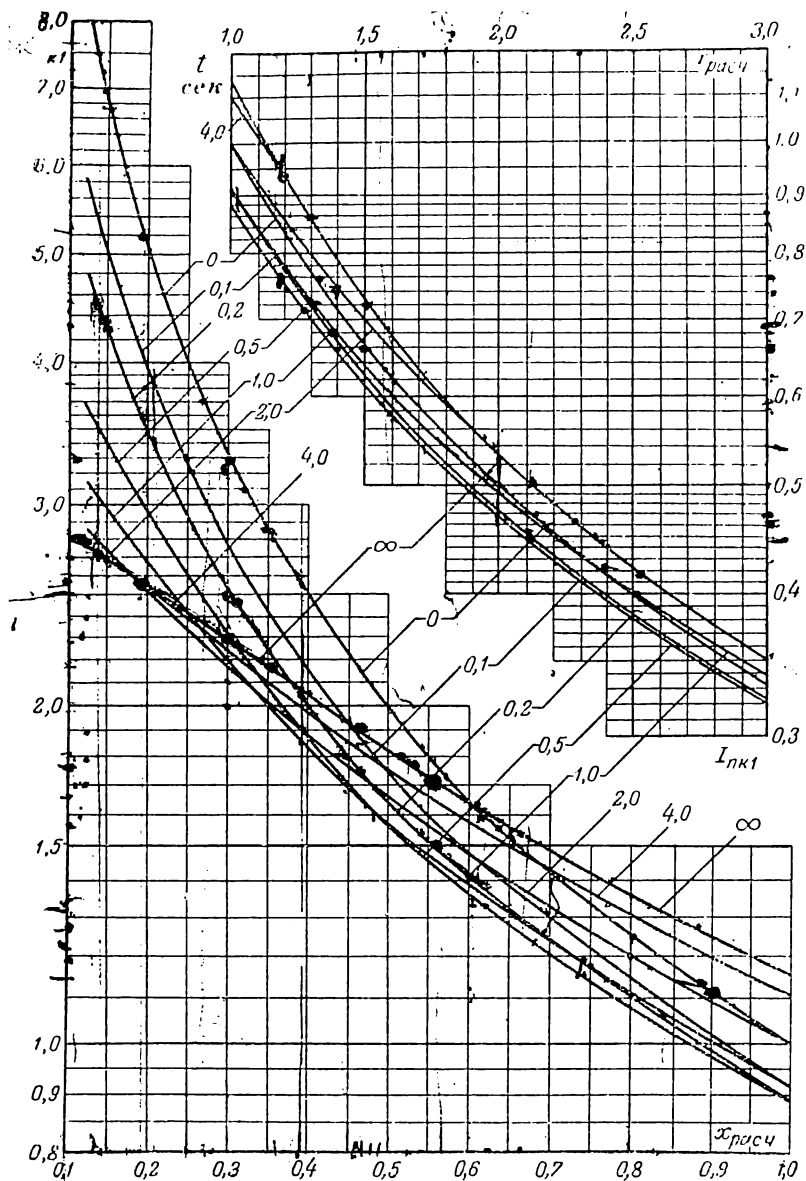


Рис. 11-10. Расчетные кривые для турбогенератора с автоматическим регулированием возбуждения,

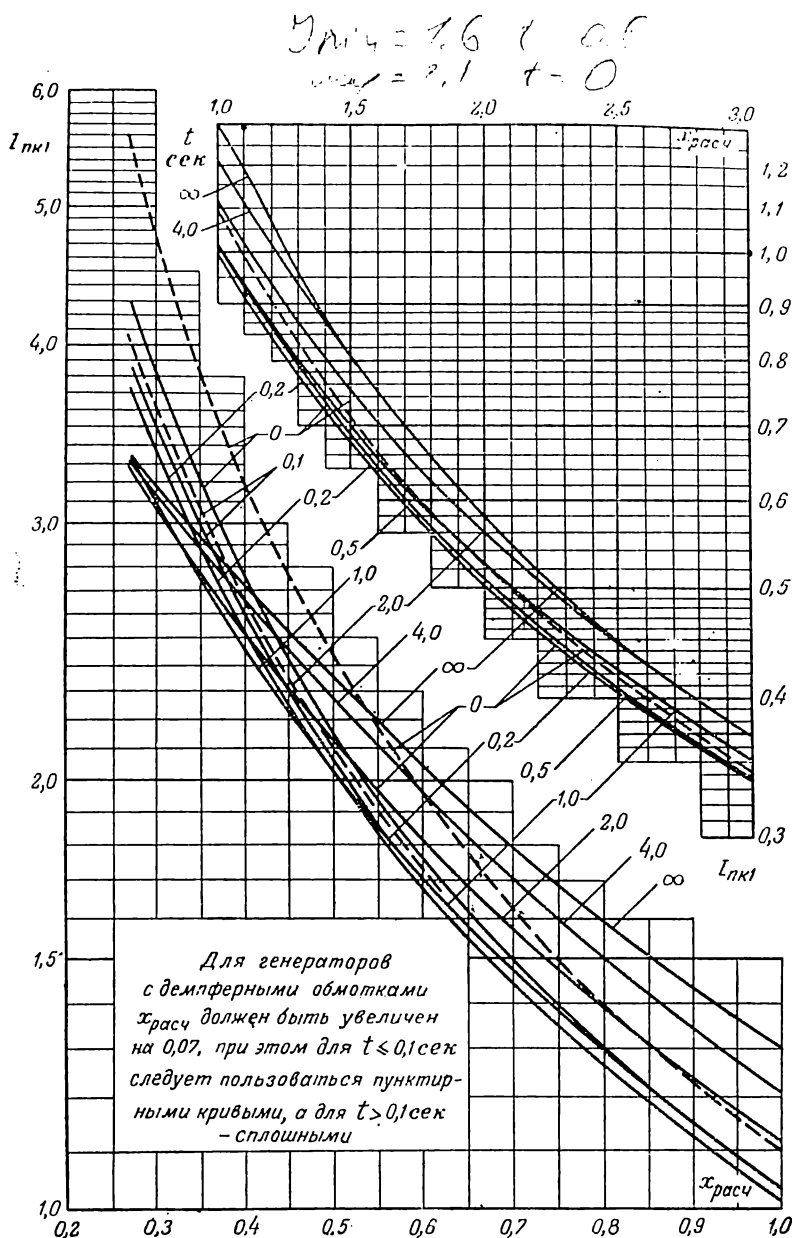


Рис. 11-11. Расчетные кривые для гидрогенератора с автоматическим регулированием возбуждения.

Параметры типовых союзных генераторов средней мощности

№ п/п.	Наименование параметров	Турбогенератор	Гидрогенератор	
			с демпферными обмотками	без демпферных обмоток
1	Реактивность x''_d , отн. ед. . .	0,125	0,20	0,27
2	„ x''_q , „ „ . .	0,175	0,30	0,65
3	„ x'_d , „ „ . .	0,21	0,30	0,30
4	„ x_d , „ „ . .	1,72	1,00	1,00
5	„ x_q , „ „ . .	1,72	0,65	0,65
6	„ x_σ , „ „ . .	0,11	0,17	0,17
7	Отношение к. з.	0,70	1,06	1,06
8	Постоянная времени T_{f0} , сек. . .	7,00	5,00	5,00
9	„ T_e , сек. . .	0,57	0,57	0,57
10	Ток возбуждения при номинальной нагрузке, отн. ед. . . .	2,26	1,80	1,80
11	Предельный ток возбуждения, отн. ед.	3,96	3,15	3,15
12	Характеристика холостого хода .	Стандартная по данным завода „Электросила“		

Взаимное пересечение расчетных кривых для разных моментов времени является следствием действия автоматического регулирования возбуждения (или, точнее, форсировки возбуждения). Необходимое условие, которое должно быть соблюдено в этих кривых, т. е. $I_{kt} \leq U_n/x_k$ (см. § 9-4) обеспечено тем, что они ограничены кривой $I_k^* = 1/x_k^*$, как это для большей наглядности показано в несколько утрированном виде на рис. 11-12.

Принятый способ построения расчетных кривых упрощает простую методику их применения. В самом деле, для нахождения по ним значения тока короткого замыкания в произвольный момент времени достаточно определить $x_{расч}$ относительно рассматриваемой точки короткого замыкания, используя для этого схему для начального момента, причем нагрузки в последнюю не должны входить; это значительно упрощает решение. При этом, как следует из самого построения расчетных кривых, найденное по ним значение тока получается с учетом влияния нагрузки. Такой косвенный учет нагрузки, конечно, не может претендовать на большую точность, но все же он приводит к более правильным результатам, чем если бы нагрузкой совсем пренебречь. Что ка-

сается той нагрузки, которая в действительности может быть подключена непосредственно к точке короткого замыкания, то ее учет можно произвести отдельно, как указывалось в § 11-2.

Распространение метода расчетных кривых на сложные схемы со многими генераторами по существу соответствует допущению, что все участвующие в схеме ге-

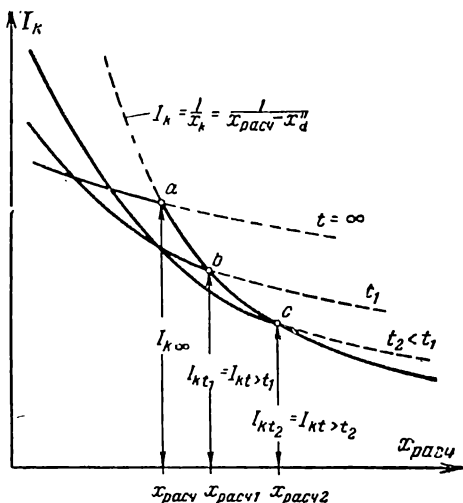


Рис. 11-12. Ограничение расчетных кривых для генераторов с автоматическим регулированием возбуждения.

нераторы могут быть заменены одним генератором суммарной номинальной мощности, поставленным в некоторые средние условия по отношению к точке короткого замыкания. Ошибка от такой замены зависит от того, в какой мере реальные условия отдельных генераторов отличаются от указанных средних. На этом вопросе ниже остановимся более подробно, а сейчас проследим порядок выполнения расчета при замене всех генераторов одним генератором суммарной мощности или, как говорят, по общему изменению. Этот порядок состоит в следующем:

1. Для заданной системы составляют схему замещения, в которую генераторы вводят своими x_d'' ; нагрузки в ней должны отсутствовать, за исключением крупных синхронных компенсаторов и двигателей (в особенности

находящихся вблизи места короткого замыкания), которые рассматриваются как генераторы равновеликой мощности. Поскольку метод достаточно приближен, схему замещения целесообразно составлять упрощенно (см. § 2-4), т. е. без учета действительных коэффициентов трансформации трансформаторов.

2. Постепенным преобразованием схемы замещения (или замером на расчетной модели) находят ее результирующую реактивность x_{Σ} относительно места короткого.

3. Для определения расчетной реактивности $x_{\text{расч}}$ найденную реактивность x_{Σ} выражают в относительных единицах при суммарной номинальной мощности $S_{\Sigma} = S_{\text{н1}} + S_{\text{н2}} + \dots + S_{\text{нm}}$ Mva генераторов, участвующих в питании короткого замыкания, т. е. если x_{Σ} выражено в омах при $U_{\text{ср}}$, $k\text{в}$, то

$$x_{\text{расч}} = x_{\Sigma} \frac{S_{\Sigma}}{U_{\text{ср}}^2}; \quad (11-8)$$

соответственно, если x_{Σ} выражено в относительных единицах при S_0 , то

$$x_{\text{расч}} = x_{\Sigma} \frac{S_{\Sigma}}{S_0}. \quad (11-9)$$

4. Выбирают соответствующие расчетные кривые, по которым для полученной реактивности $x_{\text{расч}}$ находят (иногда интерполируя) для интересующих моментов времени относительные значения тока $I_{\text{п.к.}}$.

При $x_{\text{расч}} \geq 3$ величину относительного тока для всех моментов времени определяют как

$$I_{\text{п.к.}} = \frac{1}{x_{\text{расч}}}. \quad (11-10)$$

5. Находят искомую величину периодической составляющей тока короткого замыкания для каждого момента:

$$I_{\text{п.к.}t} = I_{\text{п.к.}} \dot{I}_{\Sigma}, \quad (11-11)$$

где $\dot{I}_{\Sigma} = \frac{S_{\Sigma}}{\sqrt{3} U_{\text{ср}}}$ — суммарный номинальный ток генераторов, приведенный к напряжению $U_{\text{ср}}$ той ступени, где рассматривается короткое.

При $x_{\text{расч}} > 3$, очевидно,

$$I_{\text{п.к}} = \frac{I_{\text{н}\Sigma}^{\circ}}{x_{\text{расч}}}, \quad (11-12)$$

причем здесь вместо $I_{\text{н}\Sigma}^{\circ}$ и $x_{\text{расч}}$ могут быть использованы также соответственно $I_{\text{б}}^{\circ}$ и $x_{\Sigma(б)}^*$, т. е. значения при произвольно выбранной базисной мощности.

Поскольку при одинаковых базисных условиях относительные величины тока и мощности короткого замыкания численно совпадают (см. § 2-9), расчетные кривые одновременно дают значения относительной мощности короткого замыкания в произвольный момент ($I_{\text{п.к}t} = S_{\text{к}t}^*$).

Когда исходная система содержит генераторы различных типов, при расчете по общему изменению может возникнуть формальное затруднение в выборе кривых. В подобных случаях нужно принимать решение, ориентируясь на конкретные условия рассматриваемой системы. Очевидно, следует отдавать предпочтение тем генераторам, которые больше участвуют в питании короткого замыкания, т. е. находятся ближе к месту короткого.

Если в ветви короткого замыкания имеется значительное активное сопротивление r , то в первом приближении его можно учесть заменой результирующей реактивной x_{Σ} полным сопротивлением $z_{\Sigma} = \sqrt{r^2 + x_{\Sigma}^2}$. Затем, определив по (11-8) или (11-9) (после замены x на z) расчетное сопротивление $z_{\text{расч}}$, можно находить значения тока по соответствующим расчетным кривым, откладывая по оси абсцисс $z_{\text{расч}}$.

Довольно часто в заданной системе наряду с генераторами имеется источник бесконечной мощности. В этом случае расчет по общему изменению вообще невозможен. Действительно, при таком условии $S_{\text{н}\Sigma} = \infty$ и $I_{\text{н}\Sigma}^{\circ} = \infty$, а по (11-8) или (11-9) и $x_{\text{расч}} = \infty$. При этом по (11-12) имеем $I_{\text{п.к}} = \infty/\infty$ — неопределенность, раскрытие которой возможно только без применения расчетных кривых (см. § 11-6).

Пример 11-5. Определить начальный ток и ток через 1,5 сек при коротком замыкании в точке К схемы рис. 11-13,а, считая, что каждый гидрогенератор имеет $x''_d = 0,2$ и снабжен АРВ.

Приняв $S_0 = 100$ Мва и $U_0 = U_{ср}$, найдем базисные относительные реактивности элементов схемы замещения рис. 11-13, б.

Два одинаковых блока «генератор—трансформатор» рассматриваем как один блок удвоенной мощности, т. е.

$$x_1 = 0,2 \frac{100}{2 \cdot 40} = 0,25 \quad \text{и} \quad x_2 = 0,105 \frac{100}{2 \cdot 40,5} = 0,13.$$

Равным образом генераторы Г-3 и Г-4 рассматриваем как один генератор мощностью $S_{II} = 2 \cdot 33 = 66$ Мва; тогда $x_3 = 0,2 \frac{100}{66} = 0,3$

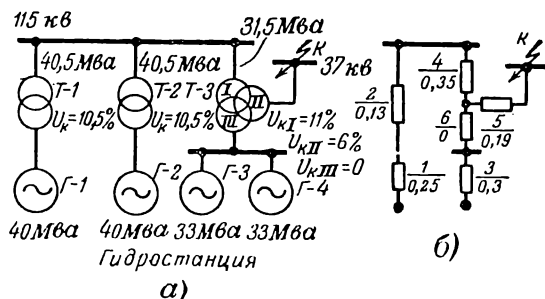


Рис. 11-13. К примеру 11-5.

а — исходная схема; б — схема замещения.

Для обмоток трансформатора Т-3 имеем: $x_4 = 0,11 \cdot \frac{100}{31,5} = 0,35$

$x_5 = 0,06 \frac{100}{31,5} = 0,19$ и $x_6 = 0$.

Упрощая схему ($x_7 = 0,25 + 0,13 + 0,35 = 0,73$ и $x_8 = 0,73 // 0,3 = 0,21$), находим: $x_{\Sigma} = 0,21 + 0,19 = 0,4$.

Расчетная реактивность $x_{расч} = 0,4 \frac{146}{100} + 0,07 = 0,66$, где 146 Мва — суммарная номинальная мощность $S_{н\Sigma} = (2 \cdot 40 + 2 \cdot 33)$ и 0,07 — поправка, учитывающая демпферные обмотки при пользовании кривыми рис. 11-11.

По упомянутым кривым при $x_{расч} = 0,66$ находим для $t = 0$ $I''_k = 1,76$ (по пунктирной кривой) и для $t = 1,5$ сек $I_{п,k} = 1,62$ (интерполируя между кривыми для $t = 1$ сек и $t = 2$ сек).

Суммарный номинальный ток генераторов, приведенный к 37 кВ,

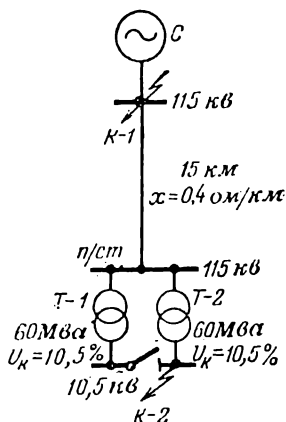
$$I_{н\Sigma} = \frac{146}{\sqrt{3} \cdot 37} = 2,28 \text{ ка},$$

и искомые значения токов равны:

$$I''_k = 1,76 \cdot 2,28 = 4 \text{ ка} \quad \text{и} \quad I_{к1,5} = 1,62 \cdot 2,28 = 3,7 \text{ ка}.$$

Пример 11-6. Известно, что при трехфазном коротком замыкании в точке *К-1* схемы рис. 11-14 мощность короткого замыкания через 0,5 сек составляет $S_{к} = 2\,000\text{ Мва}$. Определить наибольшую величину периодической слагающей тока при трехфазном коротком замыкании в точке *К-2* при параллельной и раздельной работе трансформаторов, если дополнительно известно, что суммарная номинальная мощность генераторов тепловых станций системы $S_{н\Sigma} = 1\,250\text{ Мва}$ и все генераторы имеют АРВ.

Рис. 11-14. К примеру 11-6.



При коротком в *К-1* относительная величина заданной мощности короткого замыкания $S_{к*} = \frac{2\,000}{1\,250} = 1,6$; для нее по кривой рис. 11-10, соответствующей $t = 0,5\text{ сек}$, находим $x_{расч} = 0,48$.

При $S_{н\Sigma} = 1\,250\text{ Мва}$ относительные реактивности элементов схемы равны:

$$\text{линии } x = 0,4 \cdot 15 \cdot \frac{1\,250}{115^2} = 0,57;$$

$$\text{каждого трансформатора } x = 0,105 \cdot \frac{1\,250}{60} = 2,2.$$

При коротком замыкании в точке *К-2* в случае параллельной работы трансформаторов

$$x_{расч} = 0,48 + 0,57 + \frac{2,2}{2} = 2,15.$$

Для этого значения $x_{расч}$ по кривым рис. 11-10 находим наибольшую относительную величину тока: $I_{п.к*} = 0,49$ (при $t < 2\text{ сек}$). Следовательно, искомый ток

$$I_{п.к} = 0,49 \cdot \frac{1\,250}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 33,7\text{ ка}.$$

При раздельной работе трансформаторов

$$x_{расч} = 0,48 + 0,57 + 2,2 = 3,25, \text{ т. е. больше } 3,$$

поэтому искомый ток

$$I_{п.к} = \frac{1}{3,25} \cdot \frac{1250}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 21,2 \text{ ка.}$$

11-6. УТОЧНЕНИЯ МЕТОДА РАСЧЕТНЫХ КРИВЫХ

В расчете по общему изменению, как это делалось в предыдущем параграфе, средние условия для обобщенного генератора всегда получаются ближе к тем, в кото-

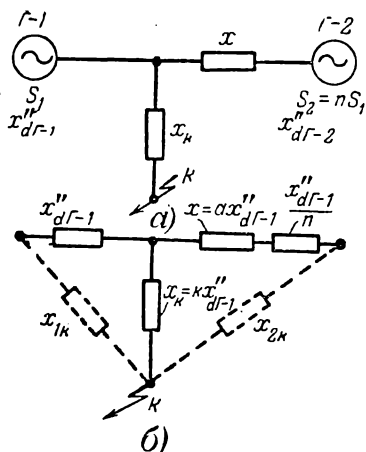


Рис. 11-15. К определению погрешностей расчета по общему изменению.

а — исходная схема; б — схема замещения.

рых находятся крупные генераторы. Однако большая мощность генератора не является достаточным признаком его участия в питании короткого замыкания. Если крупный генератор сильно удален от места короткого замыкания, то его участие может быть значительно меньше, чем малого генератора, находящегося вблизи короткого замыкания. Следовательно, в то время как действительное изменение тока короткого замыкания в основном определяется изменением тока ближайшего к месту короткого замыкания генератора, это обстоятельство не получает

должного отражения в расчете по общему изменению. Поэтому результаты последнего могут существенно отличаться от действительности.

Оценим предельную величину такой погрешности для условий элементарной схемы рис. 11-15,а, если номинальные относительные величины x''_d обоих генераторов одинаковы, а остальные величины связаны соотношениями: $S_2 = nS_1$; $x = ax''_{dГ-1}$ и $x_k = kx''_{dГ-1}$.

При $S_6 = S_1$ и $U_6 = U_{ср}$ реактивности элементов схемы замещения даны на рис. 11-15,б.

После небольших преобразований общая расчетная реактивность может быть представлена в следующем виде:

$$x_{\text{расч}} = x''_{d\Gamma-1} \left[1 + k(1+n) + \frac{an^2}{1+(1+a)n} \right].$$

С другой стороны, для каждого генератора отдельно можно найти его расчетную реактивность, используя соответствующие стороны x_{1k} и x_{2k} эквивалентного треугольника (рис. 11-15,б). Эти реактивности будут: для генератора $\Gamma-1$

$$x_{\text{расч1}} = x''_{d\Gamma-1} \left[1 + k + \frac{kn}{1+an} \right];$$

для генератора $\Gamma-2$

$$x_{\text{расч2}} = x''_{d\Gamma-1} [(1+k)(1+an) + kn].$$

Найдем отношения реактивностей:

$$m_1 = \frac{x_{\text{расч}}}{x_{\text{расч1}}} = 1 + \frac{an^2}{1+(1+a)n}$$

и

$$m_2 = \frac{x_{\text{расч}}}{x_{\text{расч2}}} = \frac{1+n}{1+(1+a)n},$$

из которых следует, что если $a > 0$, то $m_1 > 1$ и $m_2 < 1$, т. е. $x_{\text{расч}}$ всегда находится между $x_{\text{расч1}}$ и $x_{\text{расч2}}$, причем величины этих отношений, будучи независимыми от общей удаленности короткого замыкания k по отношению к обоим генераторам, не могут служить хотя бы косвенными критериями того, какую ошибку можно ожидать при расчете по общему изменению. В самом деле, если $x_{\text{расч1}} > 3$, то каково бы ни было участие генератора $\Gamma-2$, объединение обоих генераторов в один не вызывает дополнительной ошибки в расчете, так как при таких условиях падобность в кривых вообще отпадает.

Наиболее интенсивное изменение тока короткого замыкания имеет место при коротком на выводах генератора $\Gamma-1$ ($k=0$). Однако если в данном случае объединить генератор $\Gamma-1$ с генератором $\Gamma-2$, то при определенной удаленности a и мощности n последнего может

оказаться, что $x_{расч} > 3$ и, следовательно, изменение тока короткого замыкания практически совсем отсутствует. Результаты такого расчета будут отличаться от действительности тем больше, чем меньше участие генератора Г-2 или, иначе, чем больше его удаленность a . В пределе, когда $a \rightarrow \infty$ (т. е. при исчезающе малом участии генератора Г-2),

$$\lim_{a \rightarrow \infty} x_{расч} = x''_{dГ-1} (1 + n)$$

и если мощность (n) генератора Г-2 обеспечивает $x_{расч} > 3$, то

$$I_{п.кт} = \frac{\dot{I}_{п\Sigma}}{x_{расч}} = \frac{I_n (1 + n)}{x''_{dГ-1} (1 + n)} = \frac{I_n}{x''_{dГ-1}} = I''_{Г-1},$$

т. е. в то время как при рассматриваемых предельных условиях действительное изменение тока короткого замыкания проявляется наиболее интенсивно, расчет по общему изменению приводит к ошибочному решению, указывающему, что в течение всего процесса короткого

замыкания ток остается неизменным и равным начальному сверхпереходному току генератора Г-1 при коротком замыкании на его выводах.

Таким образом, предельное отклонение результатов расчета по общему изменению можно характеризовать отношением начального сверхпереходного тока к периодической составляющей истинного тока в данный момент t при коротком замыкании на выводах генератора. На рис. 11-16 показано

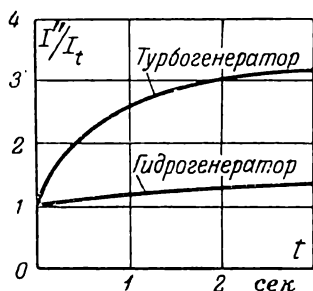


Рис. 11-16. Изменение отношения I''/I_t в функции времени.

изменение этого отношения для генераторов, для которых выше приведены расчетные кривые. Как видно, при наличии турбогенератора расчет по общему изменению даже для малых промежутков времени может привести к существенной погрешности. Напротив, при наличии гидрогенератора предельные ошибки такого расчета гораздо меньше. При отсутствии АРВ предельные ошибки расчета по общему изменению еще больше. Естественно,

при увеличении удаленности короткого замыкания (с ростом x_k) погрешность расчета по общему изменению падает.

Из сказанного ясно, что при рассматриваемом коротком замыкании чем ближе друг к другу условия отдельных генераторов, тем меньше погрешность от их

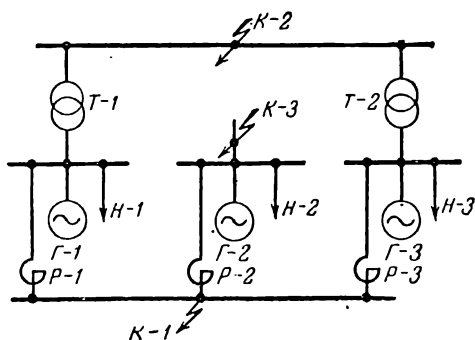


Рис. 11-17. Схема электрических соединений станции.

объединения. Однако во многих случаях это не соблюдается, и тогда расчет целесообразно вести с учетом индивидуального изменения токов в отдельных генерирующих ветвях схемы.

На примере схемы рис. 11-17 (где одноименные элементы одинаковы) легко видеть, что при коротком замыкании в точке К-1 замена генераторов одним не вызывает никакой ошибки, поскольку все они находятся в одинаковых условиях, совпадающих, в частности, с условиями, для которых произведено построение расчетных кривых. Такая замена практически возможна и при коротком в К-2, хотя в этом случае генератор Г-2 имеет несколько большую удаленность, чем два других генератора. При коротком в К-3 объединение генератора Г-2 с остальными, несомненно, приведет к ошибке, так как протекание процесса у этих генераторов различается уже в значительной мере. Здесь само собой напрашивается более правильное решение, состоящее в том, что токи от генератора Г-2 и другой ветви, включающей генераторы Г-1 и Г-3, должны быть найдены отдельно. Их сумма даст ток в месте короткого замыкания.

Такой путь расчета следует применять во всех случаях, когда к точке трехфазного короткого замыкания подключено любое число независимых друг от друга генерирующих ветвей $I, II, \dots, M$. Определив для каждой из них ее расчетную реактивность (отнесенную к суммарной номинальной мощности генераторов данной ветви), нужно найти по соответствующим расчетным кривым для интересующего момента t значения их относительных токов $I_{*nI}, I_{*nII}, \dots, I_{*nM}$; искомая величина периодической слагающей тока в месте короткого замыкания будет

$$I_{п.к.t} = I_{*nI} \overset{\circ}{I}_{nI} + I_{*nII} \overset{\circ}{I}_{nII} + \dots + I_{*nM} \overset{\circ}{I}_{nM},$$

где $\overset{\circ}{I}_{nI} = \frac{S_{nI}}{\sqrt{3} U_{ср}}$; $\overset{\circ}{I}_{nII} = \frac{S_{nII}}{\sqrt{3} U_{ср}} \dots$ — номинальные токи отдельных генерирующих ветвей, приведенные к напряжению $U_{ср}$ той ступени, где рассматривается короткое замыкание.

В общем случае, когда генерирующие ветви связаны с местом короткого замыкания через общие для этих ветвей реактивности, индивидуальное изменение можно учитывать, предварительно приведя заданную схему к условной радиальной, каждая ветвь которой соответствует выделяемому генератору (или группе генераторов). Такое преобразование схемы производится в соответствии с указаниями § 2-6. В большинстве случаев наиболее просто реактивность выделяемой генерирующей ветви M можно определить, зная x_{Σ} и коэффициент распределения C_M для этой ветви, т. е.

$$x_M = \frac{x_{\Sigma}}{C_M}. \quad (11-13)$$

Очевидно, расчетная реактивность этой ветви будет

$$x_{расчM} = \frac{x_{\Sigma}^{(6)}}{C_M} \cdot \frac{S_{nM}}{S_{\Sigma}}, \quad (11-14)$$

или

$$x_{расчM} = \frac{x_{\Sigma}}{C_M} \cdot \frac{S_{nM}}{U_{ср}^2}, \quad (11-15)$$

где $U_{ср}$ — среднее номинальное напряжение, к которому приведена реактивность x_{Σ} .

В остальном расчет выполняется так же, как и при чисто радиальной схеме.

Такое определение $x_{расч}$ для любой генерирующей ветви, выделяемой из сложной схемы, по существу предполагает, что протекание процесса в генераторах этой ветви не зависит от одновременного участия связанных с ними остальных генераторов схемы. Тем не менее и

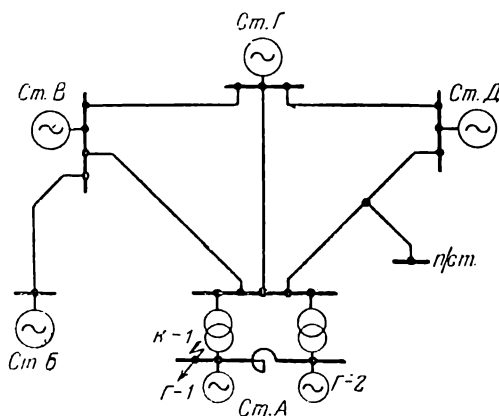


Рис. 11-18. Схема электрической системы.

этот искусственный прием учета индивидуального изменения позволяет несколько уточнить вычисление тока короткого замыкания с помощью расчетных кривых; при этом, разумеется, расчет немного усложняется. Из общего числа генераторов (или станций) заданной схемы достаточно выделять только те из них, которые находятся в резко отличающихся условиях. Обычно схему любой сложности достаточно привести не более чем к двум-трем генерирующим ветвям, относя к каждой из них генераторы (или станции), находящиеся приблизительно в одинаковых условиях по отношению к месту короткого замыкания. Так, например, при коротком замыкании в К-1 схемы рис. 11-18 генератор Г-1, конечно, следует учитывать отдельно, а из прочих источников целесообразно выделить лишь генератор Г-2, рассматривая все остальные как обобщенный генератор суммарной мощности.

Если помимо генераторов в системе задан источник бесконечной мощности, то его необходимо выделить в отдельную ветвь, т. е. найти взаимную реактивность

$$x_{\text{СК}} = \frac{x_{\Sigma}}{C_{\Sigma}}, \quad (11-16)$$

где C_{Σ} — коэффициент распределения для той ветви, через которую в заданной схеме осуществляется связь с этим источником¹, после чего ток от этого источника легко найти как

$$I_{\text{C}} = \frac{I_{\delta}}{x'_{\text{СК}(\delta)}}, \quad (11-17)$$

или

$$I_{\text{C}} = \frac{U_{\text{ср}}}{\sqrt{3} x_{\text{СК}}}, \quad (11-18)$$

где I_{δ} — базисный ток на соответствующей ступени напряжения;

$U_{\text{ср}}$ — среднее номинальное напряжение, к которому приведена реактивность $x_{\text{СК}}$.

Величина этого тока принимается неизменной в течение всего процесса короткого замыкания.

Таким образом, при рассматриваемых условиях периодическая слагающая тока в месте короткого замыкания образуется как сумма вычисленного незатухающего тока от источника бесконечной мощности и тока от генераторов, найденного по расчетным кривым. Эти токи, естественно, должны быть приведены к одному напряжению.

Отметим еще другие уточнения метода расчетных кривых.

Когда величина постоянной времени T_{f0} участвующего в схеме генератора (или станции) значительно, т. е. в 1,5 и более раза, отличается от той величины $T_{f0(\text{ср})}$, при которой построены расчетные кривые (см. табл. 11-5), то значение тока от такого генератора правильнее находить по кривой не для истинного момента t , а для его приведенного значения

$$t' = t \frac{T_{f0(\text{ср})}}{T_{f0}}. \quad (11-19)$$

¹ Если данный источник связан несколькими ветвями, то под C_{Σ} следует понимать сумму соответствующих коэффициентов распределения.

Правда, это указание строго лишь при экспоненциальном законе изменения тока короткого замыкания и менее обосновано при более сложной закономерности его изменения, которая имеет место при наличии АРВ.

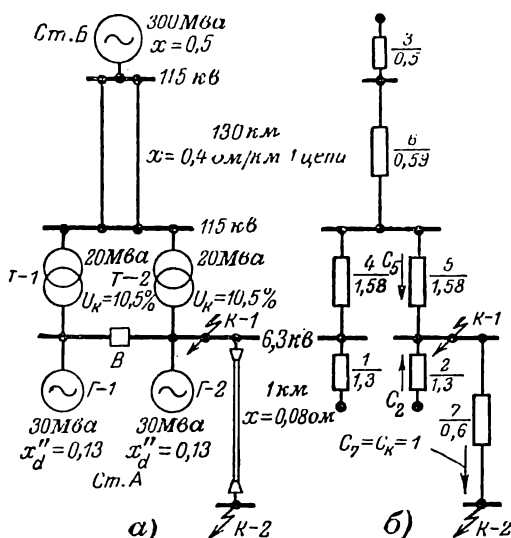


Рис. 11-19. К примеру 11-7.
а — исходная схема; б — схема замещения.

Если на выводах генератора нет нагрузки, то величину тока в месте короткого приближенно можно определить, умножив найденный по расчетным кривым ток этого генератора на коэффициент

$$b = 1 + \frac{x_{\text{расч}} - x''_d}{1,2}, \quad (11-20)$$

где 1,2 — относительная реактивность нагрузки, мощность которой равна номинальной мощности генератора.

Пример 11-7. При трехфазном коротком замыкании поочередно в точках К-1 и К-2 схемы рис. 11-9,а вычислить значение тока в месте короткого замыкания через 0,2 сек. Все генераторы имеют АРВ; выключатель В отключен.

На рис. 11-19,б показана схема замещения, где реактивности всех элементов выражены в относительных единицах при $S_0 = 300 \text{ Мва}$ и $U_0 = U_{\text{ср}}$.

При коротком замыкании в $K-1$ генератор $\Gamma-1$ можно рассматривать вместе со станцией B , а генератор $\Gamma-2$ следует учитывать отдельно.

Резльтирующая реактивность схемы со стороны генератора $\Gamma-1$ и станции B до точки $K-1$

$$x_{\Sigma} = [(1,3 + 1,58) // (0,5 + 0,59)] + 1,58 = 2,37$$

и соответственно расчетная реактивность этих источников

$$x_{\text{расч}} = 2,37 \frac{300 + 30}{300} = 2,6;$$

при этом по кривым рис. 11-10 находим для $t = 0,2$ сек $I_{\Pi} = 0,37$.

Для генератора $\Gamma-2$ по тем же кривым при $x_{\text{расч}} = 0,13$ находим для $t = 0,2$ сек $I_{\Pi}^* = 4,6$.

Номинальные токи при 6,3 кВ:
генератора $\Gamma-1$ и станции B

$$I_{\Pi}^{\circ} = \frac{330}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 30,25 \text{ ка};$$

генератора $\Gamma-2$

$$I_{\Pi}^{\circ} = \frac{30}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 2,75 \text{ ка}.$$

Искомый ток при коротком в $K-1$

$$I_K = 0,37 \cdot 30,25 + 4,6 \cdot 2,75 = 23,8 \text{ ка}.$$

Если генератор $\Gamma-2$ не учитывать отдельно, а объединить его с остальными источниками, то расчетная реактивность будет

$$x_{\text{расч}} = (2,37 // 1,3) \frac{360}{300} = 1,01$$

и для нее по кривым рис. 11-10 находим $I_{*K0,2} = 0,88$. Таким образом, искомый ток

$$I_K = 0,88 (30,25 + 2,75) = 29 \text{ ка}$$

оказался больше на 22%.

Поскольку удаленность точки $K-2$ относительно генератора $\Gamma-2$ невелика, этот генератор целесообразно выделить из остальных источников. Результирующая реактивность схемы до точки $K-2$

$$x_{\Sigma} = (2,37 // 1,3) + 0,6 = 0,84 + 0,6 = 1,44.$$

Коэффициент распределения для генератора $\Gamma-2$ $C_2 = \frac{0,84}{1,3} = 0,65$,

а для остальных источников $C_5 = \frac{0,84}{2,37} = 0,35$ (или, иначе, $C_5 = 1 - 0,65 = 0,35$).

Расчетные реактивности:
генератора Г-2

$$x_{\text{расч}} = \frac{1,44}{0,65} \cdot \frac{30}{300} = 0,22;$$

генератора Г-1 и станции В

$$x_{\text{расч}} = \frac{1,44}{0,35} \cdot \frac{30}{300} = 4,54.$$

По кривым рис. 11-10 для $x_{\text{расч}} = 0,22$ находим $I_{0,2} = 3,2$.

Искомый ток при коротком в К-2

$$I_K = 3,2 \cdot 2,75 + \frac{1}{4,54} \cdot 30,25 = 8,8 + 6,7 = 15,5 \text{ ка.}$$

Если не учитывать отдельно генератор Г-2, то $x_{\text{расч}} = 1,44 \frac{360}{300} = 1,73$ и искомый ток был бы $I_K = 17,5 \text{ ка}$, т. е. больше на 13%.

Допустим теперь, что к шинам 115 кВ станции А подключен источник бесконечной мощности. Тогда при коротком в К-2 схема замещения будет иметь вид, показанный на рис. 11-20. Ветви условной схемы находим как стороны эквивалентного треугольника, т. е.

$$x_{\text{СК}} = 1,58 + 0,6 + \frac{1,58 \cdot 0,6}{1,3} = 2,94$$

и

$$x_{\text{Г-2К}} = 1,30 + 0,6 + \frac{1,30 \cdot 0,6}{1,58} = 2,4.$$

Ток от источника бесконечной мощности

$$I_C = \frac{1}{2,94} \cdot \frac{300}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 9,35 \text{ ка.}$$

Для генератора Г-2 расчетная реактивность

$$x_{\text{расч}} = 2,4 \frac{30}{300} = 0,24;$$

при этом по кривым на рис. 11-10 находим для $t = 0,2 \text{ сек}$ $I_{\pi} = 3$.

Следовательно, ток в месте короткого через 0,2 сек

$$I_K = 3 \cdot 2,75 + 9,35 = 17,6 \text{ ка (вместо 15,5 ка).}$$

Пример 11-8. Определить мощность короткого замыкания через 0,2 сек при трехфазном коротком замыкании в точке К-1 схемы рис. 11-21,а.

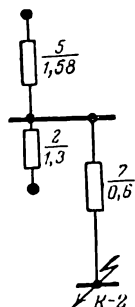


Рис. 11-20.
К варианту
примера
11-7.

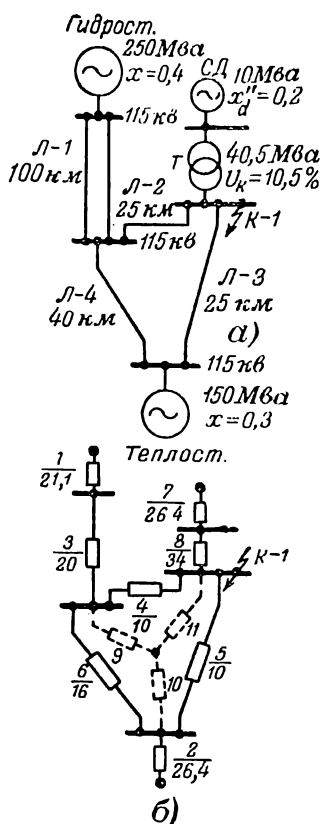


Рис. 11-21. К примеру 11-8.
а — исходная схема; б — схема замещения.

По расчетным кривым для 0,2 сек находим: для теплостанции $I_{п*} = 2$, для гидростанции $I_{п*} = 1$ и для синхронного двигателя $I_{п*} = 3,3$ (это значение взято для $t' = 0,2 \frac{5}{2,5} = 0,4$ сек).

Искомая мощность короткого замыкания

$$S_{к} = 2 \cdot 150 + 1 \cdot 250 + 3,3 \cdot 10 \approx 580 \text{ Мва.}$$

Пример 11-9. При трехфазном коротком замыкании в точке К схемы рис. 11-22,а определить ток в линии Л-2 для $t=0,3$ сек.

Схема замещения с реактивными ее элементами, выраженными в омах при 115 кВ, приведена на рис. 11-2,б*.

После преобразования треугольника с элементами 4, 5 и 6 в эквивалентную звезду, реактивности лучей которой оказались равными $x_9 = x_{10} = 4,5$ ом и $x_{11} = 2,8$ ом, следует произвести дальнейшее упрощение схемы замещения, т. е. найти $x_{12} = 26,4 + 4,5 = 30,9$ ом и $x_{13} = 21,1 + 20 + 4,5 = 45,6$ ом.

При коротком замыкании в К-1 все генерирующие ветви рассматриваем отдельно. Реактивности между каждой станцией и точкой К-1 найдем как соответствующие стороны треугольника, эквивалентного звезде с элементами 11, 12 и 13. Так, реактивность между теплостанцией и точкой К-1 $x_{тк} = 35,6$ ом, а между гидростанцией и точкой К-1 $x_{гк} = 52,5$ ом.

Расчетные реактивности будут: теплостанции

$$x_{\text{расч}} = 35,6 \frac{150}{115^2} = 0,4;$$

гидростанции

$$x_{\text{расч}} = 52,5 \frac{250}{115^2} = 1,0;$$

синхронного двигателя

$$x_{\text{расч}} = (26,4 + 3,4) \frac{10}{115^2} + 0,07 = 0,3.$$

* Реактивности выражены в омах лишь для того, чтобы разнообразить ход решения примеров.

Гидрогенераторы Г-1—Г-4 одинаковы: каждый 66,0 Мва, 10,5 кВ; $x''_d = x'_d = 0,21$; $T_{f0} = 7,55$ сек.

Трансформаторы Т-1 и Т-2 одинаковы: каждый 120 Мва, 230/10,5 кВ; $u_k = 14\%$; Т-3 180 Мва, 230/115 кВ; $u_k = 14\%$.

Линии: Л-1 145 км, Л-2 88 км.

Система С: суммарная мощность станций 2000 Мва и $x_c = 0,4$. Ввиду полной симметрии станции относительно шин 230 кВ все

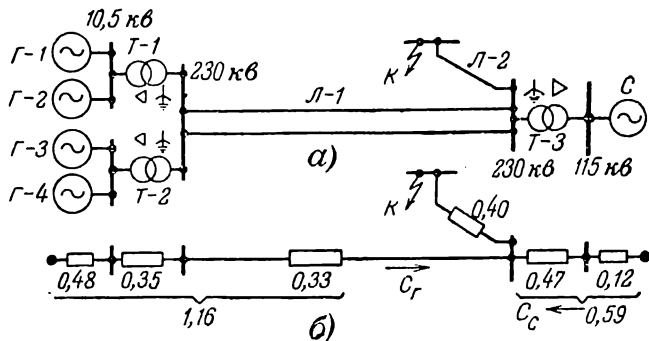


Рис. 11-22. К примеру 11-9.

а — исходная схема; б — схема замещения.

ее генераторы можно рассматривать как один генератор мощностью $4 \cdot 66 = 264$ Мва, включенный через трансформатор мощностью $2 \cdot 120 = 240$ Мва.

Схема замещения представлена на рис. 11-22,б, где реактивности всех элементов выражены в относительных единицах при $S_6 = 600$ Мва и $U_6 = U_{ср}$.

Резльтирующая реактивность схемы $x_c = 0,79$ и коэффициенты распределения равны: $C_r = 0,34$ и $C_c = 0,66$.

Расчетные реактивности станций

$$x_{расч} = \frac{0,79 \cdot 264}{0,34 \cdot 600} = 1,02;$$

системы

$$x_{расч} = \frac{0,79 \cdot 2000}{0,66 \cdot 600} = 4,0.$$

Ток от генераторов станции находим по кривым рис. 11-11 для $t' = 0,3 \frac{5}{7,55} \approx 0,2$ сек: $I_* = 0,98$; поскольку нагрузки в схеме нет,

по (11-20) вводим поправочный коэффициент $b = 1 + \frac{1,02 - 0,21}{1,2} = 1,67$. Следовательно, искомый ток

$$I_k = 1,67 \cdot 0,98 \frac{264}{\sqrt{3} \cdot 230} + \frac{1}{4} \cdot \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 230} = 1,08 + 1,25 = 2,33 \text{ ка.}$$

11-7. МЕТОД СПРЯМЛЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Когда генератор представлен своими E и x_r , величины которых не зависят от изменения внешних условий, периодическая слагающая тока при трехфазном коротком замыкании легко может быть определена из обычного выражения

$$I_{\pi} = \frac{E}{x_r + x}, \quad (11-21)$$

где x — реактивность внешней цепи при рассматриваемой удаленности короткого замыкания.

Такое выражение используют при вычислении начальных и установившихся токов короткого замыкания, вводя в первом случае E''_{q0} и x''_d , а во втором E_{q0} или $E_{q\text{нр}}$ (при наличии АРВ и работе генератора в режиме предельного возбуждения) и x_d .

Естественно возникает вопрос: нельзя ли выражение (11-21) распространить на вычисление периодической слагающей тока в любой момент процесса короткого замыкания или, иными словами, можно ли вообще установить для генератора такие величины E_t и x_t , которые являлись бы функциями только времени с момента возникновения короткого замыкания?

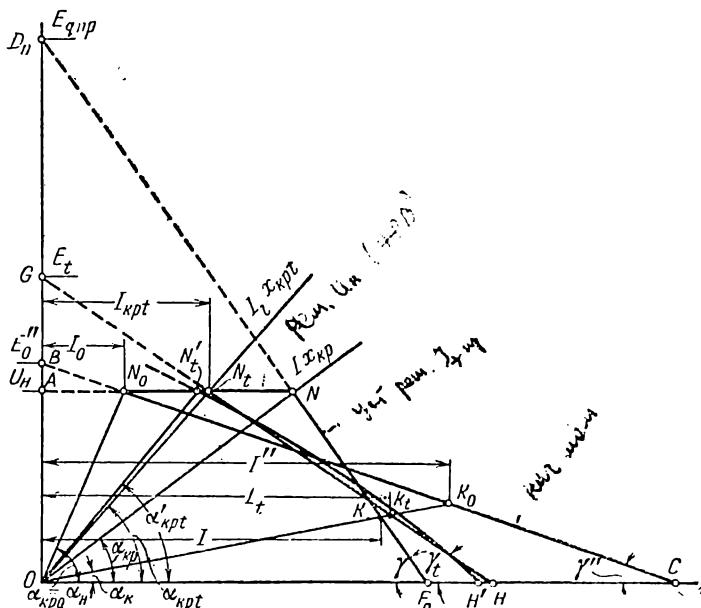
Чтобы ответить на этот вопрос, достаточно вспомнить, что изменение во времени любой э. д. с. генератора определяется не только его параметрами, но зависит также от реактивности внешней цепи, как это следует, например, из выражения (7-73) для постоянной времени T'_d . Следовательно, строгие функциональные зависимости $E_t = f(t)$ и $x_t = \varphi(t)$ установить нельзя.

Однако автору совместно с Ю. Н. Баскаковым удалось показать, что для каждого момента процесса короткого замыкания можно подобрать некоторые расчетные E_t и x_t генератора, не зависящие от внешней реактивности и которые позволяют с достаточной для практики точностью определить значение периодической слагающей тока в произвольный момент времени. Подбор этих расчетных E_t и x_t нагляднее всего иллюстрировать графически.

Перепишем (11-21) в ином виде:

$$E - I_{\pi} x_r = I_{\pi} x = U_r,$$

Для генератора, имеющего в общем случае автоматическое регулирование возбуждения, внешние характеристики показаны на рис. 11-23. Прямая N_0C отвечает



внешней характеристике для начального момента короткого замыкания. Для установившегося режима эта характеристика состоит из наклонного отрезка $NF_{\text{н}}$, который соответствует режиму работы генератора с предельным возбуждением, и горизонтального отрезка NN_0 , отвечающего режиму работы генератора с нормальным напряжением, которое поддерживается действием АРВ. Напомним, что перелом этой характеристики (в точке N) имеет место при $x = x_{\text{кр}}$.

Продолжения прямых N_0C и NF_{II} отсекают на оси ординат отрезки, пропорциональные соответственно E''_0 и $E_{гипр}$, а на оси абсцисс — отрезки, пропорциональные

токам I'' и I при коротком замыкании на выводах генератора. При одинаковых масштабах по обеим осям ($m_U = m_I$), очевидно,

$$\operatorname{tg} \alpha = x \text{ и } \operatorname{tg} \gamma = x_r.$$

При $x < x_{\text{кр}}$, чему соответствует прямая, проведенная из начала координат под углом α_k , значения токов I'' и I определяются абсциссами соответственно точек K_0 и K . При $x > x_{\text{кр}}$ значения этих токов определяются абсциссами точек пересечения луча, проведенного из начала координат под углом α , с прямыми N_0C и N_0N . При отсутствии короткого замыкания наклон луча ON_0 имеет наибольший угол α_n , который пропорционален практически принимаемой для нагрузки реактивности ($x_n = 1,2$).

Гиперболическая зависимость между I_n и x , устанавливаемая выражением (11-21), имеет место лишь при прямолинейной внешней характеристике генератора, так как только в этом случае E и x_r неизменны. Это собственно подсказывает путь к нахождению E_t и x_t .

В самом деле, допуская, что в схеме участвует один генератор, не представляет труда построить его внешнюю характеристику для произвольного момента процесса короткого замыкания. Для этого, задаваясь различными значениями внешней реактивности x , достаточно по известным выражениям подсчитать ток в рассматриваемый момент времени процесса короткого замыкания и по нему — величину остаточного напряжения генератора. По полученным результатам легко построить для данного момента времени внешнюю характеристику $U_t = f(I_t)$. Пусть кривая $N'_t H'$ на рис. 11-23 представляет ту часть такой характеристики, которая отвечает работе генератора при подъеме его возбуждения от действия АРВ. Ее другая часть, отвечающая работе генератора при нормальном напряжении, представляется горизонтальной прямой $N_0 N'_t$. Наклон луча ON'_t пропорционален внешней реактивности x , при которой в данный момент времени t одновременно соблюдаются условия обоих режимов генератора. По аналогии с установленным в § 5-6 определением эта реактивность может быть названа критической реактивностью для данного момента времени $x_{\text{кр}t}$.

Чтобы определить искомые значения расчетной э. д. с. E_t и расчетной реактивности x_t генератора для выбран-

ного момента времени процесса короткого замыкания, нужно соответствующую этому моменту внешнюю характеристику заменить подходящей прямой, продолжение которой до пересечения с осью ординат даст значение E_t , а ее наклон к оси абсцисс, т. е. $\operatorname{tg} \gamma_t$, — значение x_t . На рис. 11-23 такой заменяющей прямой является прямая $N_t H$. Она проведена так, чтобы ее отклонение от кривой $N'_t H'$ на всем диапазоне в среднем было наименьшим. Практически оказывается возможным спрямление выполнить с отклонением, не выходящим за пределы $\pm (6 \div 8) \%$; при этом нет необходимости обеспечивать, чтобы прямая проходила через точки N'_t и H' . Несовпадение точек N'_t и H' указывает на то, что расчетная критическая реактивность ($\operatorname{tg} \alpha_{\text{кр}t} \equiv x_{\text{кр}t}$) несколько отличается от действительной ($\operatorname{tg} \alpha'_{\text{кр}t} = x'_{\text{кр}t}$). Таким путем определяют расчетные E_t и x_t , а также $x_{\text{кр}t}$ для различных моментов времени. Из изложенного понятно происхождение названия рассматриваемого метода.

Коль скоро для генератора с АРВ найдены его расчетные E_t и x_t , периодическую слагающую тока трехфазного короткого замыкания для произвольного момента можно вычислить совершенно аналогично тому, как это делалось и для установившегося режима короткого замыкания (см. § 5-7). В соответствии с (5-31) для произвольного момента можно написать:

$$x_{\text{кр}t} = x_t \frac{U_{\text{н}}}{E_t - U_{\text{н}}} \quad (11-22)$$

и критический ток

$$I_{\text{кр}t} = \frac{E_t - U_{\text{н}}}{x_t} = \frac{U_{\text{н}}}{x_{\text{кр}t}}. \quad (11-23)$$

Если внешняя реактивность $x \leq x_{\text{кр}t}$, то генератор работает в режиме подъема возбуждения¹ и должен быть введен в схему своими E_t и x_t ; если $x \geq x_{\text{кр}t}$, то напряжение генератора к данному моменту времени t уже достигло нормальной величины и в этом случае генератор должен быть введен в схему с $E = U_{\text{н}}$ и $x = 0$, что соответствует его работе в режиме нормального напряжения.

¹ В отличие от режима предельного возбуждения, который имеет место при установившемся режиме короткого замыкания.

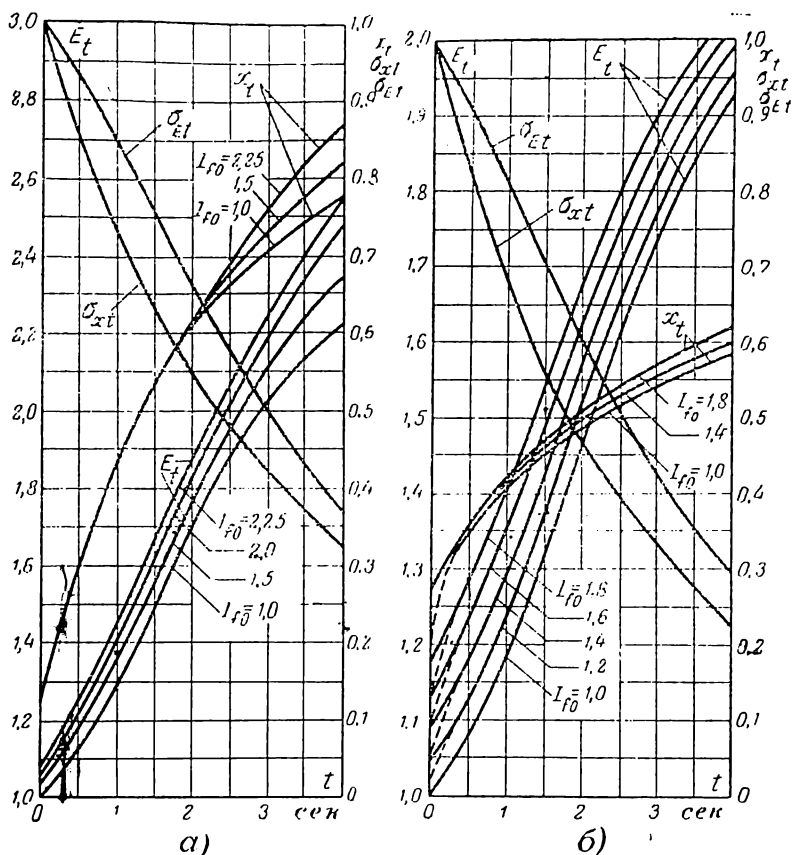


Рис. 11-24. Кривые для определения расчетных E_t и x_t генераторов с АРВ.

а — для турбогенератора; б — для гидрогенератора.

Изложенный путь нахождения E_t и x_t , вообще говоря, можно использовать для каждого генератора. Однако в большинстве случаев можно ограничиться применением расчетных E_t и x_t , найденных для типовых машин. Для союзных генераторов средней мощности, параметры которых приведены в табл. 11-5, на рис. 11-24 приведены семейства кривых¹ $E_t = f(t)$ и $x_t =$

¹ Участки кривых на рис. 11-24, б, проведенные пунктиром, относятся к гидрогенератору с демферными обмотками.

$=\varphi(t)$ при разных значениях предшествующего тока возбуждения I_{f0} . Величины E_t и x_t выражены в относительных единицах при номинальных условиях генератора.

При значительном отличии действительных параметров генератора от типовых, при которых построены кривые рис. 11-24, значения E_t и x_t такого генератора приближенно могут быть найдены по выражениям

$$E_t = E_{qnp} - (E_{qnp} - E''_0) \sigma_{E_t} \quad (11-24)$$

и

$$x_t = x_d - (x_d - x''_d) \sigma_{x_t}, \quad (11-25)$$

где E_{qnp} , E''_0 , x_d и x''_d — соответствующие э. д. с. и реактивности данного генератора;

σ_{E_t} и σ_{x_t} — коэффициенты, значения которых определяются по кривым, приведенным на рис. 11-24.

Дополнительная поправка может быть сделана для учета действительной постоянной времени T_{f0} генератора. Для этого расчетные значения E_t и x_t или σ_{E_t} и σ_{x_t} нужно находить по кривым рис. 11-24 не для действительного момента t , а для его приведенного значения t' , определяемого по (11-19).

То обстоятельство, что установленные для генератора значения расчетных E_t и x_t не зависят от удаленности короткого замыкания, казалось бы, дает право использовать их для расчета процесса короткого замыкания в любой схеме с произвольным числом источников питания. Однако такое заключение было бы преждевременным. В самом деле, значения E_t и x_t получены из условий отдельной работы генератора, в то время как при параллельной работе с другими генераторами внешние характеристики в той или иной мере отличаются от тех, спрямление которых позволило установить значения E_t и x_t генератора.

Таким образом, принципиальным и главным допущением рассматриваемого метода в его применении к сложным схемам является использование расчетных E_t и x_t , которые с небольшой погрешностью, обусловленной произведенным спрямлением внешних характе-

ристик, справедливы лишь для элементарной схемы (т. е. схемы с одним генератором). Тем не менее этот метод во многих случаях позволяет с достаточной для практики точностью определять для промежуточных моментов процесса короткого замыкания ток не только в месте короткого, но также (что особенно важно) в других ветвях схемы. Это подтверждается сравнением с результатами расчета по более точным методам при сохранении прочих одинаковых условий.

Аналогичные кривые для нахождения расчетных E_t и x_t построены также для типовых генераторов без автоматического регулирования возбуждения. В этом случае, очевидно, вне зависимости от удаленности короткого замыкания генератор в каждый момент времени характеризуется своими расчетными E_t и x_t , получаемыми от спрямления соответствующей внешней характеристики.

Общий порядок выполнения расчета по методу спрямленных характеристик полностью идентичен порядку расчета установившегося режима короткого замыкания. Для рассматриваемого момента t все генераторы с АРВ в зависимости от ожидаемого для них режима должны быть введены в схему замещения своими E_t и x_t либо $E = U_n$ и $x = 0$, генераторы без АРВ — своими E_t и x_t . Для предварительного выбора возможного режима генератора с АРВ следует сопоставить величину его $x_{крт}$ с внешней реактивностью схемы по отношению к данному генератору, оценка которой в общем случае может быть сделана лишь в первом приближении. Для $t < 0,5$ сек, имея в виду еще малое влияние АРВ, все генераторы с АРВ можно вводить своими E_t и x_t , т. е. считать, что они работают в режиме подъема возбуждения. Нагрузки должны быть введены в схему замещения в точках их действительного присоединения, принимая их относительную номинальную реактивность $x_{нагр} = 1,2$ и $E = 0$.

После того как для заданной схемы найдены ее E_t и x_t относительно точки короткого замыкания, значение периодической слагающей тока в месте короткого замыкания в данный момент t легко определить:

$$I_{п.к\ t} = \frac{E_{t\ \Sigma}}{x_{t\ \Sigma}}. \quad (11-26)$$

Затем, развертывая схему, следует проверить правильность выбранных режимов генераторов с АРВ, т. е. убедиться, что найденный для генератора ток I_t :

больше критического $I_{кр1}$ (или $U_t \leq U_{н1}$), если для генератора принят режим подъема возбуждения;

меньше критического $I_{кр1}$, если для генератора принят режим нормального напряжения.

Если оказалось, что у некоторых генераторов режимы были выбраны неверно, то их следует соответственно изменить и затем повторить расчет с аналогичной проверкой.

Чтобы построить кривую изменения тока в какой-либо ветви (или напряжения в произвольной точке) схемы, производят расчет для нескольких моментов времени. В большинстве случаев бывает достаточно произвести расчет для двух-трех наиболее характерных моментов, выбранных в пределах интересующего отрезка времени процесса короткого замыкания и, интерполируя между полученными результатами, построить интересующую кривую.

Пример 11-10. При трехфазном коротком замыкании в точке К схемы рис. 11-25,а определить для $t=1,5$ сек ток и напряжение генератора, считая, что он снабжен АРВ. Решение провести для случаев:

а) когда генератор является типовым гидрогенератором и его $I_{f0}=1,7$;

б) когда генератор является гидрогенератором с параметрами $x''_d=0,25$; $x_d=0,5$; $T_{f0}=7,8$ сек; $I_{fпр}=3,8$; в предшествующем режиме: $I_{f0}=1,4$ и $E''_0=1,16$.

За базисные величины примем номинальные величины генератора, т. е. $S_0=50$ Мва; $U_0=10,5$ кВ и $I_0=2,75$ ка. Относительные ба-

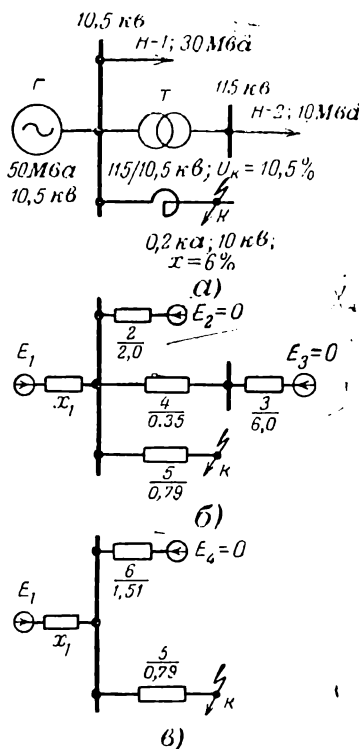


Рис. 11-25. К примеру 11-10.
а — исходная схема; б и в —
схемы замещения.

эисные реактивности отдельных элементов (кроме генератора) указаны на рис. 11-25,б (для нагрузок принято $x_{\text{нагр}}=1,2$).

а) При типовом гидрогенераторе

По кривым рис. 11-24,б для $t=1,5$ сек при $I_{f0}=1,7$ находим $E_{1,5}=1,52$ и $x_{1,5}=0,47$; тогда из (11-22) $x_{\text{кр}1,5} = \frac{0,47}{1,52-1} = 0,9$.

Эквивалентная реактивность элементов 2, 3 и 4 (рис. 10-25,в)

$$x_0 = 2 // (0,35 + 6) = 1,51.$$

Поскольку $x = 0,79 // 1,51 = 0,52 < 0,9 = x_{\text{кр}1,5}$, генератор работает в режиме подъема возбуждения.

Следовательно,

$$E_{\Sigma} = \frac{1,52 \cdot 1,51}{0,47 + 1,51} = 1,16 \text{ и } x_{\Sigma} = (0,47 // 1,51) + 0,79 = 1,15.$$

Искомые величины:

$$U_* = \frac{1,16}{1,15} \cdot 0,79 = 0,8, \text{ или } U = 0,8 \cdot 10,5 = 8,4 \text{ кв};$$

$$I_{\Gamma*} = \frac{1,52 - 0,8}{0,47} = 1,53, \text{ или } I_{\Gamma} = 1,53 \cdot 2,75 = 4,2 \text{ ка}.$$

б) При гидрогенераторе с заданными параметрами

Для $t' = 1,5 \frac{5}{7,8} = 0,96$ сек по кривым рис. 11-24,б находим

$\sigma_{E_{t'}}$ = 0,82 и $\sigma_{x_{t'}}$ = 0,68. Теперь по (11-24) и (11-25) имеем:

$$E_{1,5} = 3,8 - (3,8 - 1,7) \cdot 0,82 = 2,08;$$

$$x_{1,5} = 0,5 - (0,5 - 0,25) \cdot 0,68 = 0,33$$

и по (11-22)

$$x_{\text{кр}1,5} = \frac{0,33}{2,08 - 1} = 0,305.$$

Так как в этом случае $x = 0,52 > x_{\text{кр}1,5}$ через 1,5 сек генератор работает уже в режиме нормального напряжения и искомые величины равны:

$$I_{\kappa*} = \frac{1}{0,79} = 1,27, \text{ или } I_{\kappa} = 1,27 \cdot 2,75 = 3,5 \text{ ка};$$

$$I_{\Gamma*} = 1,27 + \frac{1}{1,51} = 1,93, \text{ или } I_{\Gamma} = 1,93 \cdot 2,75 = 5,3 \text{ ка}$$

и

$$U = U_{\text{н}} = 10,5 \text{ кв}.$$

Пример 11-11. При коротком замыкании в точке $K-1$ схемы рис. 11-26, *а* определить для $t = 1,2$ сек ток в линии $Л-1$. Выключатель B замкнут. Все генераторы снабжены АРВ. Генераторы одинаковы: каждый 166,5 Мва, 18 кВ; $x''_d = 0,122$; $ОКЗ = 0,73$; $T_{j0} = 11,9$ сек; $I_{нр} = 4,0$; $I_{j0} = 1,9$.

Система C : $x = 14,6$ ом, за которым приложено неизменное синусоидальное напряжение 115 кВ.

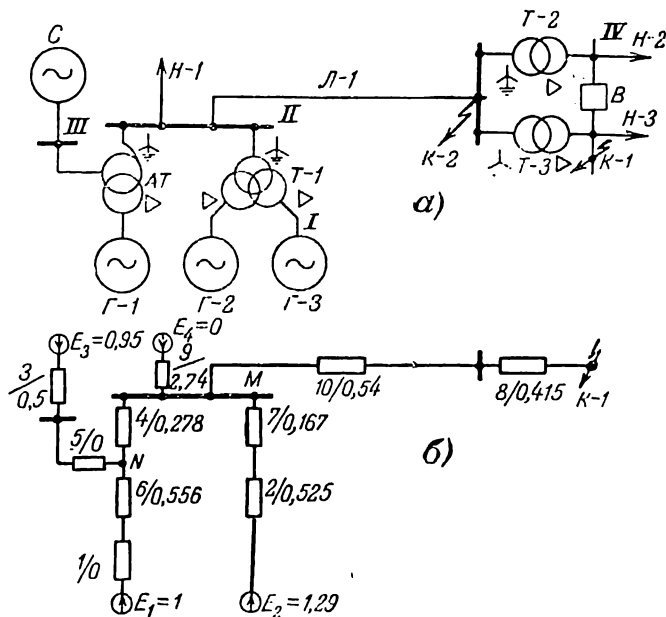


Рис. 11-26. К примеру 11-11.

а — исходная схема; *б* — схема замещения.

Автотрансформатор AT : 180 Мва, 242/121/18 кВ; $u_{BC} = 10\%$; $u_{BH} = 30\%$ и $u_{CH} = 20\%$.

Трансформатор $T-1$: 360 Мва, 242/18/18 кВ; $u_{BH} = 12\%$; $u_{HH} = 24\%$.

Трансформаторы $T-2$ и $T-3$ одинаковы: каждый 60 Мва, 220/11 кВ; $u_H = 12\%$.

Линия $Л-1$: 150 км; $x = 0,42$ ом/км.

Нагрузки: $H-1$ 200 Мва, $H-2$ и $H-3$ по 45 Мва.

Решение проводим в относительных единицах, принимая $S_0 = 500$ Мва и $U_{б1} = 18$ кВ. Соответственно базисные напряжения на других ступенях трансформации будут: $U_{бII} = 242$ кВ; $U_{бIII} = 121$ кВ и $U_{бIV} = 11$ кВ.

Поскольку заданные параметры генераторов близки (кроме величины T_{j0}) к параметрам типового турбогенератора, значения

расчетных E_t и x_t находим по кривым рис. 11-24,а, вводя поправку на различие в T_{j0} , т. е. для приведенного времени $t' = 1,2 \frac{7}{11,9} = 0,7$ сек. При таком времени и $I_{j0} = 1,9$ имеем: $E_{t'} = 1,29$ и $x_{t'} = 0,35$, что при базисных условиях составляет:

$$x_{t'} = 0,35 \frac{500}{166,5} = 1,05; \quad x_{крт'} = \frac{1,05}{1,29 - 1} = 3,63$$

и

$$I_{крт'} = \frac{1}{3,63} = 0,276.$$

На рис. 11-26,б приведена схема замещения, где все элементы выражены в относительных единицах при базисных условиях, причем генераторы Г-2 и Г-3 представлены одним эквивалентным; равным образом трансформаторы Т-2 и Т-3 также заменены одним.

Для генераторов Г-2 и Г-3 выбран режим подъема возбуждения, а для генератора Г-1—режим нормального напряжения, имея в виду близость расположения к нему системы С. Соответственно этому в схему введены: генератор Г-1 с $E_1 = 1$ и $x_1 = 0$, и объединенный генератор Г-2—Г-3 с $E_2 = 1,29$ и $x_2 = 0,525$.

Произведем упрощение схемы: $x_{11} = (0,5 // 0,556) = 0,264$ и $E_5 = E_1 // E_3 = 0,975$; $x_{12} = 0,264 + 0,278 = 0,542$; $x_{13} = 0,167 + 0,525 = 0,692$; $E_5 = E_2 // E_4 // E_5 = 1,0$; $x_{14} = (0,542 // 0,692 // 2,74) = 0,273$ и $x_5 = 0,273 + 0,54 + 0,415 = 1,228$.

Искомый ток

$$I_* = \frac{1}{1,228} = 0,815, \text{ или } I = 0,815 \frac{500}{\sqrt{3} \cdot 242} = 0,97 \text{ ка.}$$

Проверим правильность выбранных режимов.

Напряжение в точке М $U_M = 0,815 (0,54 + 0,415) = 0,78$; ток от Г-2 и Г-3 $I_2 = \frac{1,29 - 0,78}{0,692} = 0,74$, т. е. больше $I_{крт'} = 2 \cdot 0,276 = 0,552$.

Напряжение точки N $U_N = 0,78 + \frac{(0,975 - 0,78)}{0,542} \cdot 0,278 = 0,88$;

ток генератора Г-1 $I_1 = \frac{1 - 0,88}{0,556} = 0,22$, т. е. меньше $I_{крт'} = 0,276$. Таким образом, режимы генераторов выбраны правильно.

11-8. ПРИБЛИЖЕННЫЙ УЧЕТ КАЧАНИЙ

Ранее (см. § 10-3) было показано, что возникающие при коротком замыкании качания генераторов могут существенно влиять на характер изменения тока в отдельных ветвях схемы, причем это влияние обусловлено

главным образом изменением взаимного сдвига между векторами токов отдельных источников. Что касается временной зависимости изменения тока каждого генератора, то рассматриваемые качания на ней отражаются незначительно, в силу чего для определения этого тока можно использовать изложенные выше практические методы.

Таким образом, приближенный учет качаний при коротком замыкании заключается в том, что суммирование токов от отдельных генераторов, найденных одним из практических методов, должно производиться не арифметически (что соответствует совпадению по фазе э. д. с.), а геометрически в соответствии с угловым сдвигом между векторами э. д. с. генераторов, который имеет место в данный момент времени. В общем случае закономерность изменения углового сдвига между э. д. с. во времени является результатом расчета динамической устойчивости рассматриваемой системы, который представляет собой сложную и трудоемкую задачу. Поэтому в практических расчетах коротких замыканий для учета качаний обычно используют типовые кривые изменения угла δ' между неизменным напряжением U и э. д. с. E' генератора, которые применяют в приближенных расчетах динамической устойчивости [Л.10, 20]. Они выражают зависимость угла δ' от расчетного времени τ , которое пропорционально действительному времени t (см. ниже). Неизменное напряжение U характеризует источник бесконечной мощности, относительно которого происходит качание генератора (или станции). Характер таких кривых показан на рис. 11-27, где каждая кривая соответствует определенному значению активной нагрузки P_0 генератора (или станции) в предшествующем режиме, выраженной в долях максимальной активной мощности P'_m , которая может быть передана от данного генератора (или станции) в рассматриваемом аварийном режиме, т. е.

$$T = \frac{P_0}{P'_m} = \frac{P_0}{\frac{E'_0 U}{X'_{\Gamma C}}}, \quad (11-27)$$

где $X'_{\Gamma C}$ — взаимная реактивность между генератором (станцией) и системой при коротком замыкании; генератор входит своей реактивностью X'_a .

Расчетное время τ при частоте 50 гц

$$\tau = t \sqrt{\frac{314}{T_J} P'_m}, \quad (11-28)$$

где T_J — механическая постоянная времени (или постоянная инерции), сек, которая связана с GD^2 машины следующим соотношением:

$$T_J = \frac{2,74GD^2n^2}{S_H} \cdot 10^{-6}, \text{ сек}; \quad (11-29)$$

здесь GD^2 — в $T \cdot \text{м}^2$; n — в об/мин; S_H — в Мва.

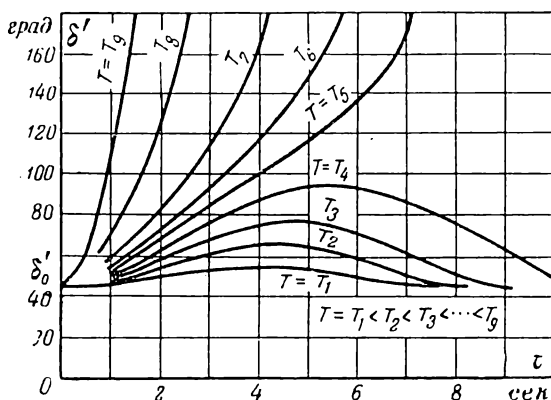


Рис. 11-27. Характер типовых кривых $\delta' = f(\tau)$.

Из (11-29) видно, что пересчет постоянной инерции T_J от номинальной к базисной мощности нужно производить обратно пропорционально мощностям, т. е.

$$T_{J(б)} = T_{J(н)} \frac{S_H}{S_б}. \quad (11-30)$$

По рис. 11-27 следует, что возвращение угла δ' к своему начальному значению соответствует сохранению устойчивости работы генератора (станции) и в аварийных условиях, а прогрессивный рост угла δ' , происходящий тем интенсивнее, чем больше T , указывает на выпадение генератора (станции) из синхронизма.

Рассматриваемые типовые кривые существенно зависят от предшествующего угла δ'_0 . Семейства таких кри-

вых для разных значений $\sin \delta'_0$ (от 0 до 0,9) помещены в приложении П-14. Коль скоро в чисто реактивной схеме найдены для заданного момента времени токи от генератора (станции) I_{Γ} и системы I_C и по соответствующей кривой определен для того же момента времени угол δ' , значение тока в данной ветви находят как геометрическую сумму указанных токов. Его модуль может быть определен из равенства

$$I = \sqrt{I_{\Gamma}^2 + I_C^2 + 2I_{\Gamma}I_C \cos \delta'}. \quad (11-31)$$

В большинстве случаев приближенный учет качаний можно свести к рассмотрению качаний одной станции в заданной схеме по отношению к остальным, объединяя последние в условный источник бесконечной мощности. Когда схема приводится к двум станциям соизмеримой мощности, связанным между собой какими-либо элементами, для приближенной оценки закономерности также могут быть использованы соответствующие типовые кривые, но при этом предварительно должны быть выполнены дополнительные преобразования схемы, которые изложены в специальной литературе [Л. 10, 20].

Пример 11-12. Для условий примера 11-9 определить наименьший ток в линии Л-2, который имеет место при качаниях, вызванных коротким замыканием в точке К схемы рис. 11-22,а.

Дополнительные данные: мощность, поступающая от станции в систему, $P_0 = 174$ Мвт при $\cos \varphi_0 = 0,95$. Постоянная инерции генераторов $T_J = 7$ сек.

При сохранении тех же базисных условий ($S_0 = 600$ Мва и $U_0 = U_{ср}$) найдем относительные величины:

$$\text{активной мощности } P_0 = \frac{174}{600} = 0,29;$$

$$\text{тока } I_0 = \frac{174}{0,95 \cdot 600} = 0,305$$

и начальной переходной э. д. с.

$$E'_0 = \sqrt{(1 \cdot 0,95)^2 + [1 \cdot 0,31 + 0,305(1,16 + 0,59)]^2} = 1,27.$$

Взаимная реактивность между станцией и системой при коротком замыкании

$$x'_{\Gamma C} = 1,16 + 0,59 + \frac{1,16 \cdot 0,59}{0,4} = 3,47.$$

Максимальная активная мощность, которая может быть передана при коротком замыкании, в относительных единицах составляет

$$P'_m = \frac{1,27 \cdot 1}{3,47} = 0,366.$$

Постоянная инерции при базисной мощности по (11-30)

$$T_{J(6)} = 7 \frac{264}{600} = 3,08 \text{ сек.}$$

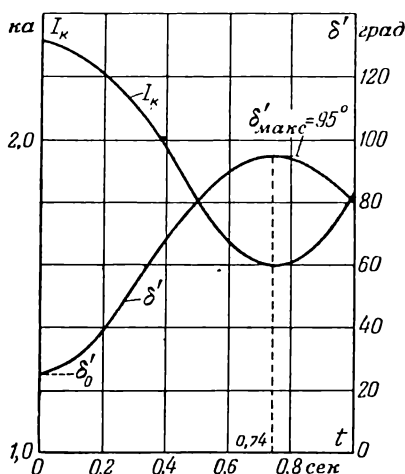


Рис. 11-28. К примеру 11-12.

В соответствии с (11-27) и (11-28) имеем:

$$T = \frac{0,29}{0,366} = 0,793 \approx 0,8 \text{ и } t = \frac{\tau}{\sqrt{\frac{314}{3,08} \cdot 0,366}} = 0,164\tau \text{ сек.}$$

Для начального угла, определяемого выражением

$$\sin \delta'_0 = \frac{I_0 x'_{ГСО} \cos \varphi_0}{E'_0} = \frac{0,305 (1,16 + 0,59) \cdot 0,95}{1,27} = 0,4,$$

по кривой для $T = 0,8$ из рис. П-14 находим $\delta' = f(\tau)$, по которой легко получить зависимость $\delta' = \varphi(t)$, представленную в виде кривой на рис. 11-28.

Наименьшая величина тока в линии Л-2 будет при наибольшем значении угла, т. е. при $\delta' = 95^\circ$, которое наступает через 0,74 сек. По кривым рис. 11-11 при $x_{расч} = 1,02$ значение тока для $t' = 0,2$ сек и $t' = 0,74 \frac{5}{7,55} \approx 0,5$ сек практически одинаковы.

Поэтому искомый ток будет

$$I_k = \sqrt{1,08^2 + 1,25^2 + 2 \cdot 1,08 \cdot 1,25 \cos 95^\circ} = 1,6 \text{ ка},$$

где $I_G = 1,08 \text{ ка}$ и $I_C = 1,25 \text{ ка}$.

Уменьшение тока вследствие расхождения по фазе э. д. с. генераторов относительно системы в данном случае составляет $\sim 31\%$.

Для большей наглядности на рис. 11-28 приведена кривая изменения $I_k = f(t)$ с учетом качания генераторов станции.

11-9. ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. Каковы общие дополнительные допущения, принимаемые в практических расчетах коротких замыканий?

2. Как должны быть введены в схему генераторы и нагрузки для расчета начального сверхпереходного тока?

3. Как изменится взаимное расположение кривых изменения токов I''_G и I''_k на рис. 11-1 при уменьшении мощности нагрузки?

4. В чем особенность определения ударного коэффициента для асинхронного двигателя?

5. Провести решение примера 11-1 для случая, когда короткое замыкание произошло на выводах высшего напряжения трансформатора Т-3.

6. Для условий примера 11-1 определить напряжения на обоих концах линии.

7. Определить величину ударного тока при коротком замыкании на шинах синхронного компенсатора схемы рис. 11-4.

8. Из каких соображений производится приближенная оценка системы при расчете короткого замыкания?

9. Как изменились бы искомые реактивности обеих систем (см. пример 11-3 и схему рис. 11-6,а), если бы мощности генераторов Г-1 и Г-2 были в 2 раза меньше?

10. В чем сущность практического расчета для выбора выключателей по отключающей способности?

11. Что учитывает коэффициент α в выражении (11-7)?

12. Провести решение примера 11-4 для случая, когда система С-2 в схеме рис. 11-6,а отсутствует. Для системы С-1 сохранить найденную в примере 11-3 реактивность.

13. Когда целесообразно использовать метод расчетных кривых?

14. На чем основан метод расчетных кривых?

15. Учитывается ли влияние нагрузки в методе расчетных кривых?

16. Определить ток через 1 сек при коротком замыкании на шинах 115 кв схемы рис. 11-13.

17. В каких случаях приходится производить уточнения метода расчетных кривых и в чем они заключаются?

18. Какова предельная погрешность метода расчетных кривых?

19. Определить ток через 0,2 сек при коротком замыкании в точке К-2 схемы рис. 11-19,а, считая, что выключатель В включен.

20. Провести решение примера 11-9 при отключенной одной цепи линии Л-1.

21. В чем принципиальная сущность метода спрямленных характеристик?

22. Что называется критической реактивностью для произвольного момента времени?

23. Какие возможны уточнения метода спрямленных характеристик?

24. Провести решение примера 11-11 при отключенном выключателе B .

25. Как изменится решение примера 11-11, если считать, что система C отключена?

26. Как можно приближенно учесть качания генераторов при расчете коротких замыканий?

27. Как изменится результат решения примера 11-12, если уменьшить в 2 раза механическую постоянную инерции (т. е. принять $T_J=3,5 \text{ сек}$ вместо 7 сек)?

28. То же, но при условии, что поступающая в систему от станции мощность составляет 120 Мвт при $\cos \varphi_0=0,9$.

ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ НАРУШЕНИИ СИММЕТРИИ СИСТЕМЫ

ГЛАВА ДВЕНАДЦАТАЯ

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ В ИССЛЕДОВАНИИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

12-1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Переходя к изложению электромагнитных переходных процессов, возникающих при нарушении симметрии электрической системы, отметим вначале принимаемые в дальнейшем ограничения и дополнительные допущения, так как исследование несимметричных переходных процессов в общем виде представляет собой чрезвычайно сложную проблему.

Прежде всего рассмотрим случаи возникновения несимметрии в одной произвольной точке системы. Как отмечалось в § 1-1, такая однократная несимметрия может быть поперечной — при коротком замыкании или замыкании через переходное сопротивление между какими-либо двумя фазами или между любой фазой и землей и продольной — при неодинаковых сопротивлениях в фазах или, в частности, при обрыве одной или двух фаз. При этом предполагается, что во всем остальном система строго симметрична.

Математический анализ несимметричных переходных процессов существенно затруднен тем дополнительным обстоятельством, что при этих условиях образуется пульсирующее магнитное поле ротора, которое в об-

щем случае, как показано в § 12-2, вызывает полный спектр высших гармоник. Переход от фазных переменных величин к переменным в координатах $d, q, 0$ при этом не освобождает дифференциальные уравнения от периодических коэффициентов. Здесь оказывается предпочтительнее искать решение для переменных, выраженных также в прямоугольных координатах, но жестко связанных не с ротором, а со статором (координаты $\alpha, \beta, 0$).

Преимущества метода симметричных составляющих для исследования несимметричных режимов в симметричных трехфазных системах общеизвестны. Для стационарных условий обычно определяют лишь основные гармоники искомых величин. При таком ограничении, которое принято в дальнейшем, данный метод применим также в условиях несимметричных переходных процессов (см. § 12-3).

12-2. ОБРАЗОВАНИЕ ВЫСШИХ ГАРМОНИК

Выясним процесс образования высших гармоник при несимметричном режиме синхронной машины; при этом вначале предположим, что на роторе, помимо обмотки возбуждения, не имеется никаких демпферных обмоток и контуров.

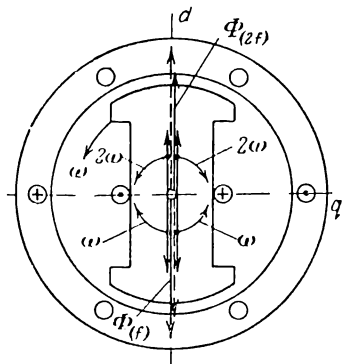


Рис. 12-1. К образованию высших гармоник при несимметричном режиме.

Пусть по одной или двум фазам статора протекает ток синхронной частоты f . Образующийся при этом магнитный поток статора будет пульсировать с той же частотой, оставаясь в пространстве в неизменном положении. Чтобы представить себе влияние этого потока на ротор, разложим его на два потока, вращающихся с синхронной угловой скоростью ω во взаимно противоположных направлениях (рис. 12-1). Поток, вращающийся в том же направлении, что и ротор, по отношению к последнему, очевидно, неподвижен и соответственно взаимодействует с магнитным потоком обмотки возбуж-

дения. Другой поток, который вращается в противоположную сторону, по отношению к ротору имеет двойную синхронную скорость 2ω и в обмотке возбуждения наводит э. д. с. двойной синхронной частоты $2f$. Эта э. д. с. вызовет в обмотке возбуждения ток частоты $2f$, который создаст пульсирующее с частотой $2f$ магнитное поле. Разложение последнего на два вращающихся в противоположные стороны с угловой скоростью 2ω относительно ротора приводит к тому, что один из этих потоков вращается по отношению к статору с угловой скоростью $(2\omega - \omega) = \omega$ в сторону, противоположную вращению ротора, т. е. неподвижен относительно потока, вызвавшего пульсирующий с частотой $2f$ поток ротора, и стремится его компенсировать. Что касается другого потока, то он вращается относительно статора с угловой скоростью $(2\omega + \omega) = 3\omega$ в сторону вращения ротора. Этот поток наводит в статоре э. д. с. тройной частоты. В результате возникнет ток той же частоты, который создает пульсирующее с частотой $3f$ магнитное поле статора.

Продолжая подобные рассуждения, легко убедиться, что каждая нечетная гармоника однофазного переменного тока статора вызывает очередную четную гармонику тока в обмотке возбуждения и в свою очередь каждая четная гармоника тока в обмотке возбуждения вызывает следующую по порядку нечетную гармонику тока статора. Аналогично нетрудно установить, что ток неизменного направления и четные гармоники тока статора связаны соответственно с основной и нечетными гармониками тока обмотки возбуждения. При отсутствии емкости в цепи амплитуды гармоник с ростом их порядкового номера прогрессивно уменьшаются.

Взаимную связь между отдельными составляющими магнитных потоков различных частот статора и ротора можно иллюстрировать схемой рис. 12-2, где указана также расшифровка принятых на ней условных обозначений, что исключает необходимость дополнительных пояснений.

Представим себе теперь, что в поперечной оси ротора имеется замкнутая обмотка. Если воспроизводимый ею электромагнитный эффект такой же, как обмотки возбуждения, то такой ротор, очевидно, симметричен по отношению к любому перемещающемуся относитель-

но него магнитному потоку. В рассматриваемых условиях каждая из обмоток ротора создает пульсирующий поток, и поскольку эти обмотки сдвинуты друг относительно друга в пространстве на 90° (электрических), а их потоки во времени — на четверть периода, от их совместного действия образ-

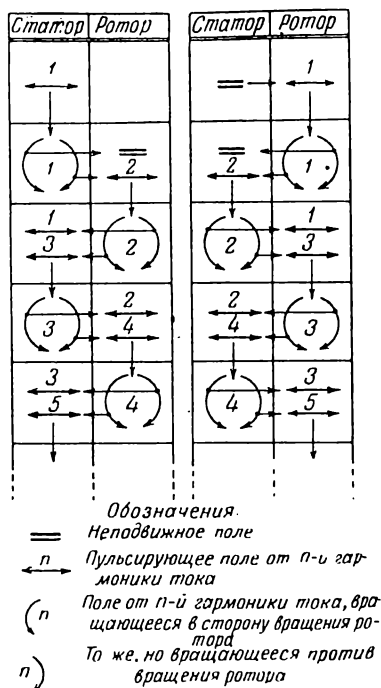


Рис. 12-2. Схема взаимной связи между магнитными потоками различных частот статора и ротора синхронной машины.

зуется вращающееся круговое поле, которое по отношению к вызвавшему его магнитному потоку статора остается неподвижным и направленным навстречу. Следовательно, когда ротор симметричен в продольной и поперечной осях ($x'_d = x'_q$), неизменное или пульсирующее с произвольной частотой магнитное поле статора не создает высших гармоник.

Однако в действительности ротор синхронной машины не обладает такой симметрией, поэтому при любом несимметричном режиме синхронной машины возникают высшие гармоники, причем они проявляются при прочих равных условиях тем интенсивнее, чем больше выражена несимметрия ротора.

Наличие демпферной обмотки только в продольной оси создает, естественно, еще большую несимметрию ротора. Напротив, при поперечной демпферной обмотке или при демпферных обмотках (с соответствующими параметрами) в обеих осях ротора достигается почти полная его симметрия (т. е. $x''_d = x''_q$). Последняя обычно имеет место у турбогенераторов, в силу чего у таких машин высшие гармоники при несимметричных режимах почти не проявляются.

12-3. ПРИМЕНИМОСТЬ МЕТОДА СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ К ИССЛЕДОВАНИЮ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Известно, что в электрических устройствах, выполненных симметрично, применение метода симметричных составляющих в значительной мере упрощает анализ несимметричных процессов, так как при этом симметричные составляющие токов связаны законом Ома с симметричными составляющими напряжений только одноименной последовательности. Иными словами, если какой-либо элемент цепи симметричен и обладает по отношению к симметричным составляющим токов прямой ($\dot{I}_1$), обратной ($\dot{I}_2$) и нулевой ($\dot{I}_0$) последовательностей соответственно сопротивлениями Z_1 , Z_2 и Z_0 , то симметричные составляющие падения напряжения в этом элементе будут:

$$\Delta \dot{U}_1 = Z_1 \dot{I}_1; \quad (12-1)$$

$$\Delta \dot{U}_2 = Z_2 \dot{I}_2; \quad (12-2)$$

$$\Delta \dot{U}_0 = Z_0 \dot{I}_0. \quad (12-3)$$

Сопротивления Z_1 , Z_2 и Z_0 для сокращения обычно называют сопротивлениями соответственно прямой, обратной и нулевой последовательностей. Их величины для одного и того же элемента в общем случае неодинаковы (см. гл. 13).

Комплексная форма записи уравнений, как известно [Л. 4], справедлива не только для стационарного режима, но также для переходного процесса, коль скоро токи и напряжения при переходном процессе можно представить проекциями на соответствующую ось вращающихся или, напротив, неподвижных векторов. При этом дифференциальным уравнениям, связывающим комплексные значения токов и напряжений, соответствуют операторные уравнения, которые при нулевых начальных условиях¹ по своей структуре аналогичны уравнениям стационарного режима, записанным в комплексной форме.

¹ К ним всегда можно свести любую задачу, используя принцип наложения.

Из изложенного, казалось бы, уже можно сделать вывод, что если переменные величины в рассматриваемом процессе могут быть представлены комплексами или соответственно векторами, то последние в свою очередь могут быть разложены на системы симметричных составляющих, и тогда известный метод симметричных составляющих в своей обычной форме может быть применен к исследованию несимметричных переходных процессов. Однако такой вывод был бы еще преждевременным.

Дело в том, что, как показано в предыдущем параграфе, у синхронной машины с несимметричным ротором возникающее при несимметричном режиме инверсное магнитное поле статора порождает прямое магнитное поле статора, вращающееся соответственно с большей скоростью. Обращаясь к терминологии метода симметричных составляющих, можно сказать, что это равносильно тому, что магнитное поле обратной последовательности, созданное системой токов обратной последовательности какой-либо частоты, вызывает магнитное поле прямой последовательности и связанную с ними систему токов прямой последовательности, порядковые номера частот которых на два больше соответствующего номера частоты токов обратной последовательности. Другими словами, при этом оказываются взаимно связанными системы токов прямой и обратной последовательностей разных частот, что налагает дополнительные условия и требования на метод симметричных составляющих. Что касается системы токов нулевой последовательности, то, как указывалось в § 7-5—7-7, создаваемое ими результирующее магнитное поле в расточке статора практически близко к нулю и никакой магнитной связи с ротором они не создают. Последнее, очевидно, справедливо при любой частоте тока нулевой последовательности.

Дальнейшее развитие представлений метода симметричных составляющих применительно к синхронным машинам с несимметричным ротором в условиях стационарных и переходных процессов при нарушении симметрии впервые дано Н. Н. Щедриным [Л. 83]. Помимо математического обоснования такого развития, им предложены для учета высших гармоник специальные цепные схемы, применение которых особенно эффективно при выполнении расчетов с помощью моделей или иных рас-

четных установок. Аналогичное предложение также сделано П. С. Ждановым [Л. 86].

В подавляющем большинстве практических расчетов несимметричных переходных процессов обычно довольствуются учетом лишь основной гармоники токов и напряжений. Именно при таком ограничении представляется возможным применять метод симметричных составляющих в его обычной форме, характеризуя для этого синхронную машину в схеме обратной последовательности соответствующей реактивностью x_2 (см. § 13-2). Значение последней, строго говоря, зависит от вида несимметрии и прочих внешних условий цепи статора и поэтому не является в общепринятом смысле параметром машины. Тем не менее, поскольку эта зависимость проявляется достаточно слабо, практически обычно принимают для каждой синхронной машины свое некоторое постоянное значение реактивности обратной последовательности.

Остановимся еще на одном вопросе, в понимании которого часто встречаются трудности.

В общем случае протекающие по обмоткам статора синхронной машины токи прямой, обратной и нулевой последовательностей создают магнитные потоки тех же последовательностей, а последние наводят в статоре соответствующие э. д. с. Вводить эти э. д. с. в расчет нецелесообразно, так как они пропорциональны (при пренебрежении насыщением магнитной системы машины) токам отдельных последовательностей, значения которых еще подлежат определению. Поэтому в дальнейшем вводим в расчет только те э. д. с., которые или известны, или не зависят от изменения внешних условий цепи статора¹, причем в силу симметричного выполнения статорной обмотки эти э. д. с. являются э. д. с. только прямой последовательности. Что касается э. д. с., обусловленных реакцией токов отдельных последовательностей, то их учитываем в виде падений напряжения с обратным знаком в соответствующих реактивностях машины.

Дополнительно условимся, что установленные у синхронных машин устройства автоматического регулирования

¹ Как-то: начальные значения переходной и сверхпереходной э. д. с., синхронная э. д. с. E_d при известном токе возбуждения I_f , расчетная э. д. с. E_i для произвольного момента времени согласно методу спрямленных характеристик и др.

ния возбуждения независимо от их конструкции реагируют только на отклонения напряжения прямой последовательности (т. е. они включены через фильтры напряжения прямой последовательности) и стремятся поддерживать это напряжение на постоянном уровне, которое принимается равным номинальному для каждой машины.

В соответствии с изложенным для произвольного не-симметричного короткого замыкания основные уравнения второго закона Кирхгофа отдельно для каждой последовательности будут иметь вид:

$$\dot{U}_{K1} = \dot{E}_\Sigma - Z_{1\Sigma} I_{K1}; \quad (12-4)$$

$$\dot{U}_{K2} = 0 - Z_{2\Sigma} I_{K2}; \quad (12-5)$$

$$\dot{U}_{K0} = 0 - Z_{0\Sigma} I_{K0}, \quad (12-6)$$

где $\dot{U}_{K1}$, $\dot{U}_{K2}$, $\dot{U}_{K0}$, I_{K1} , I_{K2} , I_{K0} — симметричные составляющие напряжения и тока в месте короткого замыкания;

$\dot{E}_\Sigma$ — результирующая э. д. с. относительно точки короткого замыкания;

$Z_{1\Sigma}$, $Z_{2\Sigma}$, $Z_{0\Sigma}$ — результирующие сопротивления схем соответствующих последовательностей относительно точки короткого замыкания.

Из (12-5) и (12-6) непосредственно следует, что при принятом способе учета э. д. с., обусловленных реакцией токов отдельных последовательностей, образование токов обратной и нулевой последовательностей можно представить как следствие возникающих в месте короткого замыкания напряжений обратной и нулевой последовательностей.

Следует отметить, что совершенно аналогичная запись основных уравнений для каждой последовательности может быть сделана при однократной продольной

несимметрии. При этом под напряжением какой-либо последовательности следует понимать разность фазных напряжений соответствующей последовательности по концам местной несимметрии, а результирующие сопротивления должны быть определены по отношению к месту несимметрии (см. § 14-4).

Уравнения (12-4)—(12-6) содержат шесть неизвестных величин: три составляющих напряжения и три составляющих тока. Недостающие для определения этих величин три уравнения легко получить из граничных условий, которыми характеризуется тот или иной вид несимметричного повреждения.

Задача нахождения токов и напряжений при рассматриваемом несимметричном переходном процессе по существу сводится к вычислению симметричных составляющих этих величин. Как только последние найдены, дальнейшее определение фазных величин токов и напряжений производится по соотношениям¹, известным из метода симметричных составляющих.

12-4. ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. Чем вызвано образование высших гармоник при несимметричных режимах синхронной машины?

2. Почему при отсутствии емкости в цепи статора амплитуда гармоник тока с ростом их порядкового номера уменьшается и чем объяснить, что при наличии емкости возможно увеличение какой-либо гармоники?

3. Какими средствами можно уменьшить высшие гармоники, образующиеся при несимметричных режимах?

4. В чем принципиальные трудности применения метода симметричных составляющих к исследованию переходных процессов синхронных машин?

5. На каком допущении основано использование метода симметричных составляющих для практических расчетов несимметричных переходных процессов?

6. В трехфазной сети с незаземленной нейтралью $I_A = M$ и $I_B = N$. Найти симметричные составляющие тока фазы A при условии, что M и N — вещественные величины.

7. Междофазные напряжения трехфазной системы составляют: $U_{AB} = 1000$ в; $U_{BC} = 1500$ в и $U_{CA} = 2000$ в. Определить симметричные составляющие междофазных и фазных напряжений.

¹ В приложении П-12 для справки приведены соотношения между фазными величинами и их симметричными составляющими, а также основные свойства фазного множителя (оператора фазы) a .

8. Показания амперметров, включенных в фазные провода и нулевой провод, соответственно составляют: $I_A = 100$ а; $I_B = 100$ а; $I_C = 0$ и $I = 100$ а. Определить коэффициенты несимметрии ($I_2:I_1$) и неуравновешенности ($I_0:I_1$) этой системы токов, считая, что ток фазы A :

а) опережает ток фазы B ;

б) отстает от тока фазы B .

9. Найти значения следующих выражений:

$$a^2 - \frac{1}{a}; \quad 1 - \frac{1}{a^2}; \quad \frac{1+a^2}{1-a}.$$

10. Определить значения фазных токов, если известны симметричные составляющие тока фазы A : $I_{A1} = 500$ а; $I_{A2} = -150$ а и $I_0 = -250$ а.

ГЛАВА ТРИНАДЦАТАЯ

ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ТОКОВ ОБРАТНОЙ И НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

13-1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Все сопротивления, которыми характеризуются отдельные элементы в нормальном симметричном режиме, а также в симметричном переходном процессе, по существу являются сопротивлениями прямой последовательности¹. Этот специальный термин вводить ранее не было нужды, поскольку токи были лишь одной последовательности.

При отсутствии магнитной связи между фазами какого-либо элемента его сопротивления, очевидно, не зависят от порядка чередования фаз тока. Активная и реактивная слагающие сопротивления такого элемента зависят только от частоты тока и, следовательно, для всех последовательностей одинаковы, т. е.

$$r_1 = r_2 = r_0$$

и

$$x_1 = x_2 = x_0;$$

соответственно

$$z_1 = z_2 = z_0.$$

¹ Исключение составляет реактивность, используемая при определении постоянной времени T_a [см. (9-14)].

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

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

$$r_1 = r_2$$

и

$$x_1 = x_2;$$

соответственно

$$z_1 = z_2.$$

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

Помимо определения индуктивных сопротивлений обратной и нулевой последовательностей, ниже также приведены указания к определению активных сопротивлений тех же последовательностей. Учет последних часто представляется необходимым, особенно при расчете однофазных коротких замыканий, причем его выполнение обычно не вызывает трудностей, так как этот вид короткого замыкания обычно характеризуется большой электрической удаленностью относительно источников питания, что позволяет принимать в течение всего переходного процесса сверхпереходную (или переходную) Э. д. с., а иногда даже напряжение генератора неизменными.

13-2. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Магнитный поток, созданный токами обратной последовательности синхронной частоты, вращаясь относительно ротора с двойной синхронной скоростью, встречает на своем пути непрерывно изменяющееся магнитное сопротивление, что обусловлено магнитной несимметрией ротора в его продольной и поперечной осях и тем, что наведенные в продольных и поперечных контурах ротора

токи создают различные ответные реакции. Таким образом, при неизменной н. с. статора поток обратной последовательности гармонически изменяется с двойной синхронной скоростью в пределах между его наибольшим и наименьшим значениями, разница между которыми за-

висит от степени несимметрии ротора; она велика при резкой несимметрии ротора и, напротив, совсем исчезает при его полной симметрии.

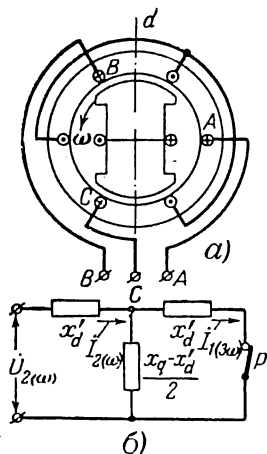


Рис. 13-1. Подключение синхронной машины к источнику напряжения обратной последовательности (а) и схема замещения, определяющая реактивность x_2 синхронной машины с учетом влияния третьей гармоники тока прямой последовательности (б).

В § 12-2 было показано, что поток обратной последовательности синхронной частоты в общем случае вызывает в статоре нечетные гармоники, которые искажают синусоидальную форму магнитного поля статора. Именно это обстоятельство существенно затрудняет определение реактивности обратной последовательности синхронной машины и приводит к тому, что данная реактивность, строго говоря, не является параметром машины, так как она зависит от внешних по отношению к машине условий (внешней реактивности, вида несимметрии).

Пусть к статору явнополусной машины без демпферных контуров, ротор которой вращается с синхронной скоростью, а ее обмотка возбуждения замкнута накоротко, подведено синусоидальное напряжение обратной последовательности синхронной частоты и постоянной амплитуды. Для упрощения записи примем, что все величины (включая время) выражены в относительных единицах и отсчет времени производится с момента, когда ось d ротора совпадает с осью обмотки фазы A (рис. 13-1,а), т. е.

$$u_A = U \sin t; \quad u_B = U \sin \left(t + \frac{2}{3} \pi \right); \quad u_C = U \sin \left(t - \frac{2}{3} \pi \right).$$

Найдем при этих условиях (при них опытно определяют сопротивления обратной последовательности син-

хронной машины) выражение для тока в фазах статора.

Переходя к переменным в осях d , q , по (7-24) и (7-25) находим:

$$u_d = U \sin 2t$$

и

$$u_q = -U \cos 2t.$$

В соответствии с (7-33а) и (7-34а) для потокосцеплений имеем:

$$\Psi_d = x'_d i_d$$

и

$$\Psi_q = x_q i_q.$$

Теперь, пренебрегая активным сопротивлением статора r , согласно (7-41) и (7-42) можно написать:

$$\left. \begin{aligned} u_d &= -p\Psi_d - \Psi_q = -px'_d i_d - x_q i_q = U \sin 2t; \\ u_q &= -p\Psi_q + \Psi_d = -px_q i_q + x'_d i_d = -U \cos 2t. \end{aligned} \right\} \quad (13-1)$$

С другой стороны, токи i_d и i_q могут быть записаны в форме:

$$i_d = M \cos 2t$$

и

$$i_q = N \sin 2t.$$

Подставив эти выражения в (13-1) и производя затем сокращения общих множителей, получим простую систему уравнений:

$$U = 2Mx'_d - Nx_q;$$

$$U = 2Nx_q - Mx'_d,$$

откуда

$$M = \frac{U}{x'_d} \text{ и } N = \frac{U}{x_q}.$$

Таким образом,

$$\left. \begin{aligned} i_d &= \frac{U}{x'_d} \cos 2t; \\ i_q &= \frac{U}{x_q} \sin 2t. \end{aligned} \right\} \quad (13-2)$$

Искомое выражение для тока фазы A согласно (7-23) будет

$$i_A = i_d \cos \gamma + i_q \sin \gamma = \frac{U}{x'_d} \cos 2t \cdot \cos t + \frac{U}{x_q} \sin 2t \cdot \sin t;$$

имея в виду, что

$$\cos 2t \cdot \cos t = \frac{1}{2} (\cos t + \cos 3t)$$

и

$$\sin 2t \cdot \sin t = \frac{1}{2} (\cos t - \cos 3t),$$

после преобразования найдем:

$$i_A = \frac{U(x'_d + x_q)}{2x'_d x_q} \cos t + \frac{U(x_q - x'_d)}{2x'_d x_q} \cos 3t, \quad (13-3)$$

т. е. наряду с основной гармоникой ток статора содержит еще третью гармонику.

Для токов двух других фаз соответственно имеем:

$$i_B = \frac{U(x'_d + x_q)}{2x'_d x_q} \cos \left(t + \frac{2}{3} \pi \right) + \frac{U(x_q - x'_d)}{2x'_d x_q} \cos \left(3t - \frac{2}{3} \pi \right); \quad (13-4)$$

$$i_C = \frac{U(x'_d + x_q)}{2x'_d x_q} \cos \left(t - \frac{2}{3} \pi \right) + \frac{U(x_q - x'_d)}{2x'_d x_q} \cos \left(3t + \frac{2}{3} \pi \right). \quad (13-5)$$

Из (13-3) — (13-5) непосредственно видно, что основная гармоника представляет собой ток обратной последовательности, а третья гармоника является током прямой последовательности тройной частоты. Их амплитуды связаны соотношением

$$I_{1(3\omega)} = \frac{x_q - x'_d}{x_q + x'_d} I_{2(\omega)}. \quad (13-6)$$

В данном случае под реактивностью обратной последовательности следует понимать отношение подведенного напряжения обратной последовательности к основной гармонике тока обратной последовательности¹, т. е.

$$x_2 = \frac{2x'_d x_q}{x'_d + x_q}. \quad (13-7)$$

¹ Ср. с (9-15).

Эта реактивность может быть представлена схемой замещения, показанной на рис. 13-1,б. Нетрудно убедиться, что ток в параллельной ветви с реактивностью x'_d дает значение третьей гармоники тока прямой последовательности.

Представим себе теперь, что напряжение обратной последовательности приложено не непосредственно к статору машины, а через произвольную реактивность x . Общая реактивность обратной последовательности при этом будет

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

и на долю самой машины приходится величина

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

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

$$x_2 = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{2x'_d x_q + (x'_d + x_q)x}{x'_d + x_q + 2x} = \frac{x'_d + x_q}{2}, \quad (13-8)$$

что соответствует отсутствию третьей гармоники тока. Эта реактивность получается из схемы замещения рис. 13-1,б, если разомкнуть рубильник P , т. е. разорвать цепь, где протекает третья гармоника тока. На контактах разомкнутого рубильника при этом будет напряжение, пропорциональное третьей гармонике потокоцепления статора.

Следовательно, принципиальная разница между выражениями (13-7) и (13-8) состоит в том, что первое из них дает значение x_2 машины с учетом влияния третьей гармоники тока, а второе — без учета такого влияния. При симметричном роторе ($x_q = x'_d$) выражения (13-7) и (13-8) дают одно и то же значение $x_2 = x'_d$, что также следует из схемы замещения рис. 13-1,б.

До сих пор предполагалось, что обратно-синхронное питание подано от источника бесконечной мощности, в силу чего, помимо основной гармоники, в статоре возникает еще только третья гармоника тока. Однако в условиях несимметричного режима машины (см. § 12-2) поле обратной последовательности основной частоты вы-

зывает в статоре весь спектр нечетных гармоник, причем токи и напряжения любой частоты подчиняются граничным условиям для данного вида несимметрии, выраженным на основе метода симметричных составляющих. Так, при двухфазном коротком замыкании (см. § 15-2) токи

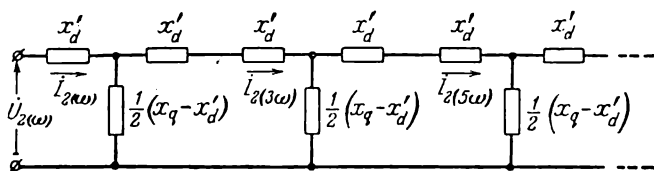


Рис. 13-2. Цепная схема замещения к определению реактивности x_2 синхронной машины с учетом влияния нечетных гармоник тока статора.

прямой и обратной последовательностей одноименной частоты в неповрежденной фазе связаны простым соотношением $i_1 = -i_2$. Для этого случая, как показал Н. Н. Щедрин [Л. 83], схема замещения рис. 13-1,б

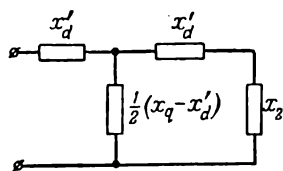


Рис. 13-3. К определению реактивности x_2 синхронной машины.

может быть развита в бесконечную цепную схему замещения рис. 13-2, где ток каждой ячейки соответствует определенной нечетной гармонике.

Результирующая реактивность такой цепной схемы представляет собой реактивность обратной последовательности машины с учетом влияния всех нечетных гармоник. Она может быть найдена с помощью гиперболических функций или еще проще и нагляднее, исходя из схемы рис. 13-3, для которой можно написать

$$x_2 = x'_d + \left[(x'_d + x_2) \parallel \frac{1}{2} (x_q - x'_d) \right],$$

откуда искомая реактивность

$$x_2 = \sqrt{x'_d x_q}. \quad (13-9)$$

Эта реактивность является средней геометрической из реактивностей, определяемых по (13-7) и (13-8); она также зависит от внешней реактивности:

$$x_2 = \sqrt{(x'_d + x)(x_q + x)} - x.$$

В пределе она стремится к

$$x_2 = \lim_{x \rightarrow \infty} [\sqrt{(x'_d + x)(x_q + x)} - x] = \frac{x'_d + x_q}{2},$$

т. е. к значению без учета влияния высших гармоник, поскольку они подавлены внешней реактивностью x .

Использование реактивности по (13-9) позволяет определить основную гармонику тока с большей точностью.

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

Для иллюстрации на рис. 13-4 приведены зависимости изменения x_2/x''_d (или x_2/x'_d) в функции x''_q/x''_d (или x_q/x'_d), построенные по (13-7), (13-8) и (13-9) при отсутствии внешней реактивности ($x=0$). Как видно, только при достаточно больших значениях x''_q/x''_d (или x_q/x'_d) разница в значениях x_2 , полученных по сравниваемым выражениям, становится существенной. Однако если учесть внешнюю реактивность, то она быстро исчезнет.

Следует отметить, что при несимметрии, сопровождаемой возникновением токов нулевой последовательности, реактивность обратной последовательности машины, определяемая с учетом влияния нечетных гармоник тока статора, оказывается зависящей не только от реактивности внешней цепи, но также от реактивности нуле-

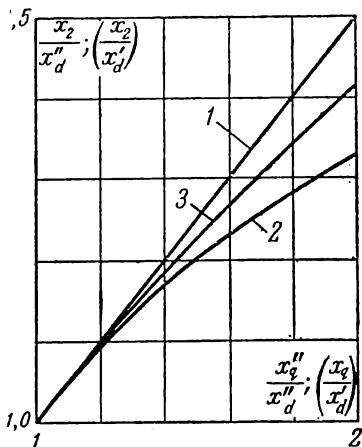


Рис. 13-4. Зависимости отношения x_2/x''_d (или x_2/x'_d) в функции x''_q/x''_d (или x_q/x'_d) при определении x_2 .

1 — по выражению (13-8); 2 — по выражению (13-7); 3 — по выражению (13-9).

вой последовательности самой машины. Однако это дает ничтожную поправку к значению x_2 , получаемому по (13-9).

Таким образом, коль скоро (13-7), (13-8) и (13-9) почти равноценны, в большинстве практических расчетов целесообразно принимать для синхронных машин реактивность x_2 по наиболее простому выражению (13-8), которое к тому же удовлетворяет нормальному правилу последовательного соединения реактивностей генератора и внешней цепи. Естественно, при необходимости учета высших гармоник надлежит использовать цепную схему замещения рис. 13-2.

В качестве приближенных соотношений можно принимать:

для машин без демпферных обмоток $x_2 \approx 1,45x'_d$
 для турбогенераторов и машин с демпферными обмотками в обеих осях ротора $x_2 \approx 1,22x''_d$

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

$$x_2 \approx x''_d. \quad (13-10)$$

Активное сопротивление обратной последовательности синхронной машины r_2 всегда больше активного сопротивления прямой последовательности, так как, помимо активного сопротивления статорной обмотки, оно включает в себя дополнительную составляющую, учитывающую влияние токов обратной последовательности на ротор машины. Из-за большого числа влияющих факторов аналитический подсчет этой дополнительной составляющей произвести нельзя. Поэтому величину r_2 определяют, исходя из найденного опытным путем полного сопротивления z_2 и вычисленного значения реактивности x_2 , т. е.

$$r_2 = \sqrt{z_2^2 - x_2^2}. \quad (13-11)$$

Токи нулевой последовательности создают практически только магнитные потоки рассеяния статорной обмотки. Поскольку потоки рассеяния на лобовых и пазовых участках каждой фазы статорной обмотки зависят

от влияния смежных фаз, реактивность рассеяния различна при протекании токов той или иной последовательности. При токах нулевой последовательности реактивность рассеяния, как правило, меньше, чем при токах прямой или обратной последовательности, причем это уменьшение зависит от типа обмотки (особенно сильно оно проявляется в двухслойных обмотках с укороченным шагом). Поэтому величина реактивности нулевой последовательности синхронных машин колеблется в широком диапазоне:

$$x_0 \approx (0,15 \div 0,6) x''_d. \quad (13-12)$$

Активное сопротивление нулевой последовательности синхронной машины такое же, как и прямой последовательности:

$$r_0 = r_1. \quad (13-13)$$

Значения реактивностей x_2 и x_0 для различных синхронных машин приведены в приложении П-4. В приближенных расчетах в качестве средних величин x_2 и x_0 можно принимать величины, приведенные в табл. 13-1.

Таблица 13-1

Средние величины x_2 и x_0 синхронных машин (в относительных единицах при номинальных условиях)

Тип синхронной машины	x_2	x_0
Турбогенераторы мощностью до 200 <i>Мвт</i> . .	0,15	0,05
То же 200 <i>Мвт</i> и более	0,22	—
Гидрогенераторы с демпферными обмотками .	0,25	0,07
" без демпферных обмоток . .	0,45	0,07
Синхронные компенсаторы и крупные синхронные двигатели	0,24	0,08

13-3. АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

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

жет быть найдено из круговой диаграммы двигателя или известной схемы замещения последнего (рис. 13-5); при этом в значения реактивности рассеяния и активного сопротивления ротора должны быть введены поправки, учитывающие влияние поверхностного эффекта, поскольку наведенный ток в роторе имеет частоту $(2 - s)$.

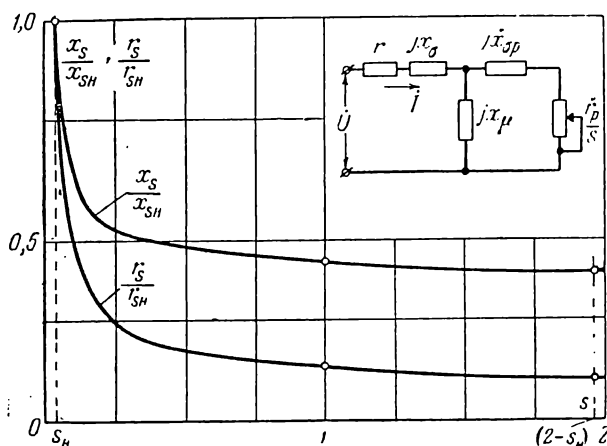


Рис. 13-5. Относительные изменения активного и индуктивного сопротивлений асинхронного двигателя в зависимости от скольжения.

Кривые, представленные на рис. 13-5, иллюстрируют примерный характер относительного изменения активного и индуктивного сопротивлений асинхронного двигателя в функции скольжения. За единицу этих сопротивлений приняты их значения при номинальном скольжении s_n (т. е. когда двигатель работает при номинальных условиях). Как видно, при относительно небольших скольжениях имеет место быстрый спад обеих кривых, а в дальнейшем они достаточно пологи. Это позволяет практически считать активное и индуктивное сопротивления обратной последовательности асинхронного двигателя равными соответствующим величинам при $s=1$, т. е. при заторможенном роторе или, как называют иначе, при режиме короткого замыкания двигателя:

$$x_2 \approx x_{s=1} = x_K; \quad (13-14)$$

и

$$r_2 \approx r_{s=1} = r_K. \quad (13-15)$$

Следует отметить, что, поскольку ротор асинхронного двигателя совершенно симметричен, поток обратной последовательности никаких высших гармоник не вызывает.

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

Активное сопротивление нулевой последовательности включает в себя только активное сопротивление статорной обмотки двигателя.

13-4. ОБОБЩЕННАЯ НАГРУЗКА

Сопротивление обратной последовательности обобщенной нагрузки зависит от характера приемников электроэнергии и относительного участия каждого из них в рассматриваемой нагрузке. На основе специального анализа, проведенного для ряда крупных энергетических систем, установлено, что относительный состав обобщенной нагрузки в зависимости от типа системы несколько меняется и его можно примерно характеризовать данными табл. 13-2 [Л. 88].

Указанное различие в составах нагрузок мало сказывается на величине их сопротивления обратной после-

Таблица 13-2

Относительный состав обобщенных нагрузок

Потребители электроэнергии	Доля участия, %, в системе	
	с крупной городской нагрузкой	с крупной промышленной нагрузкой
Освещение	30	18
Двигатели	51	53
Выпрямители	8	13
Печи	3	8
Потери	8	8
Всего	100%	100%

довательности, если считать, что их присоединение осуществлено по типовой схеме. Величина этого сопротивления, выраженная в относительных единицах при полной рабочей мощности ($M_{ва}$) нагрузки и среднем номинальном напряжении той ступени, где она подключена, примерно составляет:

относительно узлов сети 6—10 кВ

$$z_2 = 0,18 + j0,24; \quad (13-16)$$

относительно узлов сети 35 кВ и выше

$$z_2 = 0,19 + j0,36. \quad (13-17)$$

Полное сопротивление обратной последовательности обобщенной нагрузки обычно заменяют эквивалентной реактивностью, значения которой в относительных единицах принимают примерно следующими:

относительно узлов сети 6—10 кВ

$$x_2 = 0,35; \quad (13-18)$$

относительно узлов сети 35 кВ и выше

$$x_2 = 0,45. \quad (13-19)$$

В приближенных расчетах для всех обобщенных нагрузок независимо от места их присоединения часто принимают $x_2 = 0,35$, т. е. ту же величину, что и в начальный момент переходного процесса (см. § 6-4).

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

13-5. РЕАКТОРЫ

Реактор относится к элементам, реактивность которых определяется преимущественно собственной реактивностью каждой фазы; взаимная индукция между фазами реактора настолько относительно мала, что практически ею можно пренебречь.

По этой причине полное сопротивление нулевой последовательности реактора, а также отдельные составляющие этого сопротивления можно считать теми же, что и для токов прямой последовательности, т. е.

$$z_0 = z_1. \quad (13-20)$$

13-6. ТРАНСФОРМАТОРЫ¹

Сопротивление нулевой последовательности трансформатора в значительной мере определяется его конструкцией и схемой соединения обмоток.

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

На рис. 13-6, а, б и в приведены основные варианты соединения обмоток двухобмоточного трансформатора, при которых приложенное к обмотке I напряжение нулевой последовательности вызывает в одной или обеих обмотках ток той же последовательности. Справа, против каждого варианта соединения обмоток, показаны схемы замещения трансформатора (активными сопротивлениями пренебрежено) для токов нулевой последовательности. Напомним, что подведенное к обмотке I напряжение U_0 расходуется на покрытие падения напряжения от тока данной обмотки в ее реактивности рассеяния x_1 и уравнивание э. д. с. трансформатора, численно равной падению напряжения от тока намагничивания в реактивности намагничивания $x_{\mu 0}$. В свою очередь эта э. д. с. тратится на проведение тока другой обмотки че-

¹ Для общности приводимых здесь записей и указаний обмотки трансформатора обозначены порядковыми номерами I, II, III вместо В, С, Н (соответственно высшее, среднее, низшее напряжения), как это обычно принято.

рез все сопротивления ее цепи, включая реактивность рассеяния x_{II} .

Остановимся на соединении обмоток Y_0/Δ (рис. 13-6,а) *. Здесь э. д. с. нулевой последовательности трансформатора целиком расходуется на проведение тока нулевой последовательности только через реактивность рассеяния обмотки, соединенной треугольником, так как этот ток (подобно третьей гармонике тока) не выходит за пределы данной обмотки. В схеме замещения это отражают закорачиванием ветви с x_{II} . Потенциал, равный нулю, на конце ветви x_{II} схемы замещения не указывает на искусственный перенос заземления нейтрали, как это иногда ошибочно воспринимают, он только соответствует условию, что данной ветвью схемы замещения трансформатора заканчивается путь циркуляции токов нулевой последовательности.

При соединении обмоток Y_0/Y_0 представленная на рис. 13-6,б схема замещения предполагает, что на стороне обмотки II обеспечен путь для тока нулевой последовательности, т. е. в цепи этой обмотки имеется по меньшей мере еще одна заземленная нейтраль (см. пунктир). Если же этого нет, то схема замещения будет такой же, как и при соединении обмоток Y_0/Y (рис. 13-6,в), что соответствует режиму холостого хода трансформатора.

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

Для группы из трех однофазных трансформаторов ток намагничивания не зависит от того, какая симметричная система напряжения подведена к ней, так как магнитный поток каждой фазы имеет отдельный магнитопровод. Поэтому в данном случае ток намагничивания нулевой последовательности столь же мал, как и ток намагничивания прямой (или обратной) последовательности, что позволяет пренебречь им, т. е. считать $x_{\mu 0} = \infty$. Практически это справедливо также для трехфазных четырех- и пятистержневых (броневых) трансформаторов, поскольку при таких конструкциях магнитные потоки нулевой последовательности замыкаются через свободные от обмоток стержни магнитопровода.

* Обозначение Y_0 указывает на то, что нейтраль звезды заземлена.

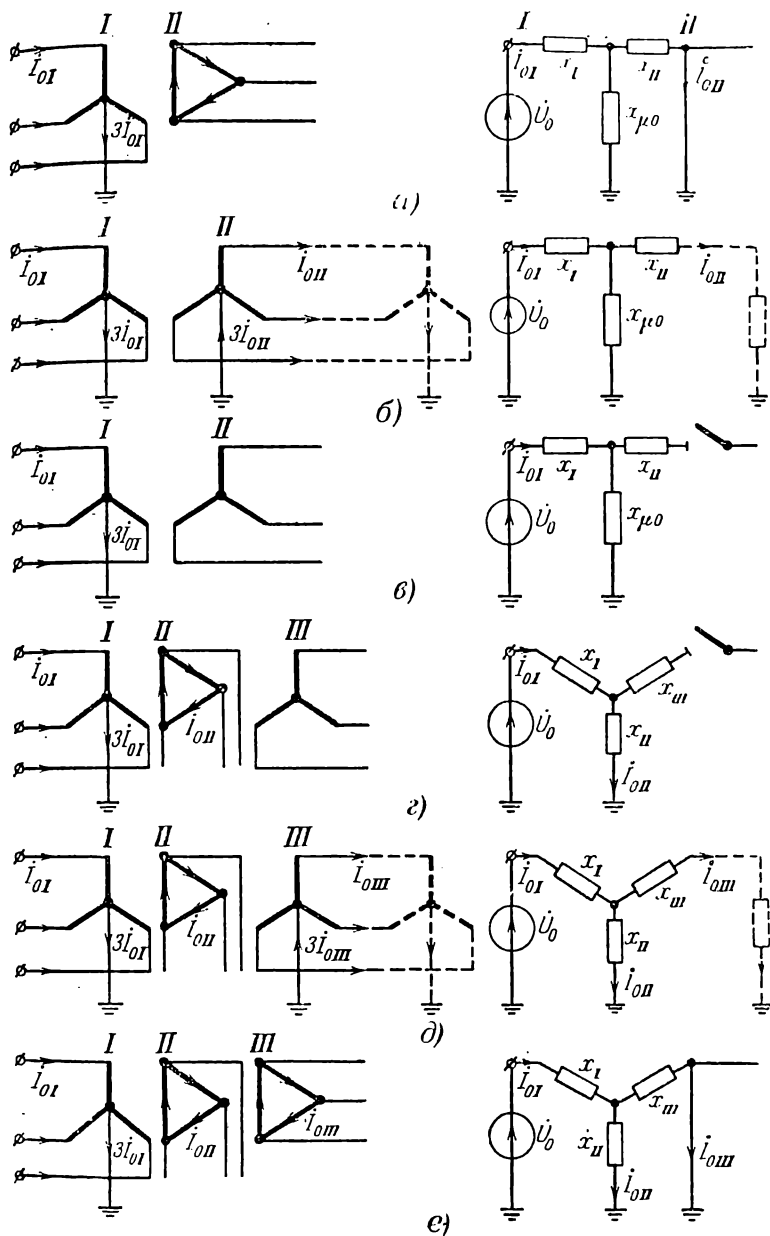


Рис. 13-6. Схемы замещения трансформаторов для токов нулевой последовательности.

Иные условия имеют место в трехфазных трехстержневых трансформаторах, где магнитные потоки нулевой последовательности вынуждены замыкаться через изолирующую среду и кожух трансформатора. Для проведения магнитного потока по пути со столь высоким магнитным сопротивлением необходим достаточно большой ток намагничивания; следовательно, реактивность $x_{\mu 0}$ у такого трансформатора значительно меньше, чем $x_{\mu 1}$. В зависимости от конструкции этого типа трансформатора она находится в пределах $x_{\mu 0} \approx 0,3 \div 1,0$. Достаточно надежное значение этой реактивности может быть получено лишь опытным путем. Имея в виду, что величина x_{11} все же значительно меньше $x_{\mu 0}$, практически можно считать, что и для трехстержневых трансформаторов с соединением обмоток Y_0/Δ $x_0 \approx x_1$.

В табл. 13-3 сведены изложенные выше указания относительно оценки реактивности нулевой последовательности двухобмоточных трансформаторов.

Таблица 13-3

Реактивности x_0 двухобмоточных трансформаторов

№ п/п.	Тип трансформатора и соединение его обмоток	x_0
1	Трансформатор любого типа с соединением обмоток Y_0/Δ	x_1
2	Трехфазная группа из однофазных трансформаторов, трехфазный четырех- или пятистержневой трансформатор: с соединением обмоток Y_0/Y	∞
	то же Y_0/Y_0	x_1
3	Трехфазный трехстержневой трансформатор: с соединением обмоток Y_0/Y_0	$x_1 + x_{\mu 0}$
	то же Y_0/Y	По рис. 13-6, б

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

Основные варианты соединения обмоток трехобмоточного трансформатора и соответствующие им схемы замещения нулевой последовательности (считая U_0 при-

ложенным со стороны обмотки I) приведены на рис. 13-6, *г*, *д* и *е*.

В варианте *г* ток нулевой последовательности в обмотке III отсутствует. Следовательно, в этом случае

$$x_0 = x_I + x_{II} = x_{I-II}.$$

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

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

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

Активное сопротивление нулевой последовательности трансформатора то же, что и прямой последовательности. Лишь для трехстержневых трансформаторов оно несколько больше активного сопротивления прямой последовательности за счет образования дополнительных потерь.

13-7. АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ¹

Обмотки автотрансформатора связаны между собой не только магнитно, но и электрически, поэтому протекание в них токов нулевой последовательности имеет некоторые особенности, которые должны быть отражены в схеме замещения нулевой последовательности автотрансформатора. При известных условиях, как показано ниже, даже в случае изолированной нейтрали автотрансформатора в его обмотках возможна циркуляция токов нулевой последовательности.

При глухом заземлении нейтрали автотрансформатора его схема замещения нулевой последовательности аналогична схеме соответствующего трансформатора. Так, если у автотрансформатора нет третьей обмотки и во вторичной цепи обеспечен путь для тока нулевой по-

¹ См. сноску к § 13-6.

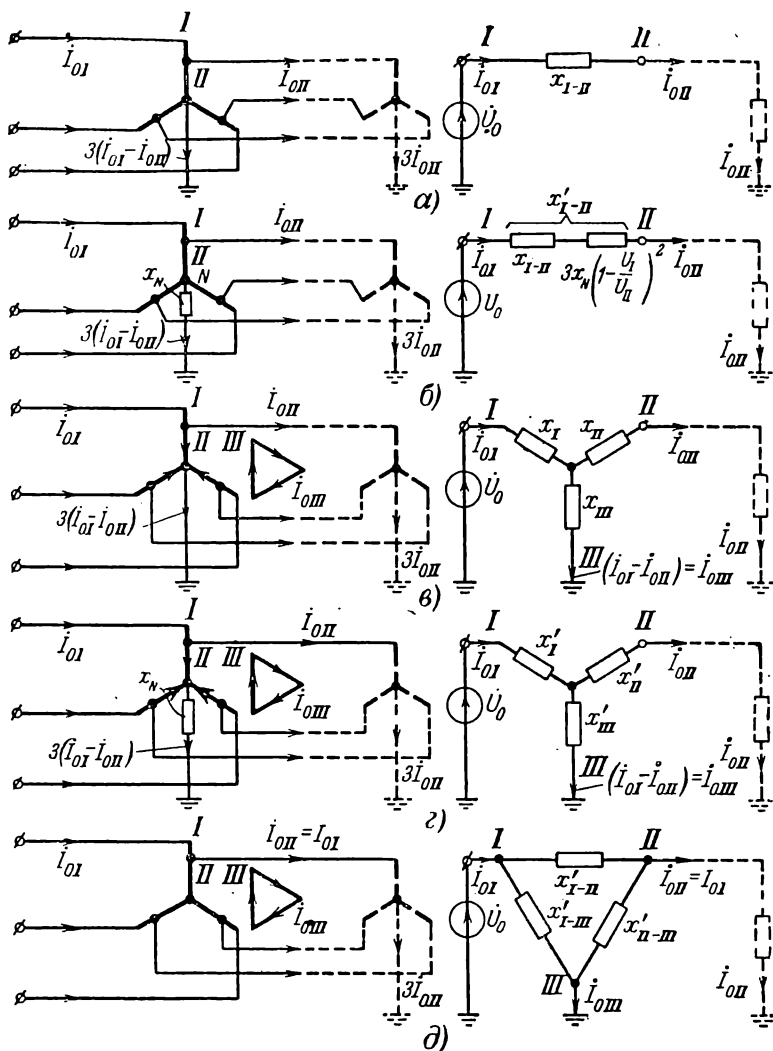


Рис. 13-7. Схемы замещения автотрансформаторов для токов нулевой последовательности.

следовательности, его схема замещения при пренебрежении током намагничивания и активными сопротивлениями представляется суммарной реактивностью рассея-

ния (рис. 13-7,а). При наличии третьей обмотки¹, соединенной треугольником, схема замещения имеет тот же вид, что и у трехобмоточного трансформатора при соответственном соединении его обмоток (рис. 13-7,в).

Нужно иметь в виду, что непосредственно из схемы замещения нулевой последовательности автотрансформатора нельзя получить ток, протекающий в его нейтрали. При указанных на рис. 13-7 направлениях токов искомый ток в нейтрали равен утроенной разности токов нулевой последовательности первичной и вторичной цепей [т. е. $\dot{I}_N = 3(\dot{I}_{0I} - \dot{I}_{0II})$], причем каждый из них должен быть отнесен к своей ступени напряжения, а не к какой-либо одной, для которой составлена схема замещения.

Представим себе теперь, что нейтраль автотрансформатора заземлена через индуктивное сопротивление x_N (рис. 13-7,б). Если напряжение на нейтрали U_N и напряжения выводов ступеней I и II относительно нейтрали соответственно U_{NI} и U_{NII} , то для результирующей реактивности нулевой последовательности между выводами ступеней I и II автотрансформатора, приведенной к ступени I, можно написать:

$$\begin{aligned} x'_{I-II} &= \frac{(U_{NI} + U_N) - (U_{NII} + U_N) \frac{U_I}{U_{II}}}{I_{0I}} = \\ &= \frac{U_{NI} - \dot{U}_{NII}}{I_{0I}} + \frac{U_N}{I_{0I}} \left(1 - \frac{U_I}{U_{II}} \right), \end{aligned}$$

или, поскольку

$$\frac{U_{NI} - \dot{U}_{NII}}{I_{0I}} = x_{I-II} - \text{реактивность рассеяния автотрансформатора, отнесенная к ступени I,}$$

и

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

окончательно

$$x'_{I-II} = x_{I-II} + 3x_N \left(1 - \frac{U_I}{U_{II}} \right)^2. \quad (13-21)$$

¹ Силовые автотрансформаторы, как правило, снабжены такой обмоткой.

Если реактивность относить к ступени II, то в (13-21) нужно поменять местами напряжения U_I и U_{II} . Данное выражение, разумеется, справедливо также и в том случае, когда реактивности представлены в относительных единицах, причем его запись предполагает, что реактивность x_N отнесена к базисному напряжению ступени I.

Аналогичным образом для автотрансформатора с третьей обмоткой, соединенной в треугольник (рис. 13-7,з), легко найти результирующие реактивности нулевой последовательности между другими парами его обмоток, также отнесенные к ступени I:

$$x'_{I-III} = x_{I-III} + 3x_N; \quad (13-22)$$

$$x'_{II-III} = x_{II-III} + 3x_N \left(\frac{U_I}{U_{II}} \right)^2. \quad (13-23)$$

Используя (13-21) — (13-23), по известным формулам для трехобмоточного трансформатора (см. приложение П-8) находим реактивности трехлучевой схемы замещения (рис. 13-7,з):

$$\left. \begin{aligned} x'_I &= 0,5 (x'_{I-II} + x'_{I-III} - x'_{II-III}) = x_I + 3x_N \left(1 - \frac{U_I}{U_{II}} \right); \\ x'_{II} &= 0,5 (x'_{I-II} + x'_{II-III} - x'_{I-III}) = \\ &= x_{II} + 3x_N \frac{(U_I - U_{II}) U_I}{U_{II}^2}; \\ x'_{III} &= 0,5 (x'_{I-III} + x'_{II-III} - x'_{I-II}) = x_{III} + 3x_N \frac{U_I}{U_{II}}. \end{aligned} \right\} \quad (13-24)$$

Еще раз напомним, что эти выражения дают значения реактивностей схемы замещения, отнесенных к ступени I. Чтобы отнести их к ступени II, очевидно, нужно каждое из них умножить на $\left(\frac{U_{II}}{U_I} \right)^2$. Это приводит к тому, что в коэффициентах при x_N в (13-24) индексы напряжений взаимно меняются; кроме того, меняются местами коэффициенты при x_N в x'_I и x'_{II} .

У автотрансформатора без третьей обмотки разземление нейтрали приводит к тому, что в схеме нулевой по-

следовательности такой автотрансформатор оказывается в режиме холостого хода; его ток намагничивания достаточно мал и им можно пренебречь, т. е. положить $x_{\mu 0} = \infty^*$.

Иные условия имеют место при разземлении нейтрали автотрансформатора, который снабжен третьей обмоткой, соединенной в треугольник (рис. 13-7, д). Здесь н. с., создаваемая током нулевой последовательности, протекающим из цепи I в цепь II (или обратно), компенсируется н. с. от наведенного тока в третьей обмотке.

При этих условиях ($x_N = \infty$) выражения (13-24) для реактивностей схемы замещения рис. 13-7, г приводят к неопределенности. Для раскрытия последней достаточно перейти от трехлучевой схемы замещения к эквивалентному треугольнику (рис. 13-7, д) и найти реактивности его сторон как пределы при $x_N \rightarrow \infty$, т. е.

$$\left. \begin{aligned} x'_{I-II} &= \lim_{x_N \rightarrow \infty} \left(x'_I + x'_{II} + \frac{x'_{II} x'_I}{x'_{III}} \right) = \left[x_I \frac{U_I}{U_{II}} + \right. \\ &\quad \left. + x_{II} \frac{U_{II}}{U_I} + x_{III} \frac{(U_I - U_{II})^2}{U_I U_{II}} \right] \frac{U_I^2}{U_{II}^2}; \\ x'_{I-III} &= \lim_{x_N \rightarrow \infty} \left(x'_I + x'_{III} + \frac{x'_I x'_{III}}{x'_{II}} \right) = \\ &= \left[x_I \frac{U_I}{U_I - U_{II}} + x_{II} \frac{U_{II}^2}{(U_I - U_{II}) U_I} + \right. \\ &\quad \left. + x_{III} \frac{(U_I - U_{II})}{U_I} \right] \frac{U_I^2}{U_{II}^2}; \\ x'_{II-III} &= \lim_{x_N \rightarrow \infty} \left(x'_{II} + x'_{III} + \frac{x'_{II} x'_{III}}{x'_I} \right) = \\ &= x_I \frac{U_I^2}{(U_{II} - U_I) U_{II}} + x_{II} \frac{U_{II}}{(U_{II} - U_I)} + \\ &\quad + x_{III} \frac{(U_{II} - U_I)}{U_{II}} \cdot \frac{U_I^2}{U_{II}^2}. \end{aligned} \right\} \quad (13-25)$$

* Трехфазные автотрансформаторы с трехстержневым магнитопроводом, как правило, не изготавливают.

Форма записи (13-25) показывает, что выражения в квадратных скобках дают значения тех же реактивностей, но приведенных к ступени II.

Интересно отметить, что сумма реактивностей сторон треугольника

$$x'_{I-II} + x'_{I-III} + x'_{II-III} = 0,$$

т. е. в данном случае схема замещения представлена так называемым «резонансным» треугольником.

Потенциал незаземленной нейтрали автотрансформатора нельзя получить непосредственно из схемы рис. 13-7, д. Однако поскольку токи I_{OI} , I_{OII} , I_{OIII} на основании этой схемы уже определены и напряжение U_{OII} (или U_{OI}) также известно, искомое напряжение U_N можно найти, используя схему рис. 13-7, в, т. е.

$$\dot{U}_N = \dot{U}_{OII} + \dot{I}_{OII} jx_{II} - \dot{I}_{OIII} jx_{III}. \quad (13-26)$$

Отметим, что нейтраль автотрансформатора в большинстве случаев заземляют наглухо, хотя иногда возможны и иные решения.

Пример 13-1. К автотрансформатору с параметрами 120 Мва, 220/121/111 кВ; $u_{BC}=10,6\%$; $u_{BH}=36,4\%$ и $u_{CH}=23\%$ со стороны 121 кВ присоединен источник напряжения нулевой последовательности с $U_0=10$ кВ (рис. 13-8). Его выводы 220 кВ наглухо заземлены.

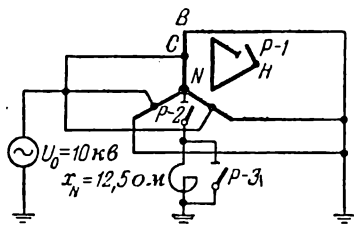


Рис. 13-8. К примеру 13-1.

Определить токи в цепях автотрансформатора и его нейтрали и потенциал последней при следующих условиях:

- Третья обмотка замкнута в треугольник, нейтраль заземлена наглухо (включены P-1, P-2 и P-3).
- Третья обмотка разомкнута, нейтраль заземлена наглухо (отключен P-1, включены P-2 и P-3).
- Третья обмотка замкнута в треугольник, нейтраль заземлена через реактивность $x_N=12,5$ ом (включены P-1 и P-2, отключен P-3).
- Третья обмотка замкнута в треугольник, нейтраль разземлена (включен P-1, отключен P-2).

Решение проводим в именованных единицах, приводя все величины к стороне 121 кВ.

Реактивности каждой пары обмоток будут:

$$x_{BC} = \frac{10,6}{100} \cdot \frac{121^2}{120} = 12,9 \text{ ом};$$

аналогично

$$x_{BH} = 44,3 \text{ ом и } x_{CH} = 28 \text{ ом}.$$

Реактивности трехлучевой схемы замещения (см. рис. 13-7, в) по выражениям П-8:

$$x_B = 0,5(12,9 + 44,3 - 28) = 14,6 \text{ ом}; \text{ аналогично } x_C = -1,7 \text{ ом} \\ \text{и } x_H = 29,7 \text{ ом}.$$

а) При включенных $P-1$, $P-2$ и $P-3$ результирующая реактивность

$$x_{\Sigma} = (14,6 // 29,7) - 1,7 = 8,1 \text{ ом}.$$

Ток в цепи 121 кв

$$I_0 = \frac{10\,000}{8,1} = 1\,230 \text{ а}.$$

Ток в цепи 220 кв

$$I_0 = 1\,230 \frac{29,7}{14,6 + 29,7} \cdot \frac{121}{220} = 455 \text{ а}.$$

Ток в нейтрали

$$I_N = 3(1\,230 - 455) = 2\,325 \text{ а}.$$

Ток в фазных обмотках, соединенных в треугольник,

$$I_0 = 1\,230 \frac{14,6}{14,6 + 29,7} \cdot \frac{121}{\sqrt{3} \cdot 11} = 2\,570 \text{ а}.$$

Распределение токов для рассматриваемого случая показано на рис. 13-9, а.

б) При разомкнутом треугольнике имеем условия схемы рис. 13-7, а.

Ток в цепи 121 кв

$$I_0 = \frac{10\,000}{12,9} = 775 \text{ а},$$

и ток в цепи 220 кв

$$I_0 = 775 \frac{121}{220} = 425 \text{ а}.$$

Ток в нейтрали $I_N = 3(775 - 425) = 1\,050 \text{ а}$ (рис. 13-9, б).

в) При заземлении нейтрали через $x = 12,5$ ом реактивности схемы замещения рис. 13-7,2 находим по (13-24) с пересчетом к ступени II, т. е.

$$x'_B = 14,6 + 3 \cdot 12,5 \frac{(121 - 220) \cdot 121}{220^2} = 5,3 \text{ ом};$$

$$x'_C = -1,7 + 3 \cdot 12,5 \frac{(220 - 121)}{121} = 29 \text{ ом};$$

$$x'_H = 29,7 + 3 \cdot 12,5 \frac{121}{220} = 50,3 \text{ ом}.$$

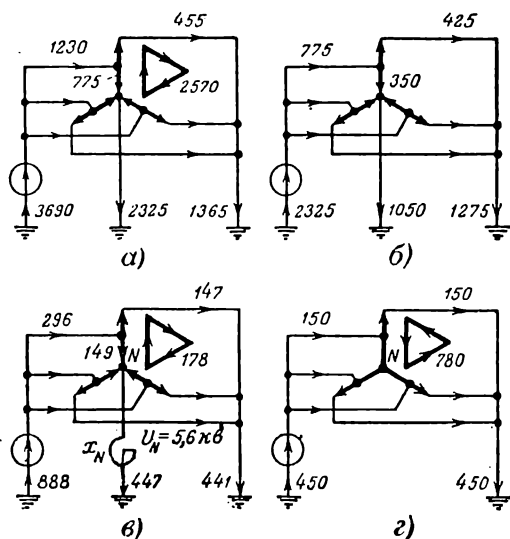


Рис. 13-9. К примеру 13-1. Распределение токов нулевой последовательности.

Результирующая реактивность схемы

$$x_{\Sigma} = (50,3 // 5,3) + 29 = 33,8 \text{ ом}.$$

Ток в цепи 121 кВ

$$I_0 = \frac{10\,000}{33,8} = 296 \text{ а};$$

ток в цепи 220 кВ

$$I_0 = 296 \frac{50,3}{55,6} \cdot \frac{121}{220} = 147 \text{ а};$$

ток в нейтрали

$$I_N = 3(296 - 147) = 447 \text{ а};$$

ток в фазных обмотках треугольника

$$I_0 = 296 \frac{5,3}{55,6} \cdot \frac{121}{\sqrt{3} \cdot 11} = 178 \text{ а.}$$

Потенциал нейтрали $U_N = 12,5 \cdot 447 = 5600 \text{ в}$ (рис. 13-9, в).

г) При разземленной нейтрали используем схему замещения рис. 13-7, д, реактивности¹ которой согласно (13-25) будут:

$$x'_{BC} = 14,6 \frac{220}{121} - 1,7 \frac{121}{220} + 29,7 \frac{(121 - 220)^2}{121 \cdot 220} = 36,6 \text{ ом;}$$

$$x'_{BH} = 14,6 \frac{220}{220 - 121} - 1,7 \frac{121^2}{(220 - 121) \cdot 220} + \\ + 29,7 \frac{(220 - 121)}{220} = 44,6 \text{ ом;}$$

$$x'_{CH} = 14,6 \frac{220^2}{121(121 - 220)} - 1,7 \frac{121}{(121 - 220)} + \\ + 29,7 \frac{(121 - 220)}{121} = -81,2 \text{ ом.}$$

Поскольку потенциалы вершин В и Н найденного треугольника по условию равны нулю, результирующая реактивность относительно вершины С составляет

$$x_{\Sigma} = \frac{36,6(-81,2)}{36,6 - 81,2} = 66,6 \text{ ом.}$$

Следовательно, ток в цепи 121 кВ

$$I_0 = \frac{10000}{66,6} = 150 \text{ а.}$$

Ток в ветви x'_{BC} , приведенный к 121 кВ,

$$I_0^{\circ} = 150 \frac{66,6}{36,6} = 273 \text{ а,}$$

а приведенный к 220 кВ $I_0 = 273 \frac{121}{220} = 150 \text{ а}$, т. е. тот же, что и в цепи 121 кВ, как и нужно было ожидать, коль скоро нейтраль автотрансформатора разземлена.

Ток в третьей обмотке, также приведенный к 121 кВ, составляет

$$I_0^{\circ} = \frac{10000}{-81,2} = -123 \text{ а,}$$

¹ Приведенные к стороне 121 кВ.

а его истинная величина

$$I_0 = -123 \frac{121}{\sqrt{3} \cdot 11} = -780 \text{ а.}$$

Потенциал нейтрали в данном случае будет

$$U_N = 14,6 \cdot 273 - 29,7 (-123) = 7\,640 \text{ в.}$$

Нетрудно убедиться, что в автотрансформаторе баланс н. с. при данном режиме соблюдается, т. е.

$$150 \frac{(220 - 121)}{\sqrt{3}} + (-780) \cdot 11 = 0$$

(здесь числа витков обмоток заменены соответствующими напряжениями холостого хода).

Распределение токов для рассматриваемого случая приведено на рис. 13-9,2.

13-8. ВОЗДУШНЫЕ ЛИНИИ

Ток нулевой последовательности воздушной линии возвращается через землю и по заземленным цепям, расположенным параллельно данной линии (защитные тросы, рельсовые пути вдоль линии и пр.)¹. Поскольку система токов нулевой последовательности не уравновешена (сумма фазных токов не равна нулю), создаваемый ею магнитный поток наводит в контурах, расположенных вблизи линии, э. д. с., которые вызывают в них компенсирующие токи. При этих условиях сопротивление линии существенно отличается от ее сопротивления прямой (или обратной) последовательности.

Главная трудность достоверного определения сопротивления нулевой последовательности воздушной линии связана с учетом распределения тока в земле; точное нахождение последнего в общем виде представляет собой весьма сложную проблему. Для ее решения проводились многочисленные теоретические и экспериментальные исследования [Л. 93—Л. 98]. Достаточно полное и строгое решение в предположении постоянства электрической проводимости земли и неограниченности ее размеров выполнено Карсоном [Л. 95]. Установленные на основании его выводов приближенные формулы позво-

¹ Дополнительные пути циркуляции токов нулевой последовательности часто имеют место при продольной несимметрии (см. § 14-4).

ляют с достаточной для практики точностью (что неоднократно подтверждалось опытными данными) вычислить отдельные составляющие и полное сопротивление нулевой последовательности воздушной линии при токах промышленных частот и реальных значениях проводимости земли. Эти формулы с краткими пояснениями к ним приведены ниже, причем их окончательный вид дан для частоты $f=50$ гц.

Как показали проведенные исследования, распределение переменного тока в земле выражается сложной закономерностью, аналогичной закономерности распределения тока в массивных проводниках.

Рассмотрим сначала однопроводную линию переменного тока, обратным проводником которой служит земля (рис. 13-10), или, как ее называют иначе, линию «провод—земля». Характер изменения плотности тока в земле по мере удаления в стороны от вертикальной плоскости, в которой расположен проводник, и по мере углубления в землю иллюстрируют кривые, показанные на рис. 13-10. Ток в земле как бы подтягивается к проводнику. Его наибольшая плотность имеет место на поверхности земли непосредственно под самим проводником. Чем больше проводимость земли, тем больше плотность тока под проводником, т. е. тем меньший объем земли участвует в проведении тока. Если бы земля обладала бесконечно большой проводимостью, то весь ток возвращался бы только по ее поверхности.

Индуктивность линии «провод—земля» может быть получена как индуктивность эквивалентной двухпроводной линии с расстоянием между проводами D_3 (рис. 13-10)*. Это расстояние, называемое эквивалентной глубиной возврата тока через землю, зависит от проводимости земли λ и частоты

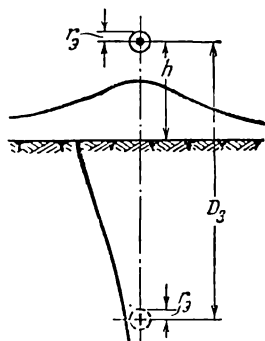


Рис. 13-10. Однопроводная линия «провод—земля».

* См., например, [Л. 12, 98].

тока f . По Карсону оно может быть найдено из выражения¹

$$D_3 = \frac{2,085}{\sqrt{f\lambda \cdot 10^{-9}}} \cdot 10^{-3}, \text{ м}, \quad (13-27)$$

где f — в гц и λ — в $\frac{1}{\text{ом} \cdot \text{см}}$.

Значения D_3 для различных λ при $f=50$ гц таковы:

Среда	$\lambda, \frac{1}{\text{ом} \cdot \text{см}}$	$D_3, \text{ м}$
Сухая земля	10^{-5}	3 000
Сырая земля	10^{-4}	935
Морская вода	10^{-2}	94

При отсутствии данных о проводимости земли в качестве среднего значения D_3 обычно принимают (с округлением) $D_3=1\,000$ м. Поскольку D_3 значительно больше высоты подвеса провода h , изменение последней практически не играет никакой роли.

Таким образом, реактивность линии «провод—земля» легко определить по известной формуле для двухпроводной линии:

$$x_L = 0,145 \lg \frac{D_3}{r_0}, \text{ ом/км}, \quad (13-28)$$

где r_0 — эквивалентный радиус провода, значения которого составляют:

Для сплошных круглых проводников из немагнитного материала	$r_0 = 0,779r$
Для витых медных проводников в зависимости от числа прядей	$r_0 = (0,724 \div 0,771)r$
Для алюминиевых и сталслюдиевых проводов марок А, АС, АСО, АСУ	$r_0 = 0,95r$

$$\text{Для стальных проводов марок Ж, ПС, ТК} \dots r_0 = \frac{r}{\text{antilg} \frac{x_{\text{внутр}}}{0,145}}$$

здесь r — истинный радиус провода.

¹ Это выражение является приближенным и пригодно лишь при промышленных частотах тока и конечных значениях проводимости земли λ (в частности, в пределе, при $\lambda=\infty$, должно быть $D_3=2h$, в то время как по (13-27) $D_3=0$).

Получаемое в соответствии с выводами Р. Рюденберга выражение отличается от (13-27) только коэффициентом (1,78 вместо 2,085) и практически приводит к тем же результатам.

Заменой истинного радиуса провода r эквивалентным r_3 по существу вводится учет той части магнитного потока, которая замыкается внутри самого проводника. Для стальных проводов реактивность $x_{\text{внутр}}$ (ом/км) находят по соответствующей кривой приложения П-9 и далее используют при нахождении r_3 по приведенной формуле или непосредственно прибавляют к реактивности, найденной по (13-28) при $r_3=r$.

Для линии с расщепленными проводами в (13-28) вместо r_3 следует вводить средний геометрический радиус $r_{\text{ср}}$ системы проводов одной фазы, который находят из выражения

$$r_{\text{ср}} = \sqrt[n]{r_3 a_{\text{ср}}^{n-1}},$$

где n — число проводов в фазе;

$a_{\text{ср}}$ — среднее геометрическое расстояние между проводами одной фазы.

Все линейные величины, входящие под знак логарифма в (13-28) и дальнейших формулах, должны быть выражены в одних и тех же (вообще говоря, произвольных) единицах.

Активное сопротивление линии «провод — земля» складывается из активного сопротивления провода $r_{\text{п}}$ и дополнительного сопротивления r_3 , учитывающего потерю активной мощности в земле от протекающего в ней тока, т. е.

$$r = r_{\text{п}} + r_3. \quad (13-29)$$

Сопротивление r_3 может быть определено из приближенного выражения

$$r_3 = \pi^2 f \cdot 10^{-4}, \text{ ом/км}, \quad (13-30)$$

которое при $f=50$ гц дает $r_3=0,05$ ом/км.

Следует обратить внимание, что величина r_3 практически не зависит от проводимости земли. Этот на первый взгляд парадоксальный вывод объясняется тем, что с изменением проводимости земли, как указывалось выше, плотность тока в ней меняется; при этом потери активной мощности при заданной частоте тока остаются почти постоянными. Линейная зависимость r_3 от частоты f вы-

звана соответствующим проявлением поверхностного эффекта земли.

Сопротивление, обусловленное взаимной индукцией между двумя параллельными линиями «провод — земля» с расстоянием d между осями их проводов, если оно значительно меньше величины D_3 , можно определить из выражения

$$Z_M = r_3 + jx_M = 0,05 + j0,145 \lg \frac{D_3}{d}, \text{ ом/км}, \quad (13-31)$$

где активная составляющая соответствует потере активной мощности, возникающей от протекания тока в земле.

Для трехфазной одноцепной линии с полным циклом транспозиции проводов сопротивление взаимной индукции между фазами при возврате тока через землю, очевидно, следует определять, исходя из среднего геометрического расстояния между проводами фаз a , b и c $D_{\text{ср}} = \sqrt[3]{d_{ab}d_{ac}d_{bc}}$, т. е.

$$Z_{M\text{ср}} = 0,05 + j0,145 \lg \frac{D_3}{D_{\text{ср}}}, \text{ ом/км}. \quad (13-32)$$

Теперь, зная Z_L и $Z_{M\text{ср}}$, нетрудно найти сопротивление нулевой последовательности трехфазной одноцепной линии. Оно численно равно эффективному значению напряжения, которое должно быть приложено к проводу данной линии, чтобы покрыть падение напряжения в нем при протекании в фазах тока нулевой последовательности с эффективным значением 1 а ($I_a = I_b = I_c = 1$ а), т. е.

$$Z_0 = Z_L + Z_{M\text{ср}} + Z_{M\text{ср}} = Z_L + 2Z_{M\text{ср}}, \quad (13-33)$$

или после подстановки (13-28), (13-29), (13-30) и (13-32) и преобразования

$$\begin{aligned} Z_0 &= r_{\Pi} + 0,15 + j0,435 \lg \frac{D_3}{\sqrt[3]{r_3 D_{\text{ср}}^2}} = \\ &= r_{\Pi} + 0,15 + j0,435 \lg \frac{D_3}{R_{\text{ср}}}, \text{ ом/км}, \end{aligned} \quad (13-34)$$

где $\sqrt[3]{r_3 D_{\text{ср}}^2} = R_{\text{ср}}$ — средний геометрический радиус системы трех проводов линии.

Здесь уместно заметить, что если по линии протекает система токов прямой последовательности (т. е. $I_a=1$; $I_b=a^2$; $I_c=a$), то сопротивление провода будет

$$Z_1 = Z_L + a^2 Z_{\text{мср}} + a Z_{\text{мср}} = Z_L - Z_{\text{мср}}, \quad (13-35)$$

или после подстановки и преобразования

$$Z_1 = r_{\Pi} + j0,145 \lg \frac{D_{\text{ср}}}{r_0}, \quad \text{ом/км.} \quad (13-36)$$

Возможность представления трехфазной линии при протекании по ней симметричной уравновешенной системы токов тремя линиями «провод—земля» вытекает из того, что результирующее влияние фиктивных обратных проводов этих линий практически отсутствует, так как сумма токов в этих проводах равна нулю.

Из (13-33) и (13-35) непосредственно следует, чем вызвано различие между Z_1 и Z_0 линии. В то время как при токах прямой (или обратной) последовательности взаимоиנדукции с другими фазами уменьшает сопротивление фазы, при токах нулевой последовательности она, напротив, увеличивает его. Поскольку значения Z_L и $Z_{\text{мср}}$ у линий соизмеримы, их величины Z_1 и Z_0 резко различаются между собой.

Сопротивление нулевой последовательности каждой цепи двухцепной линии дополнительно увеличивается¹ благодаря взаимоиנדукции от проводов параллельной цепи. Сопротивление взаимоиנדукции между проводом одной цепи и тремя проводами другой цепи (имея в виду, что обе цепи выполнены с полным циклом транспозиции проводов) может быть определено по (13-32), где обе составляющие должны быть увеличены в 3 раза и вместо $D_{\text{ср}}$ введено среднее геометрическое расстояние между рассматриваемыми цепями I и II, равное корню девятой степени из произведения девяти расстояний от каждого провода (a, b и c) одной цепи до каждого провода (a', b', c') другой цепи:

$$D_{\text{I-II}} = \sqrt[9]{d_{aa'} d_{ab'} d_{ac'} d_{ba'} d_{bb'} d_{bc'} d_{ca'} d_{cb'} d_{cc'}}, \quad (13-37)$$

т. е.

$$Z_{\text{I-II}} = 0,15 + j0,435 \lg \frac{D_3}{D_{\text{I-II}}}, \quad \text{ом/км.} \quad (13-38)$$

¹ При протекании токов в обеих цепях в одну сторону.

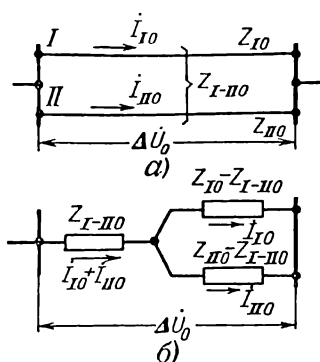


Рис. 13-11. Двухцепная линия передачи.

а — исходная схема; б — схема замещения нулевой последовательности.

Следовательно, сопротивление нулевой последовательности двухцепной линии, считая в общем случае цепи неодинаковыми, определяют из известной схемы замещения двух магнитно связанных цепей, как показано на рис. 13-11. Здесь реактивные части сопротивлений параллельных ветвей отвечают реактивностям рассеяния нулевой последовательности соответственно цепей I и II.

При идентичности параллельных цепей ($Z_{I0} = Z_{II0} = Z_0$) сопротивление нулевой последовательности каждой из них, очевидно, будет

$$Z'_0 = Z_0 + Z_{I-II0} \quad (13-39)$$

и их результирующее сопротивление (т. е. сопротивление на фазу двухцепной линии)

$$Z''_0 = 0,5Z'_0 = 0,5(Z_0 + Z_{I-II0}). \quad (13-40)$$

Чтобы иметь представление о количественном влиянии взаимной индукции от параллельной цепи, на рис. 13-12 приведена кривая изменения отношения реактивностей x'_0/x_0 в функции расстояния между осями цепей D (верхняя часть кривой соответствует верхней шкале оси абсцисс, нижняя — соответственно нижней шкале). Как видно, влияние взаимной индукции сказывается весьма существенно и лишь при $D \geq 500$ м становится менее заметным: увеличение сопротивления не превышает 10%, что позволяет им тогда пренебрегать. Следует также отметить, что определение Z_{I-II0} по (13-38) обеспечивает достаточную точность (ошибка в пределах 10%) при $D_s \leq 400 \div 500$ м.

Рассмотрим теперь, как влияют тросы, которые часто используют в качестве средства грозозащиты линии, на параметры воздушной линии. Тросы располагают в верхней точке опоры линии и до последнего времени, как правило, заземляли практически на каждой опоре. Таким образом, в пределах каждого пролета на протяжении всего участка, где подвешены тросы, при такой системе

их заземления образуются замкнутые контуры, в которых возможно протекание наведенных токов.

Когда по линии протекает уравновешенная система токов, возникающий вокруг проводов магнитный поток достаточно мал и его часть, сцепляющаяся с тросами,

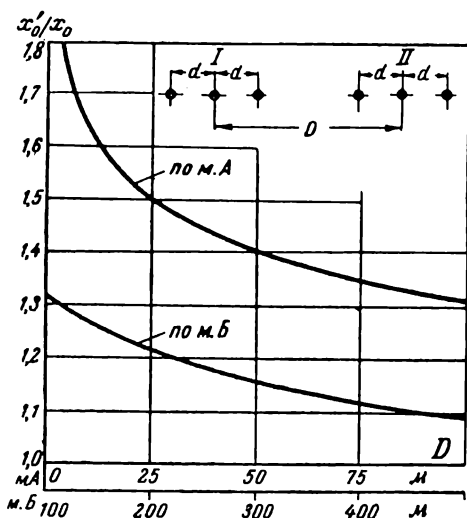


Рис. 13-12. Изменение реактивности нулевой последовательности одной цепи двухцепной линии в зависимости от расстояния между цепями.

вызывает в них незначительный ток. Поэтому сопротивление Z_1 (и Z_2) линии практически не зависит от того, имеются ли у нее тросы или их нет.

Иная картина имеет место при протекании по линии токов нулевой последовательности. Здесь благодаря совпадению по фазе токов в проводах линии образуется большой общий магнитный поток, который может вызвать в тросах уже значительный ток. Его ответная реакция существенно изменяет величины параметров нулевой последовательности линии.

В последнее время для линий (преимущественно большой протяженности) стали применять другую систему заземления защитных тросов, при которой сохраняются их защитные свойства, но в то же время исключается возможность непрерывной циркуляции токов

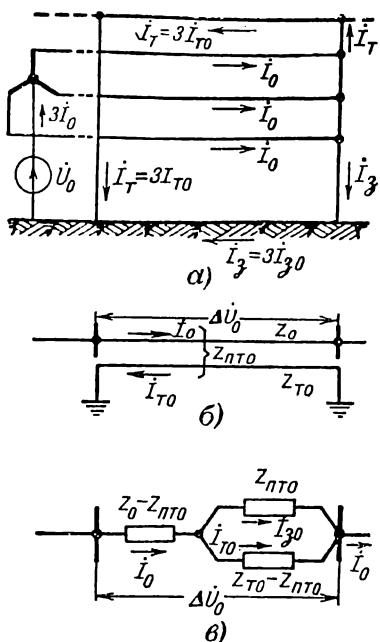


Рис. 13-13. Одноцепная линия с тросом.

а — исходная схема; б — исходная однолинейная схема; в — схема замещения нулевой последовательности.

альной схеме рис. 13-13,а, где показаны одноцепная трехфазная линия с одним заземленным тросом и путь циркуляции токов нулевой последовательности для рассматриваемого случая.

Сумма токов в тросе $\vec{I}_T$ и земле $\vec{I}_3$ образует ток в нейтрали, равный утроенному току нулевой последовательности в фазе линии. Соответственно этому токи нулевой последовательности в тросе и земле составляют $1/3$ своих действительных значений, т. е.

$$\vec{I}_{T0} = \frac{1}{3} \vec{I}_T$$

¹ С тем чтобы в нормальных условиях исключить потери в тросах от наведенных токов.

и

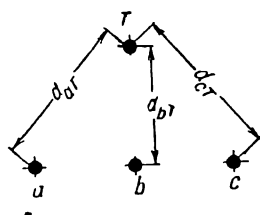
$$I_{\text{с0}} = \frac{1}{3} I_{\text{з}}.$$

Рассматривая трос как независимую однопроводную линию «провод — земля», его реактивное и активное сопротивления можно определить из (13-28) и (13-29). Сопротивление нулевой последовательности троса, очевидно, составляет

$$Z_{\text{т0}} = 3Z_{\text{т}} = 3(r_{\text{т}} + r_{\text{з}}) + j3x_{\text{т}}, \quad (13-41)$$

так как оно должно быть определено, исходя из суммы токов нулевой последовательности в фазах линии, которая в 3 раза больше тока в одной фазе.

Рис. 13-14. Пример расположения проводов и троса линии.



В развернутом виде (13-41) при $f=50$ гц будет

$$Z_{\text{т0}} = 3r_{\text{т}} + 0,15 + j0,435 \lg \frac{D_{\text{з}}}{r_{\text{зТ}}}, \text{ ом/км}, \quad (13-42)$$

где $r_{\text{т}}$ — активное сопротивление троса;

$r_{\text{зТ}}$ — эквивалентный радиус троса.

Аналогично (13-38) сопротивление взаимной индукции нулевой последовательности между проводом линии и тросом будет

$$Z_{\text{пт0}} = 0,15 + j0,435 \lg \frac{D_{\text{з}}}{D_{\text{пт}}}, \text{ ом/км}, \quad (13-43)$$

где $D_{\text{пт}} = \sqrt[3]{d_{\text{аТ}} d_{\text{бТ}} d_{\text{сТ}}}$ — среднее геометрическое расстояние между проводами и тросом (рис. 13-14).

Зная Z_0 , $Z_{\text{т0}}$ и $Z_{\text{пт0}}$, нетрудно от схемы с магнитной связью между цепями (рис. 13-13,б) перейти к известной схеме замещения (рис. 13-13,в), результирующее сопротивление которой дает искомое сопротивление нулевой

последовательности линии с учетом заземленных тросов, т. е.

$$Z_0^{(T)} = Z_0 - \frac{Z_{\Pi T_0}^2}{Z_{T_0}}. \quad (13-44)$$

При нескольких заземленных тросах сопротивление нулевой последовательности линии можно определить, заменяя заданное число p тросов одним эквивалентным, имеющим средний геометрический радиус

$$R_{срТ} = \sqrt[p]{r_{эТ} D_{срТ}^{p-1}}, \quad (13-45)$$

где $r_{эТ}$ — эквивалентный радиус троса;

$D_{срТ}$ — среднее геометрическое расстояние между тросами, равное

$$D_{срТ} = \sqrt[\frac{(p-1)p}{2}]{\text{произведение возможных различных расстояний между тросами}},$$

и расположенным относительно проводов линии на среднем геометрическом расстоянии

$$D_{\Pi T} = \sqrt[3p]{\text{произведение расстояний от каждого провода до каждого троса}}. \quad (13-46)$$

Соответственно этому сопротивление нулевой последовательности такого троса аналогично (13-42) будет

$$Z_{T_0} = 3 \frac{r_T}{p} + 0,15 + j0,435 \lg \frac{D_a}{R_{срТ}}, \text{ ом/км}, \quad (13-47)$$

а сопротивление взаимной индукции нулевой последовательности между ним и проводами линии определяется по (13-43), где значение $D_{\Pi T}$ должно быть принято по (13-46).

Полученные величины Z_{T_0} и $Z_{\Pi T_0}$ далее следует ввести в схему замещения рис. 13-13,8 или непосредственно в (13-44) для нахождения искомого значения сопротивления $Z_0^{(T)}$ линии.

Заземленные тросы являются как бы короткозамкнутой вторичной обмоткой воздушного трансформатора,

первичной обмоткой которого служат провода линии, что также следует из рис. 13-13,в.

Токи, возвращающиеся по тросам данной линии и через землю, находятся в постоянном соотношении

$$\frac{I_T}{I_3} = \frac{Z_{\text{пто}}}{Z_{T0} - Z_{\text{пто}}} \quad (13-48)$$

и каждый из них составляет соответствующую долю суммы фазных токов нулевой последовательности линии, т. е.

$$I_T = 3I_{T0} = 3I_0 \frac{Z_{\text{пто}}}{Z_{T0}} \quad (13-49)$$

и

$$I_3 = 3I_{30} = 3I_0 \left(1 - \frac{Z_{\text{пто}}}{Z_{T0}} \right). \quad (13-50)$$

Учет тросов для двухцепной линии несколько сложнее. Если обе цепи линии (в общем случае неодинаковые) расположены на общих опорах (см., например, рис. 13-18), то такую линию можно рассматривать состоящей из системы проводов одной цепи, системы проводов другой цепи и системы тросов. Пользуясь приведенными выше выражениями, легко определить для каждой из этих систем ее сопротивление нулевой последовательности (т. е. Z_{I0} , Z_{II0} , Z_{T0}) и сопротивления взаимной индукции нулевой последовательности между каждой парой систем (т. е. Z_{I-II0} , Z_{I-T0} , Z_{II-T0}). Следовательно, исходная схема в данном случае может быть представлена, как показано на рис. 13-15,а.

Уравнение для контура заземленного троса

$$\Delta \dot{U}_{T0} = Z_{T0} \dot{I}_{T0} - Z_{I-T0} \dot{I}_{I0} - Z_{II-T0} \dot{I}_{II0} = 0$$

позволяет выразить ток $\dot{I}_{T0}$ через токи $\dot{I}_{I0}$ и $\dot{I}_{II0}$ и свести исходную задачу к задаче с двумя магнитносвязанными цепями I и II при отсутствии тросов. При этом схема замещения таких цепей (рис. 13-15,б), разумеется, сохраняет тот же вид, что и на рис. 13-11,б, но сопротивления

ее ветвей должны быть определены с учетом тросов, т. е.

$$Z_{I0}^{(T)} = Z_{I0} - \frac{Z_{I-T0}^2}{Z_{T0}}; \quad (13-51)$$

$$Z_{II0}^{(T)} = Z_{II0} - \frac{Z_{II-T0}^2}{Z_{T0}}; \quad (13-52)$$

$$Z_{I-II0}^{(T)} = Z_{I-II0} - \frac{Z_{I-T0} Z_{II-T0}}{Z_{T0}}. \quad (13-53)$$

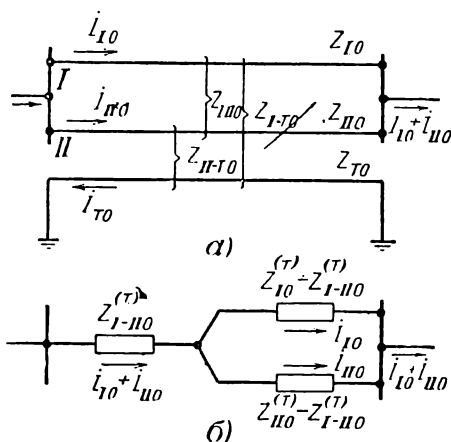


Рис. 13-15. Двухцепная линия с тросами.

а — исходная схема; б — схема замещения нулевой последовательности.

При расположении цепей линии на разных опорах замена всех тросов одним эквивалентным вносит заметную погрешность. Поэтому здесь приходится рассматривать уже четыре магнитносвязанные системы, т. е. отдельно провода и тросы одной и другой цепей. Решение при этом, естественно, оказывается более сложным, и выражения для искомых сопротивлений получаются достаточно громоздкими. Так, для двух одинаковых параллельных линий с тросами имеем [Л. 29]:

$$Z_0^{(T)} = Z_0 - \frac{(Z_{ПТ0}^2 + Z_{ПТ0}'^2) Z_{Т0} - 2 Z_{ПТ0} Z_{ПТ0}' Z_{Т0}}{Z_{Т0}^2 - Z_{ТТ0}^2}; \quad (13-54)$$

$$Z_{I-II0}^{(T)} = Z_{I-II0} - \frac{2Z_{\Pi T0}Z'_{\Pi T0}Z_{T0} - (Z_{\Pi T0}^2 + Z_{\Pi T0}'^2)Z_{TT0}}{Z_{T0}^2 - Z_{TT0}^2}, \quad (13-55)$$

где дополнительно участвующие обозначения указывают:
 Z_{TT0} — сопротивление взаимной индукции нулевой последовательности между тросами одной и другой цепей без учета влияния проводов линии;
 $Z'_{\Pi T0}$ — сопротивление взаимной индукции нулевой последовательности между проводами одной цепи и тросами другой цепи.

Чтобы нагляднее представить себе влияние тросов на сопротивление нулевой последовательности линии, запишем в (13-44) сопротивления Z_0 , Z_{T0} , $Z_{\Pi T0}$ в показанной форме с аргументами соответственно φ_0 , φ_{T0} , $\varphi_{\Pi T0}$, т. е.

$$Z_0^{(T)} = z_0 e^{j\varphi_0} - \frac{z_{\Pi T0}^2}{z_{T0}} e^{j\psi}, \quad (13-56)$$

где $\psi = (2\varphi_{\Pi T0} - \varphi_{T0})$, и выразим это соотношение диаграммой (рис. 13-16).

Значения указанных аргументов обычно находятся в следующих пределах:

При проводниках из цветных металлов $\varphi_0 = 75 \div 80^\circ$
 При стальных проводниках $\varphi_{T0} = 30 \div 45^\circ$
 При расстоянии $D_{\Pi T} \leq 100$ м $\varphi_{\Pi T0} = 70 \div 80^\circ$

Коль скоро в действительности $\psi < 180^\circ$, то, как видно по рис. 13-16, тросы всегда снижают индуктивное сопротивление нулевой последовательности линии (это также непосредственно следует из самой роли тросов). Что касается их влияния на активное сопротивление нулевой последовательности линии, то здесь нельзя дать однозначный ответ. В самом деле, как следует из рис. 13-16, при

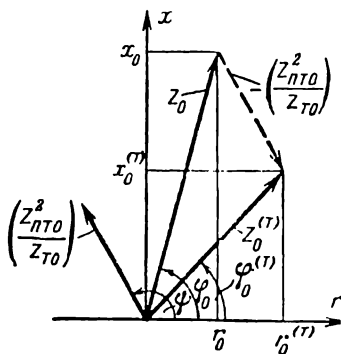


Рис. 13-16. Диаграмма сопротивления нулевой последовательности линии с тросом.

$\psi > 90^\circ$, что имеет место при тросах с большим активным сопротивлением, сопротивление r_0 возрастает; при $\psi < 90^\circ$, что имеет место при тросах с малым активным сопротивлением, r_0 , напротив, снижается; наконец, в частном случае, при $\psi = 90^\circ$ оно остается тем же, что и при отсутствии тросов.

Чем больше у линии тросов и чем ближе они к проводам, тем соответственно больший ток возвращается по тросам и тем сильнее проявляется их влияние. Особенно сильно это сказывается при тросах из хорошо проводящего материала (провода марок М, АС, АСУ и пр.). Так, для рассмотренного ниже примера 13-2 при расположении проводов и тросов по рис. 13-18 и $D_3 = 1580$ мм для двухцепной линии 110 кВ с проводами АС-150 имеем:

Без тросов . . $Z_0 = 0,255 + j1,280 = 1,30 \angle 79^\circ$ ом/км двух цепей

С двумя тросами ТК-70 . . $Z_0 = 0,387 + j1,123 = 1,19 \angle 71^\circ$ ом/км двух цепей

С двумя тросами АС-150 $Z_0 = 0,240 + j0,665 = 0,70 \angle 70^\circ$ ом/км двух цепей

т. е. тросы ТК-70 увеличивают r_0 на 53% и снижают x_0 на 14,3%; тросы из провода АС-150 снижают r_0 на 5,9% и x_0 на 48%.

Для грозозащиты воздушных линий применяют, как правило, стальные тросы. Применение тросов из хорошо проводящих металлов является исключением, вызванным рядом специальных причин¹.

В большинстве практических расчетов коротких замыканий активным сопротивлением линий обычно пренебрегают. Однако для линий со стальными тросами это допущение при оценке сопротивления нулевой последовательности приводит к заметной погрешности, так как величина индуктивного сопротивления нулевой последовательности линии существенно зависит от активного сопротивления тросов. Так, если в указанном выше примере пренебречь активным сопротивлением стальных тросов, то $x_0 = 0,902$ ом/км вместо $x_0 = 1,123$ ом/км, т. е. меньше на 19,7%. Если же совсем пренебречь влиянием этих тросов, то $x_0 = 1,28$ ом/км, т. е. эта реактивность преувеличена против действительности на 14,3%. Здесь

¹ Такие тросы ранее использовались, в частности, как одно из средств борьбы с опасным влиянием линий передачи на проходящие вблизи них линии слабого тока (связь, сигнализация и т. п.).

следует отметить, что при пренебрежении активным сопротивлением стальных тросов значение x_0 получилось большим, чем при тросах АС-150 с учетом их активного сопротивления. Это обусловлено тем, что за счет значительного внутреннего индуктивного сопротивления стальных тросов их собственное индуктивное сопротивление почти в 2 раза больше, чем тросов АС-150.

Достаточно надежное значение реактивности нулевой последовательности линии со стальными тросами можно получить лишь как мнимую часть ее полного сопротивления нулевой последовательности. При этом нужно иметь в виду, что активное и внутреннее индуктивное сопротивления стального троса должны быть приняты по соответствующим кривым (П-9) для данной марки материала троса. В среднем можно считать, что стальные тросы уменьшают реактивность нулевой последовательности линии примерно на 10—15%.

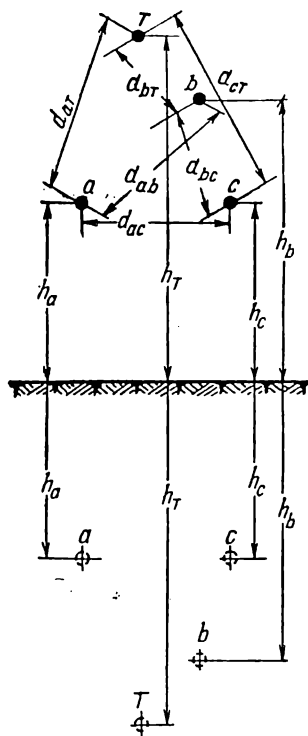


Рис. 13-17. К определению емкостного сопротивления воздушной линии.

Таблица 13-4

Средние значения соотношений между x_0 и x_1 для воздушных линий передачи

Характеристика линии	Отношение x_0/x_1
Одноцепная линия без тросов	3,5
То же со стальными тросами	3,0
„ „ с хорошо проводящими тросами	2,0
Двухцепная линия без тросов	5,5
То же со стальными тросами	4,7
„ „ с хорошо проводящими тросами	3,0

В приближенных расчетах в качестве средних значений соотношений между x_0 и x_1 для воздушных линий можно принимать значения, приведенные в табл. 13-4.

В приложении П-10 приведены величины индуктивных сопротивлений прямой и нулевой последовательностей для ряда типовых линий 35—500 кВ.

Реактивное емкостное сопротивление 1 км воздушной линии определяется по следующим выражениям [Л. 12, 13]:

для прямой (обратной) последовательности¹

$$x_{c1} = 132 \left(\lg \frac{D_{cp}}{r} \right) \cdot 10^3, \text{ ом}, \quad (13-57)$$

где r — радиус провода;

D_{cp} — среднее геометрическое расстояние между проводами фаз a , b и c [то же, что в (13-32)];

для нулевой последовательности

$$x_{c0} = 396 \left(\lg \frac{D_i}{R'_{cp}} \right) \cdot 10^3, \text{ ом}, \quad (13-58)$$

где R'_{cp} — средний геометрический радиус системы трех проводов линии [то же, что в (13-34), но с заменой r_0 на r];

D_i — среднее геометрическое расстояние проводов фаз a , b и c до их зеркальных отражений относительно поверхности земли (рис. 13-17), которое практически можно принимать равным удвоенной средней арифметической высоте подвеса проводов, т. е.

$$D_i \approx 2 \frac{h_a + h_b + h_c}{3}.$$

Заземленный трос несколько снижает емкостное сопротивление линии. Однако достаточно заметно это сказывается лишь в нулевой последовательности. В этом случае величина x_{c0} может быть определена по выражению

$$x_{c0} = 396 \left(\lg \frac{D_i}{R'_{cp}} - 2 \frac{\lg \frac{D_{птi}}{D_{пт}}}{\lg \frac{2h_T}{r_T}} \right) \cdot 10^3, \text{ ом}, \quad (13-59)$$

¹ Без учета влияния земли, которое сказывается весьма незначительно.

где r_T — радиус троса;

$D_{пт}$ — среднее геометрическое расстояние между проводами и тросом [то же, что в (13-43)];

$D_{пти}$ — среднее геометрическое расстояние между проводами фаз a , b и c и зеркальным отражением троса (рис. 13-17); практически оно может быть принято

$$D_{пти} \approx \frac{D_i + 2h_T}{2}.$$

Средние значения высоты подвеса нижнего провода линии:

при 35 кВ—8 м; при 220 кВ — 10 м;
при 110 кВ—9 м; при 330 и 500 кВ—15 м.

Следует подчеркнуть, что для определения емкостного сопротивления всей линии нужно значение емкостного сопротивления 1 км разделить на полную ее длину (км).

Пример 13-2. Для двухцепной линии, расположение проводов и тросов которой показано на рис. 13-18, определить сопротивления Z_1 и Z_0 в омах на километр.

Фазные провода марки АС-150, $\varnothing$ 17 мм; тросы марки ТК-70, $\varnothing$ 9,4 мм.

Расстояния (рис. 13-18) (м):

$$\begin{aligned} d_{ab} = d_{bc} = 3,18; \quad d_{aa'} = d_{ab'} = 7,3; \quad d_{ac'} = 8,57; \quad d_{bb'} = 5,9; \\ d_{bc'} = 6,06; \quad d_{cc'} = 4,5; \quad d_{TT'} = 4,4; \quad d_{aT} = 3,25; \quad d_{bT} = 6,05; \\ d_{cT} = 9,1; \quad d_{a'T} = 6,53; \quad d_{b'T} = 7,92; \quad d_{c'T} = 10,13. \end{aligned}$$

$$\text{Проводимость земли } \lambda = 0,35 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{ом} \cdot \text{см}}.$$

Эквивалентный радиус провода

$$r_a = 0,95 \frac{17}{2} \cdot 10^{-3} = 8,07 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Среднее геометрическое расстояние между проводами одной из цепей

$$D_{ср} = \sqrt[3]{2 \cdot 3,18^3} = 1,26 \cdot 3,18 = 4,01 \text{ м.}$$

Активное сопротивление провода АС-150

$$r_{п} = 0,21 \text{ ом/км.}$$

Сопротивление прямой последовательности одной цепи

$$Z_1 = 0,21 + j0,145 \lg \frac{4,01}{8,07 \cdot 10^{-3}} = 0,21 + j0,392 \text{ ом/км},$$

соответственно обеих параллельных цепей, если пренебречь взаимной индукцией между ними,

$$Z''_1 = 0,105 + j0,196 \text{ ом/км}.$$

Эквивалентная глубина возврата тока через землю по (13-27)

$$D_3 = \frac{2,085 \cdot 10^{-3}}{\sqrt[3]{50 \cdot 0,35 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-9}}} = 1580 \text{ м}.$$

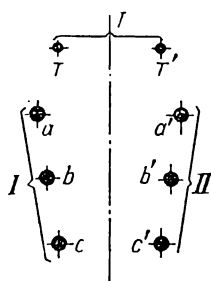


Рис. 13-18. К примеру 13-2. Расположение проводов и тросов двухцепной линии на одних опорах.

Средний геометрический радиус системы трех проводов одной цепи

$$R_{ср} = \sqrt[3]{8,07 \cdot 10^{-3} \cdot 4,01^2} = 0,507 \text{ м}.$$

Сопротивление нулевой последовательности одной цепи без учета другой цепи и тросов [по (13-34)]

$$Z_0 = 0,21 + 0,15 + j0,435 \lg \frac{1580}{0,507} = 0,36 + j1,52 \text{ ом/км}.$$

Среднее геометрическое расстояние между цепями по (13-37)

$$D_{I-II} = \sqrt[3]{(8,57 \cdot 6,06 \cdot 7,3)^2 \cdot 4,5 \cdot 5,9 \cdot 7,3} = 6,65 \text{ м}.$$

Сопротивление взаимной индукции нулевой последовательности между цепями по (13-38)

$$Z_{I-II0} = 0,15 + j0,435 \lg \frac{1580}{6,65} = 0,15 + j1,04 \text{ ом/км}.$$

Сопротивление нулевой последовательности одной цепи с учетом другой цепи по (13-39)

$$Z'_0 = 0,36 + j1,52 + 0,15 + j1,04 = 0,51 + j2,56 \text{ ом/км}$$

и обеих параллельных цепей

$$Z''_0 = 0,5Z'_0 = 0,255 + j1,28 \text{ ом/км.}$$

Произведем теперь расчет сопротивлений с учетом тросов.

По кривым приложения П-9 для троса марки ТК-70 при токе $I = 100 \div 200$ а имеем: $r_T = 2,8 \text{ ом/км}$ и $x_{внутр} = 0,7 \text{ ом/км}$.

Эквивалентный радиус троса

$$r_{эТ} = \frac{0,5 \cdot 9,4 \cdot 10^{-3}}{\text{anti lg } 0,145} = 7,11 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Средний геометрияческий радиус обоих тросов

$$R_{срТ} = \sqrt{7,11 \cdot 10^{-3} \cdot 4,4} = 0,555 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Сопротивление нулевой последовательности обоих тросов по (13-47)

$$Z_{Т0} = 3 \frac{2,8}{2} + 0,15 + j0,435 \lg \frac{1580}{0,555 \cdot 10^{-3}} = 4,35 + j2,81 \text{ ом/км.}$$

Среднее геометрическое расстояние между тросами и проводами одной из цепей линии¹ по (13-46)

$$D_{ПТ} = \sqrt[3]{3,25 \cdot 6,05 \cdot 9,1 \cdot 10,13 \cdot 7,92 \cdot 6,53} = 6,75 \text{ м.}$$

Сопротивление взаимной индукции нулевой последовательности между тросами и проводами одной из цепей линии

$$Z_{ПТ0} = 0,15 + j0,435 \lg \frac{1580}{6,75} = 0,15 + j1,03 \text{ ом/км.}$$

$$Z_0^{(T)} = 0,36 + j1,52 - \frac{(0,15 + j1,03)^2}{4,35 + j2,81} = 0,492 + j1,363, \text{ ом/км.}$$

В соответствии со схемой замещения рис. 13-15,б и выражениями (13-51) — (13-53) при идентичных цепях сопротивление нулевой последовательности одной цепи с учетом тросов и другой цепи находим из выражения

$$\begin{aligned} Z_0^{(T)} &= Z_0 + Z_{I-II0} - 2 \frac{Z_{ПТ0}^2}{Z_{Т0}} = Z'_0 - 2 \frac{Z_{ПТ0}^2}{Z_{Т0}} = \\ &= 0,51 + j2,56 - 2 \frac{(0,15 + j1,03)^2}{4,35 + j2,81} = 0,774 + j2,246, \text{ ом/км} \end{aligned}$$

¹ В силу симметричного расположения цепей относительно тросов расстояния от проводов цепи I до троса T' те же, что от проводов цепи II до троса T.

и обеих параллельных цепей

$$Z_0''^{(T)} = 0,5 Z_0'^{(T)} = 0,387 + j1,123, \text{ ом/км.}$$

Если в качестве троса использовать такие же провода, что и для фаз, т. е. АС-150, то, произведя аналогичный подсчет, найдем:

$$Z_0''^{(T)} = 0,24 + j0,665, \text{ ом/км.}$$

Определим еще, какая часть тока нулевой последовательности линии возвращается по тросам:

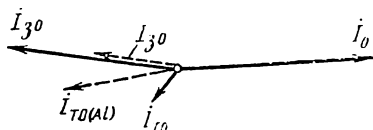


Рис. 13-19. К примеру 13-2. Баланс токов нулевой последовательности.

при тросах ТК-70:

$$I_{T0} = \frac{(0,15 + j1,03)}{(4,35 + j2,81)} I_0 = 0,2 I_0 \angle 49^\circ;$$

при тросах АС-150

$$I_{T0} = 0,59 I_0 \angle 7^\circ.$$

Для иллюстрации на рис. 13-19 показан баланс токов нулевой последовательности в линии, тросах и земле. Сплошные векторы соответствуют условию, что на линии подвешены стальные тросы ТК-70, а проведенные пунктиром — когда в качестве тросов использованы провода АС-150. Обращает на себя внимание, что в последнем случае ток в тросах значительно больше и находится почти в противофазе с током в линии, что способствует снижению его электромагнитного влияния на соседние цепи.

13-9. КАБЕЛИ

Активное и индуктивное сопротивления прямой (обратной) последовательности кабеля могут быть определены так же, как и для воздушной линии, используя (13-36). Однако поскольку геометрические размеры кабелей часто отсутствуют, значения x_1 кабелей обычно находят по заводским данным (см. приложение П-11).

Прокладку кабелей производят на относительно малой глубине (порядка 1 м). Поэтому распределение об-

ратного тока подземной цепи «провод — земля» мало отличается от того, которое имеет место при аналогичной воздушной цепи, что позволяет при определении сопротивления нулевой последовательности кабеля исходить из тех же принципов, что и для воздушных линий.

Если бы трехжильный кабель (рис. 13-20) не обладал проводящей оболочкой, то его сопротивление Z_0 можно

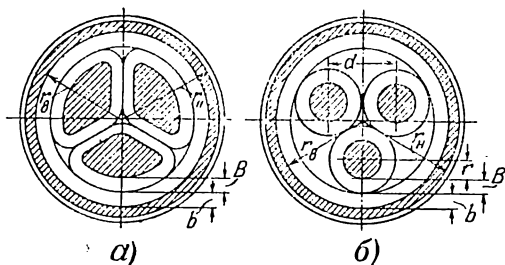


Рис. 13-20. Сечение трехжильного кабеля с секторными (а) и круглыми (б) жилами.

было бы определить по (13-34), введя в последнее средний геометрический радиус трех жил кабеля

$$R_{\text{ср}} = \sqrt[3]{r_{\text{ж}} d^2},$$

где $r_{\text{ж}}$ — эквивалентный радиус жилы;

d — расстояние между осями жил.

Оболочка кабеля, как правило, заземлена на его концах и в ряде промежуточных точек (муфтах). Следовательно, она образует для токов нулевой последовательности путь, параллельный земле. В этом отношении оболочка кабеля аналогична заземленным тросам у воздушных линий. На распределение тока между оболочкой и землей существенное влияние оказывает не только собственное сопротивление оболочки, но также и сопротивления ее заземлений, величины которых зависят от характера прокладки кабеля (траншея, блоки и т. д.) и ряда других факторов, что существенно затрудняет определение с достаточной достоверностью величин Z_0 кабеля.

Можно представить себе два предельных случая:

1) когда оболочка кабеля по всей длине имеет столь хорошее заземление, что сопротивлением последнего

практически можно пренебречь; при этом ток в земле достигает наибольшего возможного значения, а ток в оболочке, напротив, — наименьшего;

2) когда весь ток возвращается только по оболочке.

Заранее можно предвидеть, что в первом из них благодаря меньшему компенсирующему действию тока оболочки реактивность x_0 кабеля несомненно больше, чем во втором. Истинное значение этой реактивности, очевидно, лежит между ее значениями при указанных предельных случаях.

Своеобразие оболочки кабеля по сравнению с тросом линии заключается в том, что ее собственная реактивность одновременно является реактивностью взаимной индукции нулевой последовательности между оболочкой и жилами кабеля, т. е. оболочка лишена рассеяния. При удельном сопротивлении свинца $\rho = 25,2 \cdot 10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{см}$ активное сопротивление оболочки кабеля может быть определено из выражения

$$r_{об} = \frac{0,8}{(r_{н} + r_{в})(r_{н} - r_{в})}, \text{ ом/км}, \quad (13-60)$$

где $r_{н}$ и $r_{в}$ — наружный и внутренний радиусы оболочки, см (рис. 13-20).

Введя среднее геометрическое расстояние между оболочкой и жилами кабеля

$$D_{п об} = \frac{1}{2} (r_{н} + r_{в}),$$

согласно (13-43) для сопротивления взаимной индукции нулевой последовательности между оболочкой и жилами кабеля имеем:

$$Z_{п об 0} = 0,15 + j0,435 \lg \frac{2D_{в}}{r_{н} + r_{в}}, \text{ ом/км}. \quad (13-61)$$

Таким образом, для условий первого предельного случая схема замещения нулевой последовательности кабеля по аналогии с рис. 13-13,в имеет вид, как на рис. 13-21, где Z'_0 — сопротивление нулевой последовательности кабеля при отсутствии оболочки. Результирующее сопротивление этой схемы дает возможное наибольшее сопротивление $Z_{омакс}$ кабеля.

Чтобы создать условия второго предельного случая, достаточно в схеме рис. 13-21 разомкнуть ветвь, отвечающую земле. При этом результирующее сопротивление схемы дает возможное наименьшее сопротивление $Z_{0\text{мин}}$ кабеля.

Изменение распределения обратного тока между оболочкой и землей сравнительно мало сказывается на модуле полного сопротивления Z_0 кабеля и, напротив, резко влияет на величины

его активной и реактивной составляющих. Так, например, для кабеля 3 кв сечением $3 \times 150 \text{ мм}^2$ реактивности $x_{0\text{макс}} = 1,38 \text{ ом/км}$ и $x_{0\text{мин}} = 0,12 \text{ ом/км}$, т. е. они отличаются друг от друга в 11,5 раза.

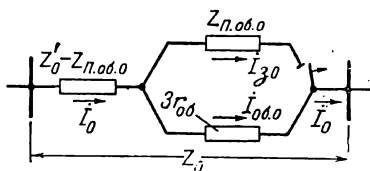


Рис. 13-21. Схема замещения нулевой последовательности кабеля.

Столь большая разница между предельными значениями затрудняет привести достаточно надежные средние значения r_0 и x_0 кабеля. В качестве первого приближения, следуя предложению Н. Н. Щедрина, их можно оценивать как средние арифметические из полученных предельных значений.

В ориентировочных расчетах для трехжильных кабелей можно принимать:

$$r_0 \approx 10r_1;$$

$$x_0 \approx (3,5 \div 4,6) x_1,$$

где r_1 и x_1 — соответственно активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности кабеля.

Значения реактивного емкостного сопротивления прямой последовательности трехжильного кабеля по заводским данным приведены в приложении П-11.

Для трехжильного кабеля с круглыми жилами реактивное емкостное сопротивление 1 км может быть приближенно найдено по следующим выражениям [Л. 13]:

$$x_{c1} = \frac{42,5 - 7,7 \frac{b}{B}}{1 + \frac{2r}{b + B}} \cdot 10^3, \text{ ом}; \quad (13-62)$$

$$x_{c0} = \frac{96,5}{1,85 + \frac{2r}{b+B}} \cdot 10^3, \text{ Ом}, \quad (13-63)$$

где в соответствии с рис. 13-20:

r — радиус жилы;

B — толщина фазной изоляции;

b — толщина поясной изоляции;

все указанные линейные величины должны быть в одних единицах измерения.

Для кабеля с секторными жилами, имеющими ту же поверхность проводника и ту же толщину изоляции, как у кабеля с круглыми жилами, емкостные сопротивления x_{c1} и x_{c0} несколько меньше. Это снижение может быть учтено поправочным коэффициентом n , значение которого в зависимости от $\frac{b+B}{2r}$ имеет следующее значение

[Л. 12]:

$\frac{b+B}{2r}$	0,3	0,5	0,7	1,0	1,5	2,0
n	0,70	0,82	0,87	0,90	0,94	0,96

При определении емкостного сопротивления всего кабеля величины этого сопротивления на 1 км должны быть разделены на полную длину данного кабеля.

13-10. ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. При каком условии сопротивление элемента для токов любой последовательности одинаково?

2. В чем принципиальная разница в определении x_2 синхронной машины по (13-7), (13-8) и (13-9)?

3. Как будет изменяться x_2 синхронной машины, если в цепь ротора ввести дополнительную внешнюю реактивность и стремиться последнюю от нуля до бесконечности?

4. Для синхронного генератора известны: $r_d = 1,0$; $x_d = 0,65$; $x_q = 0,15$; $x'_d = 0,25$. Определить значение x_2 и оценить изменение этой реактивности в том случае, если на роторе создать демпферные обмотки:

а) только в продольной оси с $x_{1d} = 0,9$;

б) только в поперечной оси с $x_{1q} = 0,6$;

в) в обеих осях ($x_{1d} = 0,9$ и $x_{1q} = 0,6$).

5. В какой мере сопротивление Z_2 асинхронного двигателя зависит от его нагрузки?

6. Для нагрузки, состоящей из двигателя с $x_2 = 0,2$ и параллельно включенной с ним электрической печи с $r = 0,6$, определить сопротивление обратной последовательности относительно шин, с которыми она связана через реактивность сети $x_{сети} = 0,1$. Все сопро-

тивления даны в относительных единицах при номинальных условиях двигателя.

7. Провести решение примера 13-1 для случая, когда заданный источник подключен со стороны высшего напряжения, а на стороне среднего напряжения все фазы закорочены на землю.

8. Для условий пп. «а», «б» и «в» примера 13-1 произвести проверку баланса н. с. в автотрансформаторе.

9. Каков смысл эквивалентной глубины возврата тока через землю?

10. На сколько изменится реактивность линии «провод — земля» с изменением частоты тока в n раз?

11. Что отражают эквивалентный радиус проводника и системы проводников, среднее геометрическое расстояние между проводниками?

12. Для одноцепной линии с проводами АС-120, расположенными в горизонтальной плоскости с расстоянием между смежными проводами 4 м, определить сопротивление нулевой последовательности, зная, что проводимость земли $\lambda = 2 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{ом} \cdot \text{см}}$.

13. Для условий предыдущей задачи, считая дополнительно, что параллельно с рассмотренной линией на расстоянии 30 м проходит такая же линия, определить сопротивление нулевой последовательности одной из этих линий.

14. Как сказываются заземленные тросы на сопротивлении нулевой последовательности линии и от каких факторов зависит их влияние?

15. Для условий примера 13-2 определить сопротивление нулевой последовательности одной цепи линии, когда другая цепь заземлена по концам. Тросы считать марки ТК-70.

16. В чем заключается трудность определения сопротивления нулевой последовательности кабеля?

17. Определить реактивное емкостное сопротивление линии, рассмотренной в примере 13-2.

18. Для кабеля 10 кВ, у которого сечение жилы 120 мм², толщины изоляции $B=2,75$ мм и $b=1,25$ мм, определить по (13-62) значение x_{c1} и сопоставить его с заводским значением.

ГЛАВА ЧЕТЫРНАДЦАТАЯ

СХЕМЫ ОТДЕЛЬНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

14-1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

При применении метода симметричных составляющих к расчету какого-либо несимметричного установившегося режима или несимметричного переходного процесса одной из первоочередных задач является составление схем замещения в общем случае всех трех последовательностей (прямой, обратной и нулевой).

При аналитическом решении поставленной задачи по этим схемам находят результирующие сопротивления от-

дельных последовательностей рассматриваемой системы относительно места, где возникла несимметрия. Из схемы замещения прямой последовательности, помимо того, находят результирующую э. д. с. относительно той же точки. При использовании расчетных моделей (или столов) надобность в определении результирующих сопротивлений отпадает, так как в этом случае после объединения схем замещения отдельных последовательностей в комплексную схему замещения для рассматриваемого вида несимметрии (см. § 15-6 и 17-2—17-4) представляется возможным найти токи и напряжения отдельных последовательностей в некотором масштабе по показаниям измерительных приборов.

Схемы замещения отдельных последовательностей составляют, как обычно, в соответствии с указаниями § 2-4. В частности, элементы схем замещения выражают в именованных или относительных единицах, приводя соответственно к выбранной основной ступени напряжения или к выбранным базисным условиям. В зависимости от требований к точности проводимого расчета схемы замещения составляют либо с учетом действительных коэффициентов трансформации, либо приближенно, т. е. исходя из средних номинальных напряжений для каждой ступени трансформации.

14-2. СХЕМЫ ПРЯМОЙ И ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

Схема прямой последовательности является обычной схемой, которую составляют при любом симметричном трехфазном установившемся или переходном режиме.

Так, например, при применении метода спрямленных характеристик схему прямой последовательности можно воспроизвести для произвольного момента процесса короткого замыкания. В этом случае, как известно (см. § 11-7), все участвующие генераторы достаточно ввести своими расчетными э. д. с. и расчетными реактивностями для рассматриваемого момента времени. При применении метода расчетных кривых генераторы вводят в схему прямой последовательности своими сверхпереходными реактивностями (см. § 11-5). Наконец, если для расчета используется операторный метод, то в схему прямой последовательности генераторы вводят соответствующими операторными сопротивлениями.

Поскольку пути циркуляции токов обратной последовательности те же, что и токов прямой последовательности, схема обратной последовательности по структуре аналогична схеме прямой последовательности. Различие между ними состоит прежде всего в том, что в схеме обратной последовательности э. д. с. всех генерирующих ветвей принимаются равными нулю (см. § 12-3) и, кроме того, считают (§ 13-2 — 13-4), что сопротивления обратной последовательности синхронных машин и нагрузок практически постоянны и не зависят от вида и условий возникшей несимметрии, а также от продолжительности переходного процесса.

Началом схемы прямой или обратной последовательности считают точку, в которой объединены свободные концы всех генерирующих и нагрузочных ветвей; это точка нулевого потенциала схемы соответствующей последовательности.

Концом схемы прямой или обратной последовательности считают точку, где возникла рассматриваемая несимметрия. При продольной несимметрии каждая из схем имеет уже два конца, т. е. точки схемы, между которыми расположена заданная продольная несимметрия. К концу или соответственно между концами схем отдельных последовательностей приложены напряжения соответствующих последовательностей, возникшие в месте несимметрии.

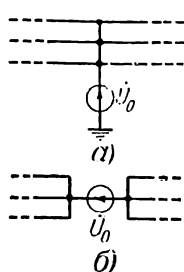
При необходимости учета емкостной проводимости последняя должна быть введена аналогично нагрузочной ветви, потенциал свободного конца которой равен нулю (см. § 15-11).

14-3. СХЕМА НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Токи нулевой последовательности по существу являются однофазным током, разветвленным между тремя фазами и возвращающимся через землю и параллельным ей цепям. В силу этого путь циркуляции токов нулевой последовательности резко отличается от пути, по которому проходят токи прямой или обратной последовательности.

Схема нулевой последовательности в значительной мере определяется соединением обмоток участвующих трансформаторов и автотрансформаторов.

Составление схемы нулевой последовательности следует начинать, как правило, от точки, где возникла несимметрия, считая, что в этой точке все фазы замкнуты между собой накоротко и к ней приложено напряжение нулевой последовательности. В зависимости от вида несимметрии это напряжение прикладывается или относительно



относительно земли (поперечная несимметрия, рис. 14-1,а) или последовательно, в расщепку фазных проводов (продольная несимметрия, рис. 14-1,б).

Исходя из соответствующего данной несимметрии включения напряжения нулевой последовательности, далее следует выявить в пределах каждой электрически связанной цепи возможные пути протекания токов нулевой последовательности.

Рис. 14-1. Напряжение нулевой последовательности при:
а — поперечной несимметрии, б — продольной несимметрии.

Когда напряжение нулевой последовательности приложено относительно земли, при отсутствии емкостной проводимости для циркуляции токов нулевой последовательности необходима по меньшей мере одна заземленная нейтраль в той же электрически связанной цепи, где приложено это напряжение. При нескольких заземленных нейтралей в этой цепи образуется соответственно несколько параллельных контуров для токов нулевой последовательности.

При продольной несимметрии, т. е. когда напряжение нулевой последовательности введено последовательно в фазные провода, циркуляция токов нулевой последовательности возможна даже при отсутствии заземленных нейтралей, если при этом имеется замкнутый контур через обходные пути той же электрически связанной сети¹. При отсутствии таких обходных путей протекание токов нулевой последовательности в рассматриваемых условиях возможно только в том случае, если в той же электрически связанной цепи имеются заземленные нейтрали с обеих сторон от места, где приложено напряжение нулевой последовательности.

¹ При этом в земле циркулирует наведенный ток, следуя по трассе линии.

Как показано в § 13-6 и 13-7, трансформация токов нулевой последовательности возможна только при соблюдении определенных условий. Так, в трансформаторе с соединением обмоток Y_0/Δ наведенный в треугольнике ток нулевой последовательности не выходит за его пределы. Следовательно, вся сеть, присоединенная со стороны треугольника, не входит в схему нулевой последовательности, составляемую для условий, когда напряжение нулевой последовательности приложено со стороны обмотки, соединенной Y_0 .

В трансформаторе с соединением обмоток Y_0/Y_0 трансформация токов нулевой последовательности возможна при условии, что в каждой обмотке обеспечен путь для этих токов. При соблюдении этого в схему нулевой последовательности входят как трансформатор, так и все элементы, по которым протекают токи нулевой последовательности с обеих сторон трансформатора.

Сопротивление, через которое заземлена нейтраль трансформатора, генератора, двигателя, нагрузки, должно быть введено в схему нулевой последовательности утроенной величиной. Это обусловлено тем, что схему нулевой последовательности составляют для одной фазы, а через указанное сопротивление протекает сумма токов нулевой последовательности всех трех фаз.

Участие трансформаторов в схеме нулевой последовательности достаточно подробно было рассмотрено в § 13-6 и 13-7. В частности, у автотрансформатора с третьей (компенсационной) обмоткой, соединенной в треугольник, отсутствие заземленной нейтрали (что обычно не имеет места) не исключает возможности прохождения через него токов нулевой последовательности. В данном случае автотрансформатор входит в схему нулевой последовательности своей схемой замещения, представленной на рис. 13-7,д.

Сопротивление, введенное в нейтраль автотрансформатора, участвует в схеме замещения согласно рис. 13-7,г; реактивности этой схемы находят по (13-24).

На рис. 14-2 показан пример составления схемы нулевой последовательности для случая, когда напряжение нулевой последовательности возникает между проводами и землей (поперечная несимметрия). Исходная схема (рис. 14-2,а) состоит из пяти магнитносвязанных цепей, причем две из них имеют автотрансформаторную

связь, т. е., помимо магнитной, у них имеется еще электрическая связь между собой. Стрелками указаны пути циркуляции токов нулевой последовательности при рассматриваемых условиях. Обмотки трансформаторов и прочие элементы схемы обозначены порядковыми номерами, которые также использованы в обозначениях элементов схемы нулевой последовательности (рис. 14-2,б).

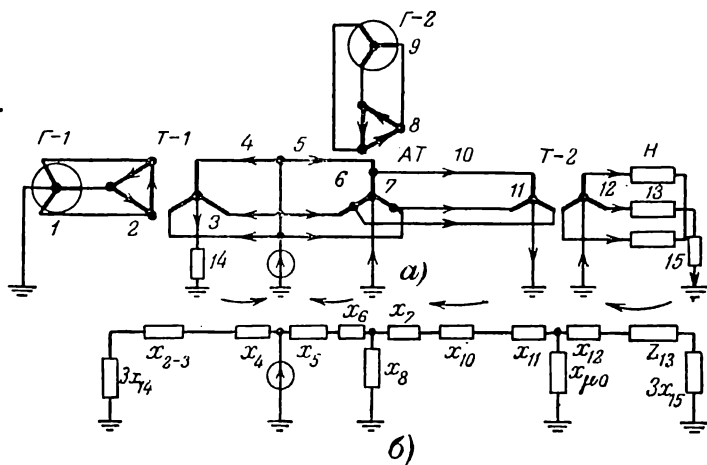


Рис. 14-2. Пример схемы нулевой последовательности.
а — исходная схема; б — схема замещения нулевой последовательности.

Поскольку в цепи обмотки среднего напряжения автотрансформатора имеется путь для токов нулевой последовательности, автотрансформатор входит своей полной схемой замещения. Циркуляция тока нулевой последовательности в обмотке 12 трансформатора $T-2$ обеспечена через заземленную нейтраль нагрузки. Этот трансформатор предполагается трехстержневым, поэтому учтена его реактивность намагничивания нулевой последовательности. Для другого трансформатора и автотрансформатора указания об их конструкции практически не нужны, так как они имеют обмотки, соединенные треугольником.

Если предположить, что в той же точке напряжение нулевой последовательности приложено в рассечку проводов, то легко убедиться, что в этом случае схема нулевой последовательности останется той же, но ее ре-

зультирующее сопротивление, разумеется, будет совсем иным (см. § 14-4).

Обратимся к другому примеру (рис. 14-3, а). Здесь при возникновении в точке M напряжения нулевой последовательности относительно земли схема нулевой последовательности имеет вид, показанный на рис. 14-3, б, а при возникновении того же напряжения в рассечке провода в схему нулевой последовательности трансформатор $T-1$ уже не входит и она состоит только из линий, образующих замкнутый контур.

Как отмечалось в § 13-8, взаимоиנדукция нулевой последовательности между параллельными цепями воздушных линий может сказываться весьма существенно, и поэтому ее нужно учитывать при составлении схем нулевой последовательности. При двух магнитно связанных цепях такой учет легко осуществить, используя соответствующую схему замещения (см. § 2-4 и 13-8).

Можно встретить более сложные случаи, когда несколько линий (иногда разных напряжений) проходят на некотором достаточно протяженном участке вблизи друг друга. Наиболее общей схемой замещения нулевой последовательности линий в подобных случаях является схема полного многоугольника, параметры которого можно найти из решения общих уравнений многополюсника с учетом свойств эквивалентных схем, используя матричное исчисление [Л. 101, 103]. В приложении П-13 приведен ряд схем замещения нулевой последовательности для нескольких типовых случаев, где требуется учет взаимоиנדукции между цепями.

Началом схемы нулевой последовательности считают точку, в которой объединены

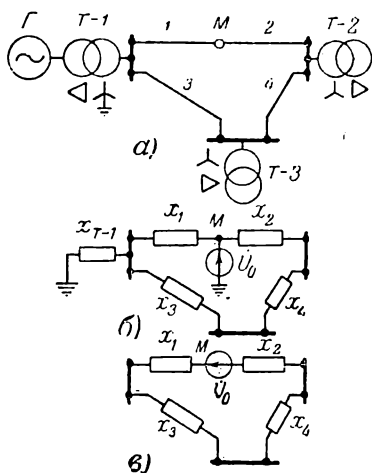


Рис. 14-3. Пример схемы нулевой последовательности.

а — исходная схема; б — схема замещения при поперечной несимметрии; в — схема замещения при продольной несимметрии.

ветви с нулевым потенциалом, а ее концом — точку, где возникла несимметрия. При продольной несимметрии, аналогично тому как указывалось в § 14-2, схема нулевой последовательности имеет два конца (границы места несимметрии); при этом следует отметить, что когда нейтраль системы не заземлена, начало схемы уже теряет смысл, так как в общем случае точка нулевого потенциала может перемещаться в зависимости от характера продольной несимметрии, места ее возникновения и других факторов.

Дополнительный путь циркуляции токов нулевой последовательности имеет место через емкостную проводимость относительно земли (т. е. емкостную проводимость нулевой последовательности). При поперечной несимметрии в системе с изолированной нейтралью этот путь для токов нулевой последовательности является единственным (см. § 15-11). Емкостная проводимость нулевой последовательности при необходимости ее учета вводится как аналогичная нагрузочная ветвь.

14-4. РЕЗУЛЬТИРУЮЩИЕ Э. Д. С. И СОПРОТИВЛЕНИЯ

Следующий этап аналитического расчета какого-либо несимметричного режима или процесса обычно заключается в определении результирующих сопротивлений схем отдельных последовательностей относительно точки, где возникла та или иная несимметрия. Помимо того, на этом этапе, как известно, из схемы прямой последовательности в общем случае находят также результирующую э. д. с. Необходимые для этого преобразования схем производят в соответствии с указаниями § 2-6. При этом нужно иметь в виду принципиальное различие в преобразовании схем при поперечной и продольной несимметриях.

Обратимся к схеме рис. 14-4,а и покажем на ней в качестве примера, в чем именно состоит это различие. Все элементы исходной схемы пронумерованы и их номера сохранены для обозначения соответствующих элементов в схемах замещения отдельных последовательностей.

При поперечной несимметрии в точке М схема замещения прямой последовательности имеет вид, представленный на рис. 14-4,б. Последовательно соединенные

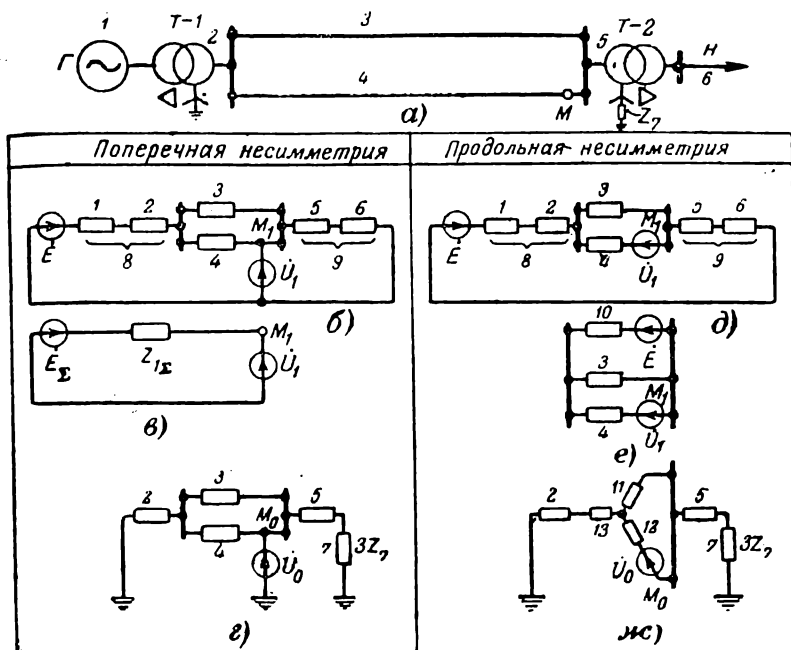


Рис. 14-4. Пример составления схем отдельных последовательностей и определения результирующих э. д. с. и сопротивлений при поперечной (б, в, г) и продольной (д, е, жс) несимметриях.

в ней элементы 1 и 2, а также 5 и 6 обозначены соответственно номерами 8 и 9. Для определения результирующих э. д. с. и сопротивления относительно точки M_1 достаточно заменить ветвь 9 с $E=0$ и ветвь, получаемую сложением элемента 8 с параллельно соединенными элементами 3 и 4 и имеющую э. д. с. E , одной эквивалентной (рис. 14-4,в). Схема обратной последовательности и ее преобразование аналогичны, за исключением того, что в ней отсутствуют э. д. с. источники. Схема нулевой последовательности (рис. 14-4,г) также легко может быть преобразована путем параллельного сложения элементов 3 и 4 (сопротивления которых в общем случае подсчитывают с учетом влияния взаимной индукции между цепями линии) и замены образовавшихся двух параллельных ветвей одной эквивалентной.

Теперь представим себе, что в точке M возникла продольная несимметрия. В этом случае напряжение пря-

мой последовательности в точке M_1 должно быть введено в рассечку цепи элемента 4 (рис. 14-4,д). Для определения результирующей э. д. с. и результирующего сопротивления схемы относительно точки M_1 в данном случае необходимо вначале сложить последовательно элементы 8 и 9. Затем, образовавшуюся ветвь 10 с э. д. с. $\dot{E}$ и ветвь 3 (рис. 14-4,е) следует заменить эквивалентной, что даст искомую результирующую э. д. с. относительно точки M_1 , а для нахождения результирующего сопротивления относительно той же точки достаточно к сопротивлению полученной эквивалентной ветви прибавить сопротивление элемента 4.

Схема обратной последовательности аналогична схеме рис. 14-4,д, в ней лишь отсутствует э. д. с. источника. Ее результирующее сопротивление легко найти так же, как и схемы прямой последовательности.

В схему нулевой последовательности (рис. 14-4,ж) двухцепная линия введена своей трехлучевой схемой замещения с элементами 11, 12 и 13, с тем чтобы учесть взаимоиндукцию между цепями, находящимися теперь в различных условиях. Для нахождения результирующего сопротивления схемы здесь нужно сопротивление элемента 11 сложить параллельно с суммой сопротивлений элементов 2, 13, 5 и 7 (последний входит утроенной величиной) и затем прибавить сопротивление элемента 12.

Рассмотренный пример наглядно вскрывает разный подход к определению результирующих э. д. с. и сопротивлений при поперечной и продольной несимметриях. Соотношения между величинами результирующих сопротивлений одноименной последовательности при этих несимметриях могут быть самыми различными в зависимости от характера схемы, места несимметрии, наличия обходных цепей и других факторов.

14-5. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И ТРАНСФОРМАЦИЯ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ

Фазные токи и напряжения при несимметричных режимах или процессах проще всего находить путем суммирования соответствующих симметричных составляющих.

Как отмечалось в § 12-3, в симметрично выполненных трехфазных устройствах, которые в соответствии с принятыми допущениями (см. § 2-1) и подлежат рассмотрению, напряжения каждой последовательности зависят от токов только одноименной последовательности. Следовательно, чтобы найти распределение токов и напряжений каждой последовательности, необходимо поочередно развернуть схему каждой последовательности, руководствуясь известными правилами и законами распределения токов в линейных электрических цепях.

Поскольку схемы обратной и нулевой последовательностей являются пассивными и их элементы остаются неизменными в течение всего переходного процесса, часто представляется целесообразным использовать коэффициенты распределения (см. § 2-8), принимая за единицу ток в месте несимметричного повреждения. При поперечной и продольной несимметриях в одной и той же точке эти коэффициенты различны. Однако при разных видах несимметрии одного характера (т. е. или поперечной, или продольной), возникающей в одной и той же точке системы, они одинаковы.

Использование расчетных моделей весьма упрощает нахождение распределения токов и напряжений. При этом особенно удобно использовать так называемые комплексные схемы, составляемые для рассматриваемой несимметрии из схем отдельных последовательностей (см. § 15-6 и 17-2—17-4).

При определении фазных величин за трансформаторами нужно иметь в виду, что токи и напряжения при переходе через трансформатор изменяются не только по величине, но также и по фазе в зависимости от соединения его обмоток.

Обратимся к рис. 14-5, где приведена принципиальная схема трансформатора с соединением обмоток Y_0/Δ -11. Если числа витков фазных обмоток соответственно равны

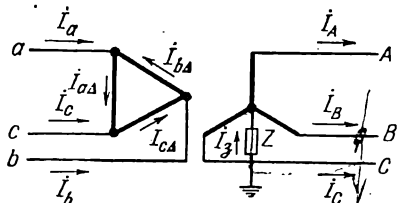


Рис. 14-5. Схема трансформатора с соединением обмоток Y_0/Δ -11.

ω_Y и ω_Δ , то линейный коэффициент трансформации (см. § 2-4)

$$k = \frac{\sqrt{3}\omega_Y}{\omega_\Delta}.$$

При заданных фазных токах I_A , I_B и I_C в соответствии с принятыми на рис. 14-5 положительными направлениями для токов в линейных проводах за треугольником имеем:

$$\left. \begin{aligned} I_a &= I_{a\Delta} - I_{b\Delta} = (I_A - I_B) \frac{\omega_Y}{\omega_\Delta} = \frac{(I_A - I_B)}{\sqrt{3}} k; \\ I_b &= I_{b\Delta} - I_{c\Delta} = (I_B - I_C) \frac{\omega_Y}{\omega_\Delta} = \frac{(I_B - I_C)}{\sqrt{3}} k; \\ I_c &= I_{c\Delta} - I_{a\Delta} = (I_C - I_A) \frac{\omega_Y}{\omega_\Delta} = \frac{(I_C - I_A)}{\sqrt{3}} k. \end{aligned} \right\} (14-1)$$

Эту запись можно видоизменить, выразив токи через их симметричные составляющие. Так, например, для тока I_a получим:

$$\begin{aligned} I_a &= \frac{(I_{A1} + I_{A2} + I_0 - a^2 I_{A1} - a I_{A2} - I_0)}{\sqrt{3}} k = \\ &= \frac{(1 - a^2) I_{A1} + (1 - a) I_{A2}}{\sqrt{3}} k = (I_{A1} e^{j30^\circ} + I_{A2} e^{-j30^\circ}) k, \end{aligned} \quad (14-2)$$

откуда, в частности, видно, что, как и следовало ожидать, линейные токи на стороне треугольника не содержат составляющих нулевой последовательности.

Аналогично могут быть найдены напряжения за рассматриваемым трансформатором. Если $\dot{U}_A$, $\dot{U}_B$ и $\dot{U}_C$ — фазные напряжения со стороны звезды, включающие в себя падения напряжения в самом трансформаторе¹, то иско-

¹ Эти напряжения по существу измерены за трансформатором, но они приведены к стороне звезды, т. е. $\dot{U}_A = \dot{U}_a$; $\dot{U}_B = \dot{U}_b$; $\dot{U}_C = \dot{U}_c$.

мые фазные напряжения со стороны треугольника будут:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_a &= \frac{\dot{U}_A - \dot{U}_B}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{k}; \\ \dot{U}_b &= \frac{\dot{U}_B - \dot{U}_C}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{k}; \\ \dot{U}_c &= \frac{\dot{U}_C - \dot{U}_A}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{k}, \end{aligned} \right\} \quad (14-3)$$

или при выражении напряжений через симметричные составляющие, например, для напряжения $\dot{U}_a$ будем иметь:

$$\dot{U}_a = (\dot{U}_{A1} e^{j30^\circ} + \dot{U}_{A2} e^{-j30^\circ}) \frac{1}{k}. \quad (14-4)$$

Из (14-3) и (14-4) следует, что напряжения на стороне треугольника не зависят от напряжения нулевой последовательности на стороне звезды, или, иными словами, от того, в какой мере смещена нейтраль системы на стороне звезды. В то же время, если нейтраль системы на стороне треугольника смещена на $\dot{U}_{0\Delta}$, для определения фазных напряжений относительно земли к значениям по (14-3) или (14-4) нужно прибавить $\dot{U}_{0\Delta}$.

Структура (14-2) и (14-4) показывает, что при переходе со стороны звезды на сторону треугольника трансформатора, обмотки которого соединены по группе $Y_0/\Delta-11$, векторы прямой последовательности повертываются на 30° в направлении вращения векторов, а векторы обратной последовательности — на 30° в противоположном направлении. Для большей наглядности это иллюстрирует рис. 14-6.

В качестве примера на рис. 14-7 приведено построение векторных диаграмм токов и напряжений при переходе через трансформатор $Y_0/\Delta-11$. Справа даны диаграммы со стороны звезды, которые являются в данном случае исходными. Точка O' , расположенная в центре тяжести треугольника линейных напряжений на стороне звезды, является нейтралью системы, которая сдвинута относительно земли на величину напряжения $\dot{U}_0$.

Искомые векторные диаграммы на стороне треугольника расположены на рис. 14-7 слева. Для фазы a по-

строение выполнено с помощью симметричных составляющих, а также через фазные величины, для других фаз — только по (14-1) и (14-3), т. е. по фазным величинам.

Правилу трансформации симметричных составляющих можно придать более общий характер, введя пред-

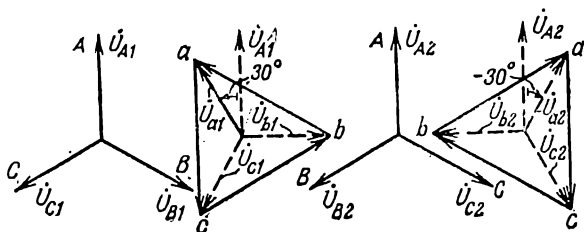


Рис. 14-6. Сдвиг напряжений прямой и обратной последовательностей для трансформатора с соединением обмоток $Y_0/\Delta-11$.

ложенное Н. А. Мельниковым понятие комплексного коэффициента трансформации [Л. 11] прямой последовательности

$$\dot{k}_1 = k e^{i30^\circ N} \quad (14-5)$$

и аналогично обратной последовательности

$$\dot{k}_2 = \hat{k}_1 = k e^{-i30^\circ N}, \quad (14-6)$$

где N — номер группы соединения обмоток трансформатора в соответствии с известным правилом часового циферблата.

Таким образом, если известны $\dot{U}_{A1}$ и $\dot{U}_{A2}$ перед трансформатором, у которого N группа соединения обмоток, то эти напряжения за трансформатором будут¹:

$$\dot{U}_{a1} = \dot{U}_{A1} \frac{1}{\dot{k}_1} = \frac{1}{k} \dot{U}_{A1} e^{-i30^\circ N}; \quad (14-7)$$

$$\dot{U}_{a2} = \dot{U}_{A2} \frac{1}{\dot{k}_2} = \frac{1}{k} \dot{U}_{A2} e^{i30^\circ N}. \quad (14-8)$$

¹ Величины $\dot{U}_{A1}$ и $\dot{U}_{A2}$, как отмечалось ранее, включают падения напряжения в трансформаторе.

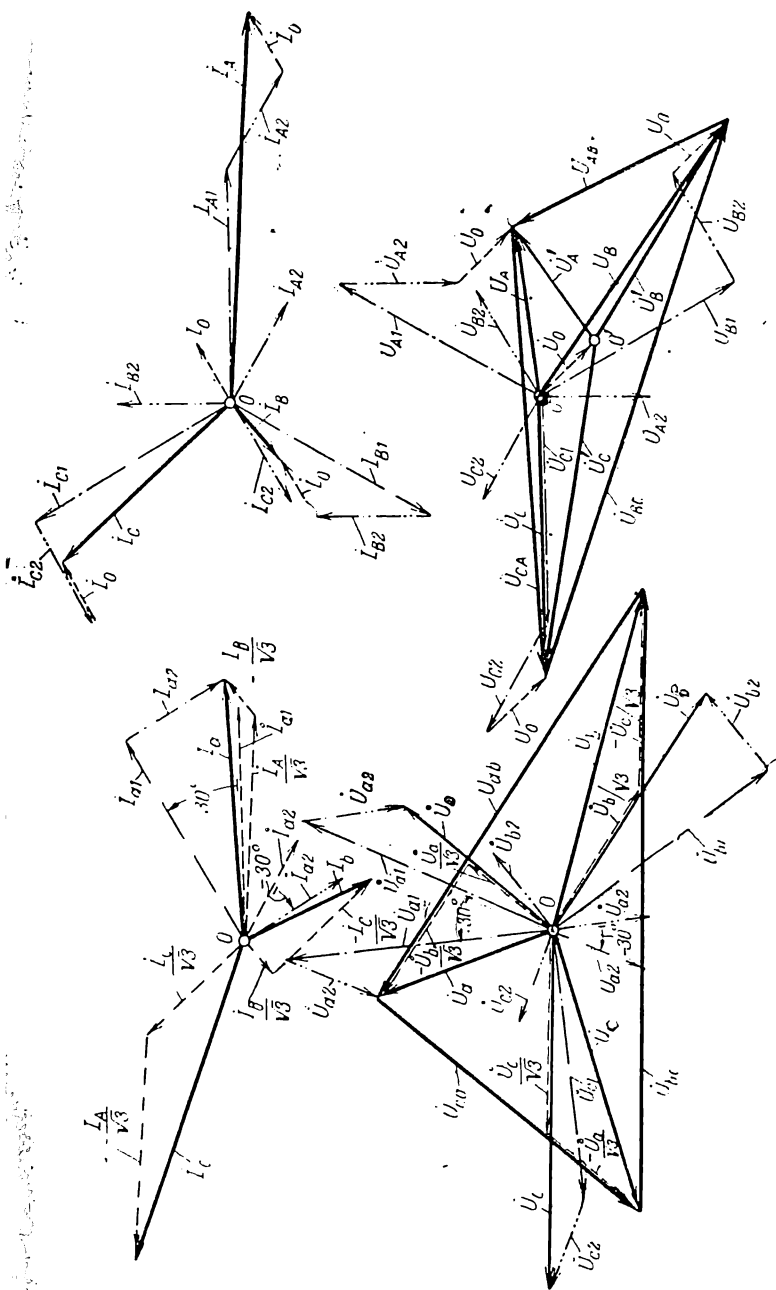


Рис. 14-7. Пример трансформации токов и напряжений через трансформатор с соединением обмоток $Y_n/\Delta-11$.

Соответственно для токов, исходя из условия инвариантности мощности, имеем:

$$I_{a1} = \hat{k}_1 I_{A1} = k I_{A1} e^{-j30^\circ N}; \quad (14-9)$$

$$I_{a2} = \hat{k}_2 I_{A2} = k I_{A2} e^{j30^\circ N}. \quad (14-10)$$

При переходе через трансформатор в обратном направлении угловые смещения симметричных составляющих меняют свой знак на противоположный.

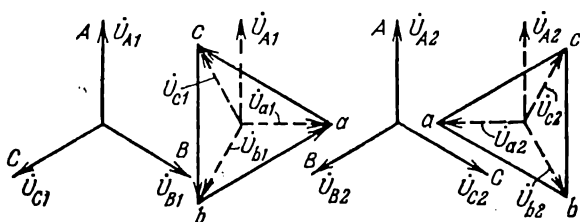


Рис. 14-8. Сдвиг напряжений прямой и обратной последовательностей при трансформаторе с соединением обмоток Y_0/Δ -3.

Наиболее простые соотношения получаются для трансформатора с соединением обмоток по группе 12, так как в этом случае угловые смещения токов и напряжений вообще отсутствуют. Поэтому для трансформатора с четной группой соединения обмоток (Y/Y или Δ/Δ), если не нужно знать действительной ориентировки токов и напряжений одной его стороны по отношению к токам и напряжениям на другой его стороне, обычно принимают соединение обмоток по группе 12. При этом, когда имеется соединение Y_0/Y_0 , должны быть учтены трансформируемые составляющие нулевой последовательности.

Аналогично если при нечетной группе соединения (Y/Δ) также не нужно знать истинной взаимной ориентировки векторных диаграмм на обеих сторонах трансформатора, то можно для простоты считать его соединение по группе 3 (или 9), поскольку при этом прямая и обратная последовательности поворачиваются на 90° в противоположные направления (рис. 14-8). Очевидно, прямую последовательность можно оставить без смещения, но зато обратную последовательность следует сдвинуть

на 180° . Отсюда вытекает простое и удобное для практики правило:

при переходе через трансформатор с соединением Y/Δ (или Δ/Y) достаточно только у системы обратной последовательности изменить знак на противоположный.

Нужно иметь в виду, что отказ от рассмотрения действительной группы соединения обмоток трансформатора приводит к несовпадению обозначений линейных проводов за трансформатором с маркировкой, отвечающей действительной группе соединения.

Следует особо подчеркнуть, что если токи и напряжения выражены в относительных единицах, то при их трансформации должны учитываться только угловые сдвиги, обусловленные соответствующей группой соединения обмоток трансформатора.

14-6. ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. В чем заключается принципиальное различие в составлении схем отдельных последовательностей при поперечной и при продольной несимметриях?

2. Как изменится схема нулевой последовательности рис. 14-2,б, если разземлить нейтраль автотрансформатора?

3. При каких условиях генератор Г-2 (рис. 14-2) войдет в схему нулевой последовательности и какой вид она будет иметь?

4. В схеме рис. 14-2,а на участке между автотрансформатором и трансформатором Т-2 произошла продольная несимметрия (вместо показанной на схеме поперечной несимметрии). Составить схему нулевой последовательности и показать порядок нахождения ее результирующего сопротивления.

5. Для схемы рис. 14-3,а составить схему нулевой последовательности при поперечной и продольной несимметриях в точке М, считая, что нейтраль всех трансформаторов заземлена наглухо.

6. Два одинаковых трансформатора с соединением Y_0/Δ на стороне звезды присоединены к разным секциям шин. Их нейтрали заземлены через общее сопротивление. При поперечной несимметрии на одной из секций составить схему нулевой последовательности для случаев: а) когда обе секции замкнуты; б) когда секции разделены.

7. Как изменятся векторные диаграммы токов и напряжений рис. 14-7 на стороне треугольника, если соединение обмоток трансформатора принять по группе 3 (вместо 11)?

8. У трансформатора с соединением обмоток по группе 11 известны фазные токи на стороне звезды: $I_A = 5$; $I_B = -5$; $I_C = 0$ (в относительных единицах). Определить фазные токи на стороне треугольника.

9. Для трансформатора с соединением обмоток Y_0/Δ -11 на стороне треугольника известны токи в относительных единицах: $I_a = 5$; $I_b = -5$; $I_c = 0$. Определить фазные токи на стороне звезды.

10. Для трансформатора с соединением обмоток $Y_0/\Delta-1/1$ на стороне звезды известны напряжения между фазами: $U_{AB}=0,6$; $U_{BC}=0,8$; $U_{CA}=0,4$ (в относительных единицах). Построить векторную диаграмму напряжений на стороне треугольника, считая, что трансформатор работает на холостом ходу.

ГЛАВА ПЯТНАДЦАТАЯ

ОДНОКРАТНАЯ ПОПЕРЕЧНАЯ НЕСИММЕТРИЯ

15-1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Поперечная несимметрия в произвольной точке трехфазной системы в общем виде может быть представлена на присоединении в этой точке неодинаковых сопротивлений, как это, например, показано на рис. 15-1.

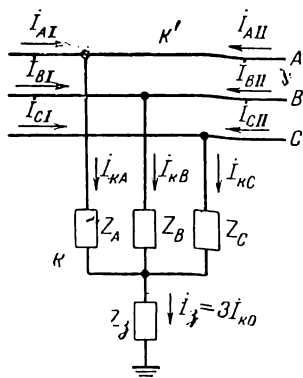


Рис. 15-1. Общий вид поперечной несимметрии в трехфазной системе.

Сопротивления Z_A , Z_B и Z_C , а также сопротивление Z_3 между нейтралью, образованной включением Z_A , Z_B , Z_C в звезду, и землей, вообще говоря, могут быть дополнительно связаны взаимной индукцией. Учет последней несколько усложняет выкладки; если для простоты ею пренебречь, то для фазных напряжений в месте несимметрии имеем:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{\kappa'A} &= Z_A i_{\kappa A} + 3Z_3 i_{\kappa 0}; \\ \dot{U}_{\kappa'B} &= Z_B i_{\kappa B} + 3Z_3 i_{\kappa 0}; \\ \dot{U}_{\kappa'C} &= Z_C i_{\kappa C} + 3Z_3 i_{\kappa 0}. \end{aligned} \right\} \quad (15-1)$$

Заменяя фазные токи и напряжения через их симметричные составляющие и проведя решение системы уравнений (15-1) относительно напряжений отдельных последовательностей, получим:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\kappa'A1} &= \frac{1}{3} [Z_A (i_{\kappa A1} + i_{\kappa A2} + i_{\kappa 0}) + \\ &+ aZ_B (a^2 i_{\kappa A1} + a i_{\kappa A2} + i_{\kappa 0}) + \\ &+ a^2 Z_C (a i_{\kappa A1} + a^2 i_{\kappa A2} + i_{\kappa 0})]; \end{aligned} \quad (15-2)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\kappa' A2} = & \frac{1}{3} [Z_A (i_{\kappa A1} + i_{\kappa A2} + i_{\kappa 0}) + a^2 Z_B \times \\ & \times (a^2 i_{\kappa A1} + a i_{\kappa A2} + i_{\kappa 0}) + a Z_C (a i_{\kappa A1} + a^2 i_{\kappa A2} + i_{\kappa 0})]; \end{aligned} \quad (15-3)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\kappa' 0} = & \frac{1}{3} [Z_A (i_{\kappa A1} + i_{\kappa A2} + i_{\kappa 0}) + \\ & + Z_B (a^2 i_{\kappa A1} + a i_{\kappa A2} + i_{\kappa 0}) + Z_C (a i_{\kappa A1} + a^2 i_{\kappa A2} + i_{\kappa 0})]. \end{aligned} \quad (15-4)$$

Эти уравнения вместе с основными уравнениями (12-4) — (12-6) позволяют найти симметричные составляющие токов и напряжений в месте несимметрии, по которым легко определить соответствующие фазные величины. Однако решение в общем виде приводит к громоздким выражениям. Более простые выражения получаются при использовании граничных условий, которыми характеризуется каждая поперечная несимметрия.

Несимметричное короткое замыкание любого вида можно получить из схемы рис. 15-1, полагая часть сопротивлений равными нулю или бесконечности. Его можно характеризовать, как уже отмечено, своими граничными условиями; это дает большее физическое представление. При записи граничных условий примем, что фаза A находится в условиях, отличных от условий для двух других фаз, т. е. она является, как говорят, особой фазой.

Для общности решения будем считать, что замыкание между фазами или между фазами и землей происходит через дугу с активным сопротивлением r_d .

Приводимые выводы, естественно, предполагают, что рассматриваются только основные гармоники тока и напряжения (см. § 12-3). При этом схемы отдельных последовательностей приведены к элементарному виду относительно места короткого замыкания, т. е. найдены результирующая э. д. с. $\dot{E}_\Sigma$ и результирующие сопротивления $Z_{1\Sigma}$, $Z_{2\Sigma}$, $Z_{0\Sigma}$.

Чтобы упростить запись, будем опускать индекс вида короткого замыкания, сохраняя его только в записи

граничных условий и окончательных результатов выводов.

Случай простого замыкания на землю рассмотрен в конце главы.

15-2. ДВУХФАЗНОЕ КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ

Двухфазное короткое замыкание, например, между фазами B и C через дугу с сопротивлением r_d (рис. 15-2,а) можно рассматривать как глухое двухфазное короткое замыкание на ответвлении, фазы которого имеют одинаковые сопротивления $r_d/2$ (рис. 15-2,б). Таким приемом несимметричный участок трехфазной цепи приведен к симметричному, что облегчает применение метода симметричных составляющих (см. § 12-3). Введение сопротивления $r_d/2$ в фазу A , очевидно, не меняет условий замыкания, поскольку на данном участке ток в этой фазе отсутствует.

Запишем граничные условия для рассматриваемого вида короткого замыкания:

$$\dot{I}_{KA}^{(2)} = 0; \quad (15-5)$$

$$\dot{I}_{KB}^{(2)} = -\dot{I}_{KC}^{(2)}, \quad (15-6)$$

разность фазных напряжений поврежденных фаз:

в точке K (рис. 15-2,б)

$$\dot{U}_{KB}^{(2)} - \dot{U}_{KC}^{(2)} = 0; \quad (15-7)$$

в точке K' (рис. 15-2,б)

$$\dot{U}_{K'B}^{(2)} - \dot{U}_{K'C}^{(2)} = \dot{I}_{KB}^{(2)} r_d. \quad (15-7a)$$

Поскольку система токов уравновешенная, $\dot{I}_{K0} = 0$. Следовательно, (15-5) можно записать через симметричные составляющие как

$$\dot{I}_{KA} = \dot{I}_{KA1} + \dot{I}_{KA2} = 0, \quad (15-8)$$

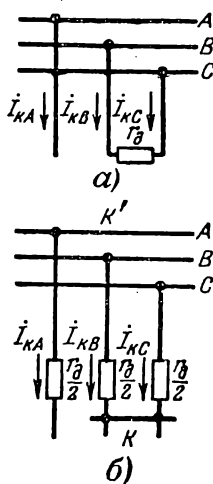


Рис. 15-2. Двухфазное короткое замыкание через дугу.

а — исходная схема; б — эквивалентная симметричная схема.

откуда

$$i_{KA2} = -i_{KA1}.$$

Выразим $\dot{U}_{KB}$ и $\dot{U}_{KC}$ через симметричные составляющие напряжения фазы А.

Тогда (15-7) будет:

$$\begin{aligned} a^2 \dot{U}_{KA1} + a \dot{U}_{KA2} + \dot{U}_{K0} - a \dot{U}_{KA1} - a^2 \dot{U}_{KA2} - \dot{U}_{K0} = \\ = (a^2 - a)(\dot{U}_{KA1} - \dot{U}_{KA2}) = 0, \end{aligned}$$

откуда

$$\dot{U}_{KA2} = \dot{U}_{KA1}. \quad (15-9)$$

Последнее соотношение позволяет приравнять правые части (12-4) и (12-5), где результирующие сопротивления должны быть увеличены на $\frac{r_d}{2}$, т. е.

$$\dot{E}_{A\Sigma} - \left(Z_{1\Sigma} + \frac{r_d}{2} \right) i_{KA1} = - \left(Z_{2\Sigma} + \frac{r_d}{2} \right) i_{KA2},$$

откуда, имея в виду (15-8), после простых преобразований получим:

$$i_{KA1}^{(2)} = \frac{\dot{E}_{A\Sigma}}{Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + r_d}. \quad (15-10)$$

Токи поврежденных фаз в месте короткого замыкания легко выразить через $i_{KA1}^{(2)}$, т. е.

$$\begin{aligned} i_{KB}^{(2)} = a^2 i_{KA1}^{(2)} + a i_{KA2}^{(2)} = (a^2 - a) i_{KA1}^{(2)} = \\ = j \sqrt{3} i_{KA1}^{(2)} \end{aligned} \quad (15-11)$$

и

$$i_{KC}^{(2)} = -i_{KB}^{(2)} = -j \sqrt{3} i_{KA1}^{(2)}. \quad (15-11a)$$

Симметричные составляющие напряжений в точке К (рис. 15-2,б) согласно (12-5), (15-8) и (15-9) с учетом r_d

$$\dot{U}_{KA2} = - \left(Z_{2\Sigma} + \frac{r_d}{2} \right) i_{KA2} = \left(Z_{2\Sigma} + \frac{r_d}{2} \right) i_{KA1} = \dot{U}_{KA1}. \quad (15-12)$$

Что касается напряжения $\dot{U}_{K0}$, то, вообще говоря, оно может иметь произвольное значение, так как при рас-

сма́триваемом виде короткого замыкания смещение нейтральной системы относительно земли не влияет на величины токов. Поскольку в данном случае для токов путь через землю отсутствует, т. е. $Z_{0\Sigma} = \infty$, по (12-6) имеем:

$$\dot{U}_{к0}^{(2)} = -Z_{0\Sigma} i_{к0}^{(2)} = -\infty \cdot 0 \text{ — неопределенность.}$$

Фазные напряжения (относительно нейтрали системы) в точке K равны:

$$\dot{U}_{кA}^{(2)} = \dot{U}_{кA1}^{(2)} + \dot{U}_{кA2}^{(2)} = 2\dot{U}_{кA1}^{(2)} = 2\left(Z_{2\Sigma} + \frac{r_d}{2}\right) i_{кA1}^{(2)}; \quad (15-13)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{кB}^{(2)} = \dot{U}_{кC}^{(2)} &= a^2 \dot{U}_{кA1}^{(2)} + a \dot{U}_{кA2}^{(2)} = (a^2 + a) \dot{U}_{кA1}^{(2)} = \\ &= -\dot{U}_{кA1}^{(2)} = -\frac{\dot{U}_{кA}^{(2)}}{2}. \end{aligned} \quad (15-14)$$

Симметричные составляющие напряжений за сопротивлением дуги r_d (точка K') равны:

$$\dot{U}_{к'A1}^{(2)} = (r_d + Z_{2\Sigma}) i_{кA1}^{(2)}; \quad (15-15)$$

$$\dot{U}_{к'A2}^{(2)} = Z_{2\Sigma} i_{кA1}^{(2)}. \quad (15-16)$$

Полученные выражения позволяют легко построить векторные диаграммы напряжений и токов в месте короткого замыкания. Такие диаграммы приведены на рис. 15-3. Они построены при условии, что вся цепь содержит только индуктивные сопротивления, кроме сопротивления дуги r_d . Следует отметить, что при изменении r_d концы векторов токов и напряжений перемещаются по дугам соответствующих окружностей, что вытекает из структуры выражений для этих векторов [Л. 105]. Стрелки на дугах окружностей рис. 15-3 указывают направления перемещения концов этих векторов при увеличении r_d от нуля в пределе до бесконечности. Поскольку дуга учтена чисто активным сопротивлением, ток $i_{кB}^{(2)}$ совпадает по фазе с линейным напряжением $\dot{U}_{к'BC}^{(2)}$. При данном виде короткого замыкания нейтраль системы остается в центре тяжести треугольника линейных напряжений независимо от степени

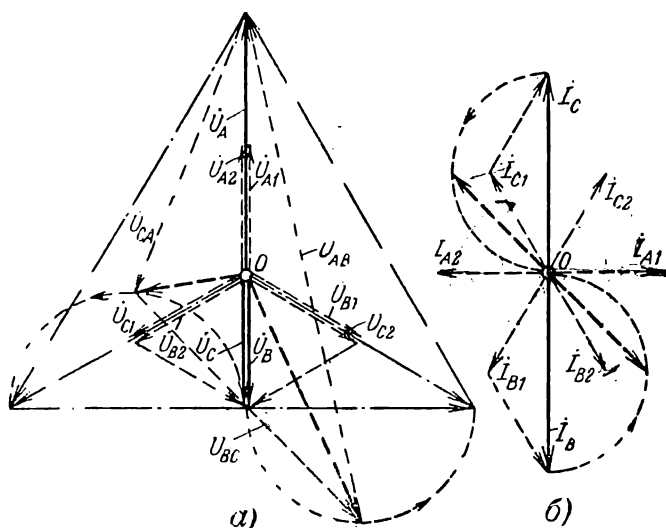


Рис. 15-3. Векторные диаграммы напряжений (а) и токов (б) в месте двухфазного короткого замыкания.

деформации последнего, даже в пределе (при $r_d = 0$), когда он превращается в прямую (сумма отрезков U_B и U_C уравнивает отрезок U_A).

Пример 15-1. При замыкании фаз B и C через дугу определить фазные токи и напряжения в месте повреждения. Относительные базисные величины э. д. с. и сопротивлений составляют:

$$\dot{E}_{A\Sigma} = j1; Z_{1\Sigma} = j0,4; Z_{2\Sigma} = j0,5 \text{ и } r_d = 0,35.$$

По (15-10) находим:

$$\dot{I}_{KA1} = \frac{j1}{0,35 + j(0,4 + 0,5)} = 1,04 \angle 21,5^\circ;$$

и по (15-11)

$$\dot{I}_{KB} = -j\sqrt{3} \cdot 1,04 \angle 21,5^\circ = 1,8 \angle -68,5^\circ = -\dot{I}_{KC}.$$

По (15-15) и (15-16) симметричные составляющие напряжения фазы A за сопротивлением дуги будут:

$$\dot{U}_{K'A1} = (0,35 + j0,5) \cdot 1,04 \angle 21,5^\circ = 0,635 \angle 76,5^\circ;$$

$$\dot{U}_{K'A2} = j0,5 \cdot 1,04 \angle 21,5^\circ = 0,52 \angle 111,5^\circ.$$

Искомые фазные напряжения:

$$\dot{U}_{K'A} = 0,635 \angle 76,5^\circ + 0,52 \angle 111,5^\circ = 1,09 \angle 92,5^\circ;$$

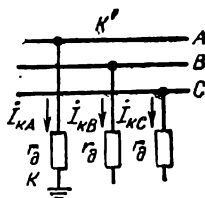
$$\dot{U}_{K'B} = a^2 \cdot 0,635 \angle 76,5^\circ + a \cdot 0,52 \angle 111,5^\circ = 0,85 \angle -81^\circ;$$

$$\dot{U}_{K'C} = a \cdot 0,635 \angle 76,5^\circ + a^2 \cdot 0,52 \angle 111,5^\circ = 0,28 \angle -110^\circ.$$

Линейное напряжение $\dot{U}_{K'BC} = 0,85 \angle -81^\circ - 0,28 \angle -110^\circ = 0,63 \angle -68,5^\circ$; его можно получить проще, как $\dot{U}_{K'BC} = 0,35 \times \times 1,8 \angle -68,5^\circ = 0,63 \angle -68,5^\circ$.

15-3. ОДНОФАЗНОЕ КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ

При замыкании на землю через дугу r_d одной фазы, допустим фазы A (рис. 15-4), граничные условия будут:



в точке K

$$i_{KB}^{(1)} = 0; \quad (15-17)$$

$$i_{KC}^{(1)} = 0; \quad (15-18)$$

$$\dot{U}_{KA}^{(1)} = 0; \quad (15-19)$$

Рис. 15-4. Однофазное короткое замыкание через дугу.

в точке K'

$$\dot{U}_{K'A}^{(1)} = r_d i_{KA}^{(1)}. \quad (15-19a)$$

Нетрудно убедиться, что при соблюдении условий (15-17) и (15-18) симметричные составляющие токов в месте короткого замыкания связаны простым соотношением:

$$i_{KA1} = i_{KA2} = i_{K0} = \frac{1}{3} i_{KA}. \quad (15-20)$$

Для заземленной фазы в соответствии с (15-19) можно написать:

$$\dot{U}_{KA} = \dot{U}_{KA1} + \dot{U}_{KA2} + \dot{U}_{K0} = 0,$$

или, подставляя сюда вместо симметричных составляющих напряжений их выражения (12-4) ÷ (12-6)* и учитывая (15-20), получим:

$$\dot{E}_{A\Sigma} - i_{KA1} (Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 3r_d) = 0,$$

* Где к каждому из результирующих сопротивлений должно быть прибавлено r_d .

откуда

$$j_{\kappa A1}^{(1)} = \frac{\dot{E}_{A\Sigma}}{Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 3r_d}. \quad (15-21)$$

Ток в поврежденной фазе в месте короткого замыкания

$$j_{\kappa A1}^{(1)} = 3j_{\kappa A1}^{(1)}. \quad (15-22)$$

Симметричные составляющие напряжений в точке K (рис. 15-4):

$$\dot{U}_{\kappa A1} = \dot{E}_{A\Sigma} - (r_d + Z_{1\Sigma}) i_{\kappa A1} = (Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 2r_d) i_{\kappa A1}; \quad (15-23)$$

$$\dot{U}_{\kappa A2} = 0 - (r_d + Z_{2\Sigma}) i_{\kappa A2} = -(Z_{2\Sigma} + r_d) i_{\kappa A1}; \quad (15-24)$$

$$\dot{U}_{\kappa 0} = 0 - (r_d + Z_{0\Sigma}) i_{\kappa 0} = -(Z_{0\Sigma} + r_d) i_{\kappa A1}; \quad (15-25)$$

за сопротивлением дуги r_d (точка K')

$$\dot{U}_{\kappa' A1} = (Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 3r_d) i_{\kappa A1}; \quad (15-26)$$

$$\dot{U}_{\kappa' A2} = -Z_{2\Sigma} i_{\kappa A1}; \quad (15-27)$$

$$\dot{U}_{\kappa' 0} = -Z_{0\Sigma} i_{\kappa A1}. \quad (15-28)$$

Фазные (относительно земли) напряжения в точке K

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\kappa B}^{(1)} = a^2 \dot{U}_{\kappa A1}^{(1)} + a \dot{U}_{\kappa A2}^{(1)} + \dot{U}_{\kappa 0}^{(1)} = [(a^2 - a) Z_{2\Sigma} + \\ + (a^2 - 1) Z_{0\Sigma} + a^2 3r_d] i_{\kappa A1}; \end{aligned} \quad (15-29)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\kappa C}^{(1)} = a \dot{U}_{\kappa A1}^{(1)} + a^2 \dot{U}_{\kappa A2}^{(1)} + \dot{U}_{\kappa 0}^{(1)} = [(a - a^2) Z_{2\Sigma} + \\ + (a - 1) Z_{0\Sigma} + a 3r_d] i_{\kappa A1}. \end{aligned} \quad (15-30)$$

В точке K' напряжения фаз B и C те же, так как $i_{\kappa B} = i_{\kappa C} = 0$, а напряжение фазы A

$$\dot{U}_{\kappa' A} = r_d i_{\kappa A} = 3r_d i_{\kappa A1}. \quad (15-31)$$

На рис. 15-5 приведены векторные диаграммы напряжений и токов в месте однофазного короткого замыкания (точка K'). Они построены, так же как и на рис. 15-3, в предположении, что цепь содержит чисто ин-

дуктивные сопротивления, за исключением сопротивления дуги r_d . При изменении последнего концы векторов токов и напряжений скользят по дугам соответствующих окружностей, как показано пунктиром.

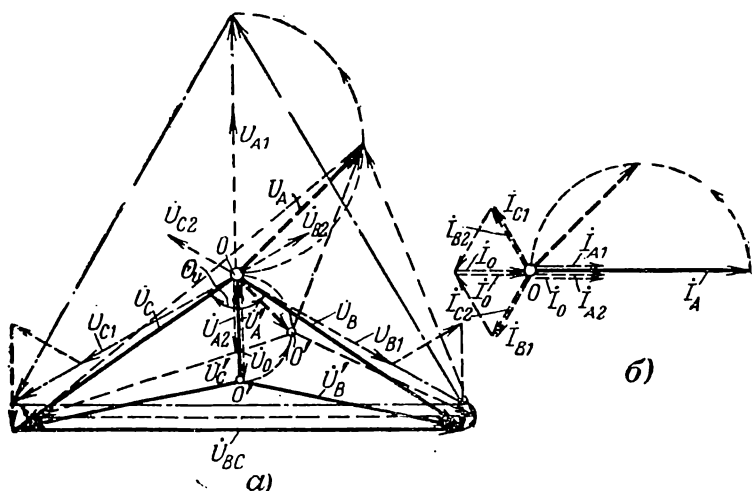


Рис. 15-5. Векторные диаграммы напряжений (а) и токов (б) в месте однофазного короткого замыкания.

Угол θ_U между напряжениями неповрежденных фаз зависит от соотношения между $Z_{2\Sigma}$ и $Z_{0\Sigma}$. Он изменяется в широких пределах:

$$60^\circ \leq \theta_U < 180^\circ.$$

Нижний предел соответствует условию $Z_{0\Sigma} = \infty$, т. е. когда замыкание на землю происходит в системе с изолированной нейтралью; к верхнему пределу угол θ_U стремится при $Z_{0\Sigma} \rightarrow 0$. Лишь в частном случае, при $Z_{2\Sigma} = Z_{0\Sigma}$, угол $\theta_U = 120^\circ$, т. е. сохраняет то же значение, что и в нормальном режиме.

Пример 15-2. При замыкании фазы A на землю через дугу определить ток и фазные напряжения в месте повреждения. Относительные базисные величины э. д. с. и сопротивлений:

$$\dot{E}_{Ax} = j1; Z_{1\Sigma} = j0,4; Z_{2\Sigma} = j0,5; Z_{0\Sigma} = j0,25; r_d = 0,35.$$

Ток прямой последовательности по (15-21)

$$I_{KA1} = \frac{j1}{3 \cdot 0,35 + j(0,4 + 0,5 + 0,25)} = 0,64 \angle 42,5^\circ;$$

ток поврежденной фазы

$$I_{KA} = 3 \cdot 0,64 \angle 42,5^\circ = 1,92 \angle 42,5^\circ.$$

Симметричные составляющие напряжений за сопротивлением дуги по (15-26) — (15-28):

$$\dot{U}_{K'A1} = [3 \cdot 0,35 + j(0,5 + 0,25)] \cdot 0,64 \angle 42,5^\circ = 0,83 \angle 78^\circ;$$

$$\dot{U}_{K'A2} = -j0,5 \cdot 0,64 \angle 42,5^\circ = 0,32 \angle -47,5^\circ;$$

$$\dot{U}_{K'0} = -j0,25 \cdot 0,64 \angle 42,5^\circ = 0,16 \angle -47,5^\circ.$$

Искомые фазные напряжения:

$$\dot{U}_{K'A} = 0,35 \cdot 1,92 \angle 42,5^\circ = 0,67 \angle 42,5^\circ;$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{K'B} &= a^2 \cdot 0,83 \angle 78^\circ + a \cdot 0,32 \angle -47,5^\circ + 0,16 \angle -47,5^\circ = \\ &= 0,86 \angle -23^\circ; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{K'C} &= a \cdot 0,83 \angle 78^\circ + a^2 \cdot 0,32 \angle -47,5^\circ + 0,16 \angle -47,5^\circ = \\ &= 1,1 \angle -154^\circ. \end{aligned}$$

15-4. ДВУХФАЗНОЕ КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ НА ЗЕМЛЮ

Представим себе (рис. 15-6), что одновременно две фазы, например *B* и *C*, замкнулись между собой через сопротивления дуг r_d и их общая точка через сопротивление $r_{д.з}$ дополнительно замкнулась на землю. Этот вид повреждения характеризуется следующими граничными условиями:

$$I_{KA}^{(1,1)} = 0; \quad (15-32)$$

$$\dot{U}_{KB}^{(1,1)} = r_{д.з} I_B; \quad (15-33)$$

$$\dot{U}_{KC}^{(1,1)} = r_{д.з} I_C. \quad (15-34)$$

Коль скоро согласно (15-33) и (15-34) фазные напряжения поврежденных фаз в точке *K* одинаковы ($\dot{U}_{KB} = \dot{U}_{KC}$), то аналогично (15-9)

$$\dot{U}_{KA1} = \dot{U}_{KA2}. \quad (15-35)$$

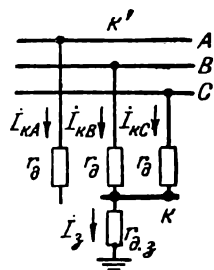


Рис. 15-6. Двухфазное короткое замыкание на землю через дуги.

С другой стороны, используя (15-33) или (15-34) и (12-6), можно записать:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{KB} &= a^2 \dot{U}_{KA1} + a \dot{U}_{KA2} + \dot{U}_{K0} = -\dot{U}_{KA1} + \dot{U}_{K0} = 3\dot{I}_{K0} r_{д.з} = \\ &= -\frac{\dot{U}_{K0}}{Z_{0\Sigma} + r_d} \cdot 3r_{д.з},\end{aligned}$$

откуда

$$\dot{U}_{K0} = \frac{Z_{0\Sigma} + r_d}{Z_{0\Sigma} + r_d + 3r_{д.з}} \dot{U}_{KA1}. \quad (15-36)$$

Теперь, записав (15-32) через симметричные составляющие тока и выразив последние согласно (12-4)—(12-6) с учетом (15-35) и (15-36), получим уравнение с одним неизвестным:

$$\frac{\dot{E}_{A\Sigma} - \dot{U}_{KA1}}{Z_{1\Sigma} + r_d} + \frac{0 - \dot{U}_{KA1}}{Z_{2\Sigma} + r_d} + \frac{0 - \dot{U}_{KA1}}{Z_{0\Sigma} + r_d + 3r_{д.з}} = 0,$$

откуда

$$\dot{U}_{KA1} = \frac{\dot{E}_{A\Sigma} [(Z_{2\Sigma} + r_d) \parallel (Z_{0\Sigma} + r_d + 3r_{д.з})]}{(Z_{1\Sigma} + r_d) + [(Z_{2\Sigma} + r_d) \parallel (Z_{0\Sigma} + r_d + 3r_{д.з})]}. \quad (15-37)$$

Следовательно, по (12-4) после преобразований для тока прямой последовательности имеем:

$$I_{KA1}^{(1,1)} = \frac{\dot{E}_{A\Sigma}}{(Z_{1\Sigma} + r_d) + [(Z_{2\Sigma} + r_d) \parallel (Z_{0\Sigma} + r_d + 3r_{д.з})]} \quad (15-38)$$

и соответственно (15-37) можно записать в ином виде:

$$\dot{U}_{KA1}^{(1,1)} = [(Z_{2\Sigma} + r_d) \parallel (Z_{0\Sigma} + r_d + 3r_{д.з})] I_{KA1}^{(1,1)}. \quad (15-37a)$$

Далее, не представляет трудностей выразить токи $I_{KA2}^{(1,1)}$ и $I_{K0}^{(1,1)}$ через ток $I_{KA1}^{(1,1)}$:

$$I_{KA2}^{(1,1)} = -\frac{(Z_{0\Sigma} + r_d + 3r_{д.з})}{(Z_{2\Sigma} + r_d) + (Z_{0\Sigma} + r_d + 3r_{д.з})} I_{KA1}^{(1,1)}, \quad (15-39)$$

$$I_{K0}^{(1,1)} = -\frac{Z_{2\Sigma} + r_d}{(Z_{2\Sigma} + r_d) + (Z_{0\Sigma} + r_d + 3r_{д.з})} I_{KA1}^{(1,1)}. \quad (15-40)$$

Токи в поврежденных фазах:

$$I_{KB}^{(1,1)} = \left[a^2 - \frac{Z_{2\Sigma} + r_d + a(Z_{0\Sigma} + r_d + 3r_{d,3})}{(Z_{2\Sigma} + r_d) + (Z_{0\Sigma} + r_d + 3r_{d,3})} \right] I_{KA1}^{(1,1)}, \quad (15-41)$$

$$I_{KC}^{(1,1)} = \left[a - \frac{Z_{2\Sigma} + r_d + a^2(Z_{0\Sigma} + r_d + 3r_{d,3})}{(Z_{2\Sigma} + r_d) + (Z_{0\Sigma} + r_d + 3r_{d,3})} \right] I_{KA1}^{(1,1)}. \quad (15-42)$$

Ток в земле

$$I_3^{(1,1)} = 3I_{K0}^{(1,1)} = - \frac{3(Z_{2\Sigma} + r_d) I_{KA1}^{(1,1)}}{(Z_{2\Sigma} + r_d) + (Z_{0\Sigma} + r_d + 3r_{d,3})}. \quad (15-43)$$

Фазные напряжения (относительно земли) в точке К:

$$\dot{U}_{KA}^{(1,1)} = 3\dot{U}_{KA1}^{(1,1)} \frac{Z_{0\Sigma} + r_d + 2r_{d,3}}{Z_{0\Sigma} + r_d + 3r_{d,3}}; \quad (15-44)$$

$$\dot{U}_{KB}^{(1,1)} = \dot{U}_{KC}^{(1,1)} = - \frac{3r_{d,3}}{Z_{0\Sigma} + r_d + 3r_{d,3}} U_{KA1}^{(1,1)}. \quad (15-45)$$

В точке K' (за сопротивлением дуги) напряжение фазы А то же, что и в точке К, а напряжения двух других фаз будут:

$$\dot{U}_{K'B}^{(1,1)} = \dot{U}_{KB}^{(1,1)} + r_d \dot{I}_{KB}; \quad (15-46)$$

$$\dot{U}_{K'C}^{(1,1)} = \dot{U}_{KC}^{(1,1)} + r_d \dot{I}_{KC}. \quad (15-47)$$

При отсутствии всех активных сопротивлений модуль выражений в квадратных скобках в (15-41) и (15-42) составляет

$$\left| a^2 - \frac{x_{2\Sigma} + ax_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} \right| = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{2\Sigma} x_{0\Sigma}}{(x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})^2}} = m^{(1,1)}. \quad (15-48)$$

В зависимости от соотношения между $x_{2\Sigma}$ и $x_{0\Sigma}$ значение $m^{(1,1)}$ находится в пределах

$$1,5 \leq m^{(1,1)} \leq 3.$$

Нижний предел наступает при $x_{2\Sigma} = x_{0\Sigma}$, а верхний — при $\frac{x_{2\Sigma}}{x_{0\Sigma}}$, равном 0 или ∞ .

Векторные диаграммы напряжений и токов в месте двухфазного замыкания на землю приведены на рис. 15-7. Они построены, как и ранее приведенные, при условии, что цепь является чисто индуктивной, за исключением сопротивления дуги, причем здесь принято $r_{д.з}=0$.

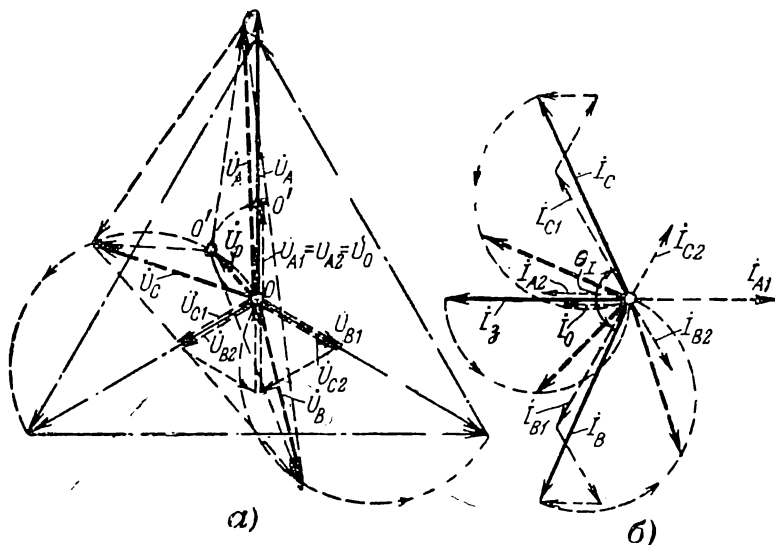


Рис. 15-7. Векторные диаграммы напряжений (а) и токов (б) в месте двухфазного короткого замыкания на землю.

С изменением r_d концы векторов токов и напряжений скользят по дугам соответствующих окружностей. Угол θ_1 между токами поврежденных фаз может изменяться в пределах

$$60^\circ < \theta_1 \leq 180^\circ,$$

стремясь к нижнему пределу при $Z_{0\Sigma} \rightarrow 0$ и к верхнему при $Z_{0\Sigma} \rightarrow \infty$, что соответствует условиям обычного двухфазного короткого замыкания без замыкания на землю.

Пример 15-3. При замыкании фаз В и С через независимые, но одинаковые дуги на землю определить фазные токи и напряжения в месте повреждения. Исходные данные те же, что и в примере 15-2, т. е. $\dot{E}_{A\Sigma} = j1$; $Z_{1\Sigma} = j0,4$; $Z_{2\Sigma} = j0,5$; $Z_{0\Sigma} = j0,25$; $r_d = 0,35$; сопротивление $r_{д.з} = 0$.

По (15-38)

$$I_{KA1} = \frac{j1}{(0,35 + j0,4) + [(0,35 + j0,5) \parallel (0,35 + j0,25)]} = 1,27 \angle 43^\circ,$$

а по (15-39) и (15-40)

$$I_{KA2} = - \frac{(0,35 + j0,25)}{(0,35 + j0,5) + (0,35 + j0,25)} \cdot 1,27 \angle 43^\circ = 0,53 \angle -148^\circ;$$

$$I_{K0} = - \frac{(0,35 + j0,5)}{(0,35 + j0,5) + (0,35 + j0,25)} \cdot 1,27 \angle 43^\circ = 0,76 \angle -129^\circ.$$

Фазные токи:

$$I_{KA} = 0;$$

$$I_{KB} = a^2 \cdot 1,27 \angle 43^\circ + a \cdot 0,53 \angle -148^\circ + 0,76 \angle -129^\circ = \\ = 2,10 \angle -82^\circ;$$

$$I_{KC} = a \cdot 1,27 \angle 43^\circ + a^2 \cdot 0,53 \angle -148^\circ + 0,76 \angle -129^\circ = \\ = 1,74 \angle 170^\circ.$$

Симметричные составляющие напряжения фазы А в точке К' по (15-37а), (12-5) и (12-6):

$$\dot{U}_{K'A1} = \{0,35 + [(0,35 + j0,4) \parallel (0,35 + j0,25)]\} \cdot 1,27 \angle 43^\circ = \\ = 0,72 \angle 61^\circ;$$

$$\dot{U}_{K'A2} = -j0,5 \cdot 0,53 \angle -148^\circ = 0,27 \angle 122^\circ;$$

$$\dot{U}_{K'0} = -j0,25 \cdot 0,76 \angle -129^\circ = 0,19 \angle 141^\circ;$$

фазные напряжения:

$$\dot{U}_{K'A} = 0,72 \angle 61^\circ + 0,27 \angle 122^\circ + 0,19 \angle 141^\circ = 0,97 \angle 85^\circ;$$

$$\dot{U}_{K'B} = 0,35 \cdot 2,1 \angle -82^\circ = 0,74 \angle -82^\circ;$$

$$\dot{U}_{K'C} = 0,35 \cdot 1,74 \angle 170^\circ = 0,61 \angle 170^\circ.$$

15-5. ПРАВИЛО ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ ПРЯМОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Обращаясь к полученным в предыдущих параграфах выражениям для симметричных составляющих токов и напряжений в месте несимметричного короткого замыкания, которые для большей наглядности сведены в табл. 15-1, замечаем, что токи обратной и нулевой последовательностей и напряжения всех последовательностей пропорциональны току прямой последовательности в месте короткого замыкания. Следовательно, задача

Симметричные составляющие токов и напряжений в месте несимметричных коротких замыканий

Определение величин и их обозначения	Виды коротких замыканий		
	двухфазное (рис. 15-2)	однофазное (рис. 15-4)	двухфазное на землю (рис. 15-6)
Ток прямой последовательности	I_{A1}	$\frac{\dot{E}_{A\Sigma}}{Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 3r_{\pi}}$	$\frac{\dot{E}_{A\Sigma}}{Z_{1\Sigma} + r_{\pi} + [(Z_{2\Sigma} + r_{\pi}) // (Z_{0\Sigma} + r_{\pi} + 3r_{\pi.3})]}$
Ток обратной последовательности	I_{A2}	I_{A1}	$-\frac{(Z_{0\Sigma} + r_{\pi} + 3r_{\pi.3})}{(Z_{2\Sigma} + r_{\pi}) + (Z_{0\Sigma} + r_{\pi} + 3r_{\pi.3})} I_{A1}$
Ток нулевой последовательности	I_0	I_{A1}	$-\frac{(Z_{2\Sigma} + r_{\pi})}{(Z_{2\Sigma} + r_{\pi}) + (Z_{0\Sigma} + r_{\pi} + 3r_{\pi.3})} I_{A1}$
Напряжение прямой последовательности	$\dot{U}_{A1}$	$(Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 3r_{\pi}) I_{A1}$	$[r_{\pi} + (Z_{2\Sigma} + r_{\pi}) // (Z_{0\Sigma} + r_{\pi} + 3r_{\pi.3})] I_{A1}$
Напряжение обратной последовательности	$\dot{U}_{A2}$	$-Z_{2\Sigma} I_{A1}$	$\frac{Z_{2\Sigma} (Z_{0\Sigma} + r_{\pi} + 3r_{\pi.3})}{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 2r_{\pi} + 3r_{\pi.3}} I_{A1}$
Напряжение нулевой последовательности	$\dot{U}_0$	$-Z_{0\Sigma} I_{A1}$	$\frac{Z_{0\Sigma} (Z_{2\Sigma} + r_{\pi})}{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 2r_{\pi} + 3r_{\pi.3}} I_{A1}$

расчета любого несимметричного короткого замыкания прежде всего состоит в нахождении тока прямой последовательности в месте рассматриваемого вида короткого замыкания.

В свою очередь структура (15-10), (15-21) и (15-38) позволяет ток прямой последовательности особой фазы (A) при любом (n) виде несимметричного короткого замыкания выразить в общем виде как

$$j_{кА1}^{(n)} = \frac{\dot{E}_{A\Sigma}}{Z_{1\Sigma} + Z_{\Delta}^{(n)}}, \quad (15-49)$$

где $Z_{\Delta}^{(n)}$ — дополнительное сопротивление, величина которого для каждого вида короткого замыкания определяется соответствующим выражением из табл. 15-2.

Т а б л и ц а 15-2

Значения дополнительного сопротивления $Z_{\Delta}^{(n)}$
и коэффициента $m^{(n)}$

Вид короткого замыкания	(n)	$Z_{\Delta}^{(n)}$	$m^{(n)}$
Трёхфазное	(3)	0	1
Двухфазное	(2)	$Z_{2\Sigma} + r_{\text{д}}$	$\sqrt{3}$
Однофазное	(1)	$Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 3r_{\text{д}}$	3
Двухфазное на землю	(1, 1)	$r_{\text{д}} + (Z_{2\Sigma} + r_{\text{д}}) // (Z_{0\Sigma} + r_{\text{д}} + 3r_{\text{д.з}})$	$\left a^2 - \frac{Z_{2\Sigma} + r_{\text{д}} + a(Z_{0\Sigma} + r_{\text{д}} + 3r_{\text{д.з}})}{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 2r_{\text{д}} + 3r_{\text{д.з}}} \right $
То же при $r_{\text{д}}=0$ и $r_{\text{д.з}}=0$	(1, 1)	$x_{2\Sigma} // x_{0\Sigma}$	$\sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{2\Sigma} x_{0\Sigma}}{(x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})^2}}$

Помимо того, коль скоро по (15-11а), (15-22) и (15-41) [или (15-42)] фазные токи в месте короткого замыкания также пропорциональны току прямой последовательности, модуль фазного тока в месте любого (n) несимметричного короткого замыкания в общем виде можно представить как

$$I_{\text{к}}^{(n)} = m^{(n)} I_{\text{к1}}^{(n)}, \quad (15-50)$$

где $m^{(n)}$ — коэффициент, определяемый по данным табл. 15-2.

Обобщенная запись выражения (15-49) позволила Н. Н. Щедрину впервые сформулировать следующее весьма важное положение¹.

Ток прямой последовательности любого несимметричного короткого замыкания может быть определен как ток при трехфазном коротком замыкании в точке, удаленной от действительной точки короткого замыкания на дополнительное сопротивление $Z_{\Delta}^{(n)}$, которое не зависит от параметров схемы прямой последовательности и для каждого вида короткого замыкания определяется результирующими сопротивлениями обратной и нулевой последовательностей относительно рассматриваемой точки схемы.

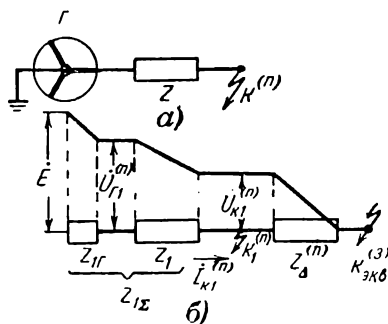


Рис. 15-8. Несимметричное короткое замыкание (а) и эквивалентное трехфазное короткое замыкание (б) для определения величин токов и напряжений прямой последовательности.

Приведенное положение, которое называют правилом эквивалентности прямой последовательности, справедливо при условии, что рассматривается только основная гармоника тока несимметричного короткого замыкания.

Сопоставляя множители перед током I_{K1} в выражениях для напряжения прямой последовательности $\dot{U}_{K1}$ (см. табл. 15-1) со значениями $Z_{\Delta}^{(n)}$ по табл. 15-2, легко заметить, что это напряжение можно записать в общем виде:

$$\dot{U}_{K1}^{(n)} = Z_{\Delta}^{(n)} \dot{I}_{K1}^{(n)}. \quad (15-51)$$

Для большей наглядности рис. 15-8 иллюстрирует смысл эквивалентного трехфазного короткого замыкания, при котором могут быть найдены ток и напряжение прямой последовательности в месте заданного несимметричного короткого замыкания.

Установленная идентичность между током прямой по-

¹ См. СЭТ, т. 2, Изд. КУБУЧ, 1930.

следовательности несимметричного короткого замыкания и током при некотором эквивалентном трехфазном коротком замыкании указывает, что все полученные ранее выражения для тока трехфазного короткого замыкания и практические методы его вычисления можно распространить на случаи несимметричных коротких замыканий, т. е. для расчета последних не нужно дополнительно создавать какие-либо специальные методы, если поставленная задача ограничена учетом лишь основной гармоники.

Так, при отсутствии демпферных обмоток постоянную времени затухания свободного переходного тока прямой последовательности любого (n) вида короткого замыкания при чисто индуктивной цепи статора можно определять по выражению (7-73), записанному в общем виде:

$$T'_d{}^{(n)} = T_{f0} \frac{x'_d + x_{вн1} + x_{\Delta}^{(n)}}{x_d + x_{вн1} + x_{\Delta}^{(n)}}, \quad (15-52)$$

где $x_{вн1}$ — внешняя реактивность схемы прямой последовательности;

x_{Δ} — дополнительная реактивность для данного вида короткого замыкания, определяемая аналогично $Z_{\Delta}^{(n)}$ (табл. 15-2), но при $r=0$.

При наличии демпферных обмоток приближенные значения постоянных времени затухания свободных переходного и сверхпереходного токов прямой последовательности любого вида короткого замыкания в соответствии с (9-47) и (9-48) будут:

$$T'_d{}^{(n)} \approx T'_f{}^{(n)} + T'_{1d}{}^{(n)} \quad (15-53)$$

и

$$T''_d{}^{(n)} \approx \frac{\sigma'^{(n)} T'_f{}^{(n)} T'_{1d}{}^{(n)}}{T'_f{}^{(n)} + T'_{1d}{}^{(n)}}, \quad (15-53a)$$

где согласно § 7-9

$$T'_f{}^{(n)} = T_{f0} \frac{x'_f{}^{(n)}}{x_f};$$

$$T'_{1d}{}^{(n)} = T_{1d0} \frac{x'_{1d}{}^{(n)}}{x_{1d}};$$

$$\sigma'^{(n)} = \left(1 - \frac{x_{ad}'^{(n)2}}{x_f'^{(n)} x_{ld}'^{(n)}} \right);$$

здесь

$$x_{ad}'^{(n)} = \frac{(x_\sigma + x_{\text{вн1}} + x_\Delta^{(n)}) x_{ad}}{x_d + x_{\text{вн1}} + x_\Delta^{(n)}};$$

$$x_f'^{(n)} = x_{\sigma f} + x_{ad}'^{(n)};$$

$$x_{ld}'^{(n)} = x_{\sigma ld} + x_{ad}'^{(n)}.$$

Следовательно, изменение действующего значения продольного тока прямой последовательности в процессе любого несимметричного короткого замыкания можно представить по аналогии с (9-53а) и (9-71) как

$$\begin{aligned} I_{d1}^{(n)} = & I_{d1}^{(n)} + I_{d1\text{св } 0}^{(n)} e^{-\frac{t}{T_d'^{(n)}}} + I_{d1\text{св } 0}^{(n)} \times \\ & \times e^{-\frac{t}{T_d''^{(n)}}} + \Delta I_{d1\text{пр}}^{(n)} F_d^{(n)} \leq \frac{U_{\text{н}}}{x_{\text{вн1}} + x_\Delta^{(n)}}, \end{aligned} \quad (15-54)$$

причем данное выражение ограничено условием, что под действием АРВ напряжение прямой последовательности генератора не может превзойти нормальное значение.

Для мгновенного значения тока (фазы *A*) при произвольном виде короткого замыкания аналогично (9-67) имеем¹:

$$\begin{aligned} i_A^{(n)} = & m^{(n)} \left\{ i_{1A}^{(n)} - [U_{q0} \cos \gamma_0 + U_{d0} \sin \gamma_0] \times \right. \\ & \times \frac{x_{d\Sigma}''^{(n)} + x_{q\Sigma}''^{(n)}}{2x_{d\Sigma}''^{(n)} x_{q\Sigma}''^{(n)}} e^{-\frac{t}{T_{a.3}^{(n)}}} - [U_{q0} \cos (2t + \gamma_0) - \\ & \left. - U_{d0} \sin (2t + \gamma_0)] \frac{x_{q\Sigma}''^{(n)} - x_{d\Sigma}''^{(n)}}{2x_{d\Sigma}''^{(n)} x_{q\Sigma}''^{(n)}} e^{-\frac{t}{T_{a.3}^{(n)}}} \right\}, \end{aligned} \quad (15-55)$$

¹ Из высших гармоник учитывается только вторая.

где

$$x''_{a\Sigma}^{(n)} = x''_d + x_{\text{впн}} + x_{\Delta}^{(n)} \text{ и } x''_{q\Sigma}^{(n)} = x''_q + x_{\text{впн}} + x_{\Delta}^{(n)};$$

$i_{1A}^{(n)}$ — мгновенное значение тока прямой последовательности фазы A .

Для эквивалентной постоянной времени затухания апериодической слагающей тока статора при любом виде короткого замыкания согласно (9-14) можно написать выражение в общем виде:

$$T_{a.\Sigma}^{(n)} = \frac{x_{2\Sigma} + x_{\Delta}^{(n)}}{\omega(r_{\Sigma} + r_{\Delta}^{(n)})}, \quad (15-56)$$

где $r_{\Delta}^{(n)}$ — дополнительное активное сопротивление для данного вида короткого замыкания, определяемое, как и $x_{\Delta}^{(n)}$, но при $x=0$.

Важно обратить внимание, что величина тока прямой последовательности в месте короткого замыкания, а также связанные с ней величины токов других последовательностей зависят от сопротивлений всех последовательностей элементов рассматриваемой схемы (включая сопротивление дуги при ее учете). Так, например, если нейтраль генератора или трансформатора заземлить через какое-либо сопротивление, то при коротком замыкании одной или двух фаз на землю включение этого сопротивления скажется (если это сопротивление войдет в схему нулевой последовательности) на величинах токов всех последовательностей, хотя токи прямой и обратной последовательностей по нему и не протекают.

Пример 15-4. Для схемы рис. 15-9 определить наименьшую величину начального тока при однофазном коротком замыкании на линии. Реактивности всех элементов и э. д. с. генератора указаны на исходной схеме, причем их величины даны в относительных единицах при $S_6 = 100 \text{ Мва}$ и $U_6 = U_{\text{ср}}$.

Схемы замещения прямой и нулевой последовательностей показаны на том же рисунке, где n — относительная длина участка линии от трансформатора $T-1$ до предполагаемого места короткого замыкания. Схема обратной последовательности аналогична схеме прямой последовательности, с той лишь разницей, что в ней $E=0$ и вместо U_{K1} входит U_{K2} .

Резльтирующие реактивности до места короткого замыкания будут:

$$x_{1\Sigma} = 0,15 + 0,12 + 0,3n = 0,27 + 0,3n = x_{2\Sigma}$$

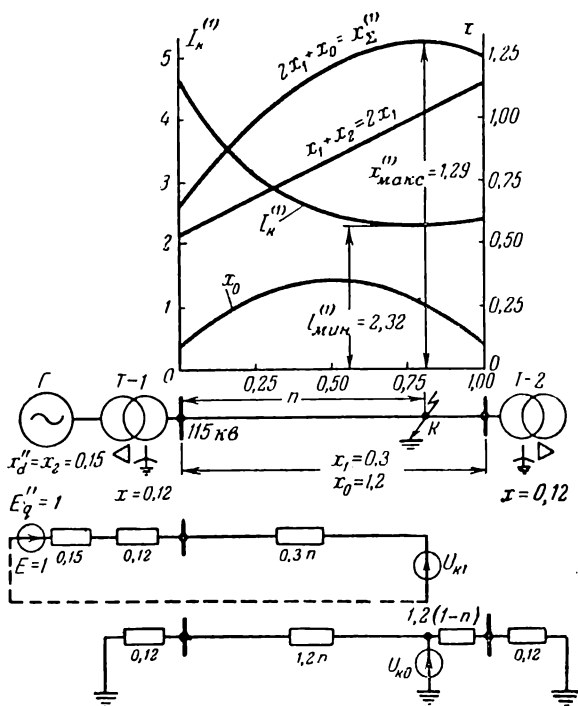


Рис. 15-9. К примеру 15-4.

и

$$x_{0\Sigma} = \frac{(0,12 + 1,2n) [0,12 + 1,2(1 - n)]}{0,12 + 1,2 + 0,12} = 0,11 + n - n^2.$$

Суммарная реактивность для определения тока прямой последовательности при однофазном коротком замыкании составляет

$$x_{\Sigma}^{(1)} = 2(0,27 + 0,3n) + (0,11 + n - n^2) = 0,65 + 1,6n - n^2.$$

Искомый минимум тока, очевидно, будет, когда $x_{\Sigma}^{(1)}$ достигнет своего максимума; его легко найти из условия

$$\frac{dx_{\Sigma}^{(1)}}{dn} = 1,6 - 2n = 0,$$

откуда

$$n = \frac{1,6}{2} = 0,8,$$

т. е.

$$x_{\Sigma \text{ макс}}^{(1)} = 0,65 + 1,6 \cdot 0,8 - 0,8^2 = 1,29.$$

Следовательно, искомый ток будет

$$I_K^{(1)} = 3 \frac{1}{1,29} = 2,32 \text{ или } I_K^{(1)} = 2,32 \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 115} = 1,16 \text{ ка.}$$

Для наглядности на рис. 15-9 построен график изменения $x_{\Sigma}^{(1)}$ (и его слагаемых) и тока $I_K^{(1)}$ в функции положения точки короткого замыкания на линии.

Интересно отметить, что если разземлить нейтраль трансформатора $T-I$ и для линии принять $x_0 = 2x_1$, то ток при однофазном коротком замыкании в любой точке линии, как нетрудно убедиться, будет одним и тем же.

15-6. КОМПЛЕКСНЫЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ

Установленные в предыдущих параграфах соотношения между симметричными составляющими напряжений в месте короткого замыкания позволяют для каждого вида короткого замыкания соединить вместе схемы отдельных последовательностей и образовать тем самым комплексную схему замещения для каждого вида короткого замыкания.

Такие схемы приведены на рис. 15-10. Они соответствуют особой фазе. В них соблюдаются не только соотношения между симметричными составляющими напряжений в месте короткого замыкания, но также соотношения между симметричными составляющими токов в месте короткого замыкания. Так, например, в схеме, соответствующей двухфазному короткому замыканию (рис. 15-10,а), для неповрежденной (особой) фазы соблюдены граничные условия, выраженные через симметричные составляющие, т. е. $\dot{U}_{F2} = \dot{U}_{K1}$ и $\dot{I}_{K1} + \dot{I}_{K2} = 0$.

Нужно иметь в виду, что в комплексной схеме для однофазного короткого замыкания (рис. 15-10,б) обеспечиваются правильные значения напряжений прямой последовательности в различных точках. Что касается напряжений обратной и нулевой последовательностей, то они должны определяться относительно точек нулевого потенциала схем соответствующих последовательностей, т. е. соответственно по отношению к точкам H_2 и H_0 , которые являются началами схем этих последовательностей.

Комплексная схема для двухфазного короткого замыкания на землю (рис. 15-10, в) при $Z_{0\text{з}} = \infty$ или $r_{\text{д.з}} = \infty$, как видно, переходит в комплексную схему для обычного двухфазного короткого замыкания.

Токи и напряжения в пределах схем отдельных последовательностей являются соответственно токами и на-

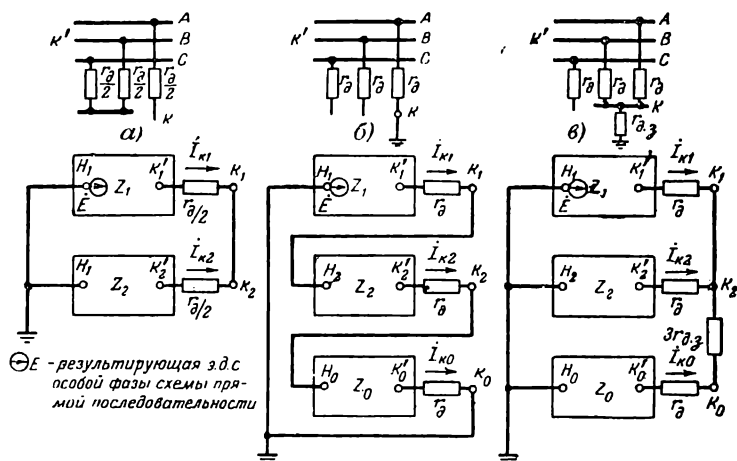


Рис. 15-10. Комплексные схемы замещения.

а — для двухфазного короткого замыкания через дугу; б — для однофазного короткого замыкания через дугу; в — для двухфазного короткого замыкания на землю через дугу.

пряжениями прямой, обратной и нулевой последовательностей.

В общем случае схема прямой последовательности содержит большое число источников. В схемах рис. 15-10 условно показана лишь одна результирующая э. д. с.

Как отмечалось в § 14-5, комплексные схемы замещения особенно удобны при использовании расчетных моделей и установок. В этом случае схему каждой последовательности набирают из сопротивлений, связывая их между собой проводниками согласно заданным условиям. Затем, соединив схемы отдельных последовательностей в комплексную схему для данного вида короткого замыкания и приложив к генераторным ветвям схемы прямой последовательности соответствующие э. д. с.,

замеряют по приборам токи и напряжения отдельных последовательностей для любого участка и любой точки рассчитываемой системы.

Для иллюстрации на рис. 15-11 показаны исходная схема и соответствующая ей комплексная схема замещения для однофазного короткого замыкания в точке K . Здесь использована расчетная модель постоянного тока. Реактивности элементов представлены соответствующими омическими сопротивлениями в принятом масштабе. Один полюс источника подведен к генераторным ветвям 1 и 2 схемы прямой последовательности (условно считая приведенные э. д. с. этих генераторов одинаковыми), а другой — к нулевой шине той же схемы. Показанные на рис. 15-11 приборы измеряют соответственно токи отдельных последовательностей в ветви 8 и напряжения отдельных последовательностей точки F .

Переход от симметричных составляющих к действительным фазным величинам с учетом имеющих место трансформаций производится согласно указаниям § 14-5.

Коль скоро метод симметричных составляющих применим к расчету переходных процессов (см. § 12-3), связанных с возникновением каких-либо несимметричных нарушений, комплексные схемы замещения, очевидно, справедливы также для переходных процессов. Это в сущности вытекает и из того, что комплексная схема отражает граничные условия, которыми характеризуется тот или иной вид несимметрии, а они не зависят от времени.

Запись граничных условий в области изображений ничем не отличается от записи их в оригиналах. Так, например, при замыкании фазы A на землю через дугу с сопротивлением r_d граничные условия в области изображений будут:

$$I_B(p) = I_C(p) = 0;$$

$$U_A(p) = r_d I_A(p),$$

что приводит к следующим соотношениям для изображений симметричных составляющих:

$$I_{A1}(p) = I_{A2}(p) = I_0(p);$$

$$U_{A1}(p) + U_{A2}(p) + U_0(p) = r_d [I_{A1}(p) + I_{A2}(p) + I_0(p)],$$

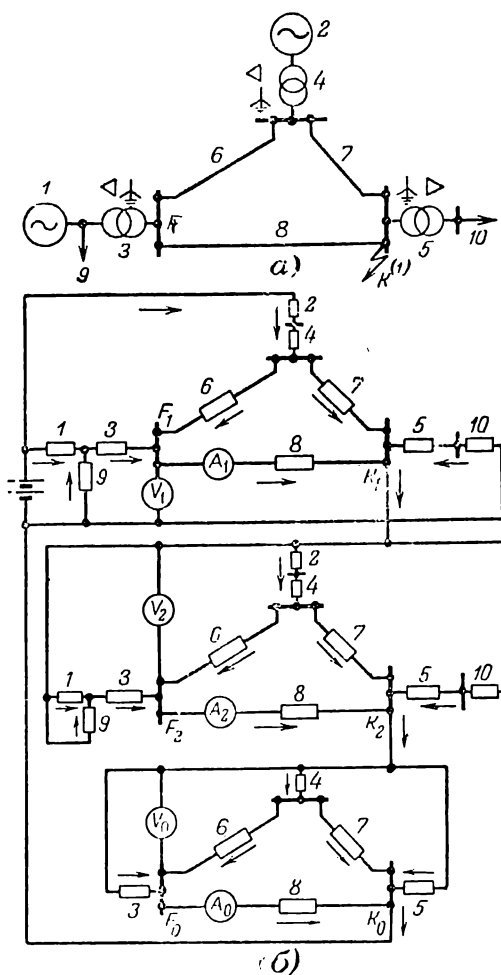


Рис. 15-11. Исходная схема (а) и соответствующая ей при однофазном коротком замыкании комплексная схема (б), собранная на расчетном столе постоянного тока.

которые полностью идентичны тем же соотношениям, полученным в § 15-3.

Используя принцип наложения (см. § 2-7), решение задачи всегда может быть сведено к решению при нулевых начальных условиях. Следовательно, в рассматриваемом случае однофазного короткого замыкания для определения собственно аварийной составляющей тока нужно рассчитать переходный процесс при включении напряжения $U(p)$ в комплексной схеме, как показано на рис. 15-12, где $Z(p)$ — операторные сопротивления соответствующих последовательностей, приведенные относительно места несимметрии. Напряжение $U(p)$ является изображением того напряжения, которое было в данной точке при предшествовавшем режиме, но взятое с обратным знаком. Для получения оригиналов симметричных составляющих по найденным изображениям могут быть использованы различные известные приемы (формула разложения, формула включения и др.). Конечный результат получается путем наложения предшествующего режима на найденные значения симметричных составляющих собственно аварийного режима.

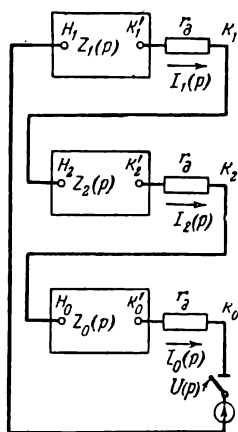


Рис. 15-12. Комплексная схема в операторной форме для однофазного короткого замыкания.

Изложенный путь решения соответствует условию, когда источник имеет бесконечную мощность, т. е. его напряжение не зависит от происходящего переходного процесса. Учет действительных условий и параметров генераторов, а также проявления автоматического регулирования возбуждения рассмотрен ниже.

Пример 15-5. При однофазном металлическом коротком замыкании в конце линии схемы рис. 15-13,а найти выражение для тока в месте короткого. Исходные данные приведены на рис. 15-13,а. Источником является система, которая поддерживает у трансформатора Т-1 синусоидальное напряжение постоянной амплитуды

$\sqrt{2} \cdot \frac{115}{\sqrt{3}}$ кв. Активными сопротивлениями трансформаторов пренебречь.

Комплексная схема замещения для рассматриваемого случая показана на рис. 15-13,б. Операторные сопротивления $Z(p) = r + Lp$ ее элементов выражены в именованных единицах и приведены к стороне 230 кВ.

Результатирующие операторные сопротивления отдельных последовательностей составляют:

$$Z_{1\Sigma}(p) = 21 + 0,13p + 0,17p = 21 + 0,3p = Z_{2\Sigma}(p);$$

$$Z_{0\Sigma}(p) = (36 + 0,48p + 0,17p) // (0,23p) = \frac{0,15p^2 + 8,15p}{0,88p + 36}.$$

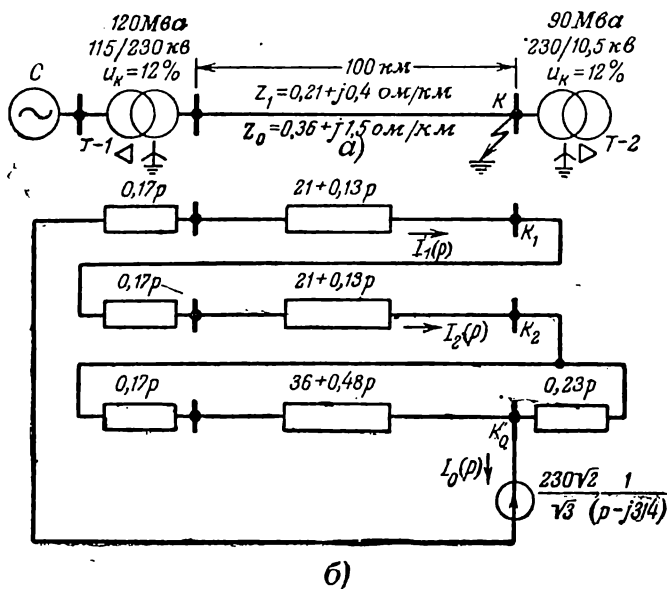


Рис. 15-13. К примеру 15-5.

а — исходная схема; б — комплексная схема в операторной форме.

Суммарное операторное сопротивление при однофазном коротком замыкании

$$Z_{(p)}^{(1)} = 2(21 + 0,3p) + \frac{0,15p^2 + 8,15p}{0,88p + 36} = \frac{p^2 + 100p + 2280}{1,32p + 54,5}.$$

Примем, что в момент короткого замыкания напряжение источника проходило через нуль. Тогда приведенное напряжение системы как функция времени и ее изображение будут:

$$u_A = \sqrt{2} \cdot \frac{230}{\sqrt{3}} \sin \omega t \doteq U_A(p) = \sqrt{2} \cdot \frac{230}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{p - j314}.$$

Искомый ток в операторной форме

$$I_A(p) = \sqrt{2} \cdot \frac{230}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1(1,32p + 54,5)}{(p - j314)(p^2 + 100p + 2280)} \cdot 3.$$

Для характеристического уравнения

$$Z_{(p)}^{(1)} = 0 = p^2 + 100p + 2280$$

находим корни:

$$p_{1,2} = \frac{-100 \pm \sqrt{100^2 - 4 \cdot 2280}}{2} = \frac{-100 \pm 29,7}{2},$$

т. е. $p_1 = -35,15$ и $p_2 = -64,85$.

Следовательно, при переходном процессе, помимо принужденного синусоидального тока, имеют место два свободных тока, затухающих экспоненциально с постоянными времени соответственно

$$T_1 = -\frac{1}{-35,15} = 2,8 \cdot 10^{-2} \text{ сек} \text{ и } T_2 = -\frac{1}{-64,85} = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ сек.}$$

Переходя любым известным методом от изображения к оригиналу, найдем искомое выражение тока в месте короткого замыкания:

$$i_A = 2340 \sin(\omega t - 0,44\pi) + 490e^{-\frac{t}{2,8}} + 1810e^{-\frac{t}{1,5}} \text{ а.}$$

При достижении положительной амплитуды вынужденного тока, что наступит через $t = \frac{(0,5 + 0,44)\pi}{314} = 0,94 \cdot 10^{-2} \text{ сек}$, мгновенное значение полного тока в поврежденной фазе составит

$$i_A = 2340 + 490e^{-\frac{0,94}{2,8}} + 1810e^{-\frac{0,94}{1,5}} = 3650 \text{ а.}$$

15.7. СРАВНЕНИЕ ВИДОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Правило эквивалентности прямой последовательности и установленные значения $Z_{\Delta}^{(n)}$ и $m^{(n)}$ (см. табл. 15-2) позволяют достаточно просто произвести сравнение различных видов короткого замыкания. Чтобы уменьшить выкладки, ограничимся таким сравнением при чисто индуктивной цепи, что для практических целей является наиболее актуальным.

Имея в виду, что короткие замыкания разных видов предполагаются происходящими поочередно в одной и той же точке системы и при одних и тех же исходных условиях (предшествующий режим, схема соединения элемен-

тов, система АРВ и т. д.), на основании данных табл. 15-2 можно написать, что между величинами дополнительных реактивностей $x_{\Delta}^{(n)}$ при разных видах короткого замыкания существуют следующие неравенства:

$$x_{\Delta}^{(1)} > x_{\Delta}^{(2)} > x_{\Delta}^{(1,1)} > x_{\Delta}^{(3)} = 0. \quad (15-57)$$

Следовательно, в соответствии с правилом эквивалентности прямой последовательности величины токов прямой последовательности в месте короткого замыкания при разных видах последнего находятся в иных соотношениях, т. е.

$$I_{\kappa 1}^{(1)} < I_{\kappa 1}^{(2)} < I_{\kappa 1}^{(1,1)} < I_{\kappa}^{(3)}, \quad (15-58)$$

а для напряжений прямой последовательности в месте короткого замыкания в зависимости от вида короткого, очевидно, имеем:

$$U_{\kappa 1}^{(1)} > U_{\kappa 1}^{(2)} > U_{\kappa 1}^{(1,1)} > U_{\kappa}^{(3)} = 0. \quad (15-59)$$

Далее, согласно (15-52) или (15-53) постоянные времени затухания свободного переходного тока при разных видах короткого замыкания связаны неравенствами

$$T_d'^{(1)} > T_d'^{(2)} > T_d'^{(1,1)} > T_d'^{(3)}. \quad (15-60)$$

В соответствии с (15-53,а) такими же неравенствами связаны постоянные времени затухания свободного сверхпереходного тока при разных видах короткого замыкания. Поскольку их величины относительно малы, часто при всех видах короткого замыкания для этой постоянной времени принимают некоторое среднее значение (порядка 0,05—0,15 сек).

Из (15-60) следует, что при коротком замыкании в одной и той же точке свободный переходный ток при трехфазном коротком замыкании затухает быстрее, чем при любом несимметричном коротком замыкании. Наиболее медленно он затухает при однофазном коротком замыкании. На рис. 15-14 пунктирные кривые иллюстрируют характер затухания тока генератора при отсутствии АРВ для разных видов короткого замыкания.

Увеличение внешней реактивности статора, как известно (см. § 9-4), замедляет форсировку возбуждения.

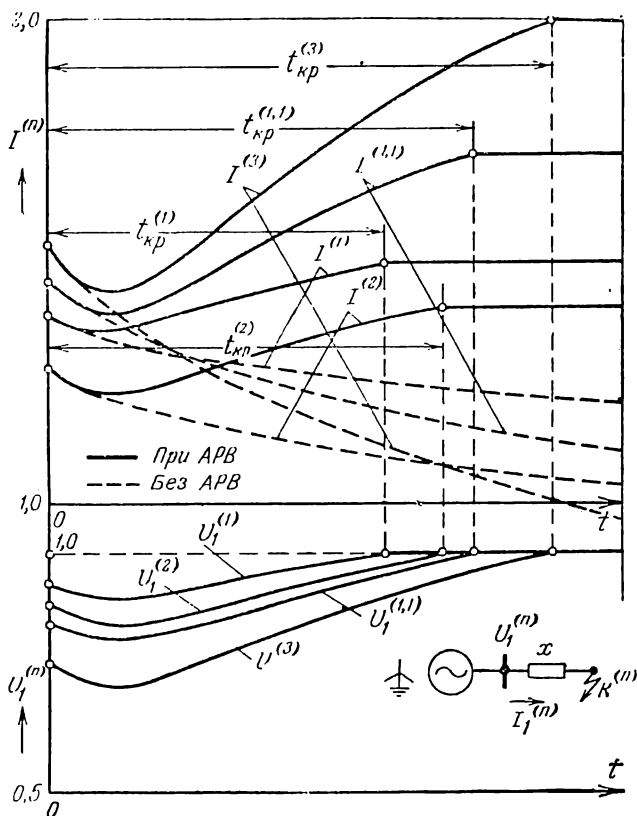


Рис. 15-14. Кривые изменения во времени напряжения прямой последовательности генератора и его тока при различных видах короткого замыкания в одной и той же точке.

Однако благодаря тому, что при этом напряжение генератора падает меньше, его восстановление (если это вообще возможно) происходит за меньшее время. Аналогичные условия имеют место при несимметричных коротких замыканиях, поскольку АРВ реагирует только на напряжение прямой последовательности (см. § 12-3). Следовательно, величины критического времени при разных видах короткого замыкания в одной и той же точке находятся в следующих соотношениях:

$$t_{кр}^{(1)} < t_{кр}^{(2)} < t_{кр}^{(1,1)} < t_{кр}^{(3)}. \quad (15-61)$$

Сплошные кривые на рис. 15-4 наглядно показывают характер изменения тока в месте короткого замыкания и напряжения прямой последовательности генератора при разных видах короткого замыкания и наличии у генератора АРВ. Как видно, внешняя реактивность x здесь выбрана больше критической $x_{кр}$. Если же $x < x_{кр}$, то, очевидно, при трехфазном коротком замыкании напряжение генератора под действием АРВ не достигнет нормальной величины, но при несимметричном коротком замыкании, при котором $(x + x_{\Delta}^{(n)}) \geq x_{кр}$, напряжение прямой последовательности генератора будет доведено до нормального значения.

Таким образом, чем больше дополнительная реактивность $x_{\Delta}^{(n)}$, характеризующая вид несимметричного короткого замыкания, тем медленнее протекает процесс подъема напряжения генератора, но вместе с тем раньше наступает установившийся режим.

Аналогично процесс гашения поля генератора при несимметричном коротком замыкании протекает тем медленнее, чем больше для данного вида короткого замыкания реактивность $x_{\Delta}^{(n)}$. Величины постоянных времени гашения поля и его продолжительности при разных видах короткого замыкания в одной и той же точке связаны неравенствами, аналогичными (15-60).

В соответствии с (15-56) для постоянной времени T_a при двухфазном коротком замыкании имеем:

$$T_a^{(2)} = T_a^{(3)}. \quad (15-62)$$

Что касается постоянных времени $T_a^{(1)}$ и $T_a^{(1,1)}$, то для них нельзя указать определенные соотношения, поскольку значения x_0 и r_0 могут изменяться в очень широких пределах.

Теперь выясним, в каких пределах могут изменяться величины токов при различных несимметричных коротких замыканиях по сравнению с величинами токов трехфазного короткого замыкания, возникающего в той же точке системы. Знание этих пределов представляет практический интерес, так как оно позволяет по известной для данной точки величине тока трехфазного короткого замыкания (вычисление которой проще, чем при других

видах короткого замыкания) оценить в первом приближении возможные наибольшие и наименьшие значения тока при несимметричных коротких замыканиях. Следует подчеркнуть, что устанавливаемые ниже предельные соотношения справедливы только для токов в месте короткого замыкания и их нельзя распространять на токи остальных ветвей рассматриваемой схемы.

На основании (15-49) и (15-50) абсолютная величина тока в месте любого вида металлического короткого замыкания чисто индуктивной схемы может быть определена как

$$I^{(n)} = m^{(n)} \frac{E_{\Sigma}^{(n)}}{x_{1\Sigma} + x_{\Delta}^{(n)}}, \quad (15-63)$$

где у результирующей э. д. с. поставлен индекс, указывающий, какому виду короткого замыкания отвечает ее значение.

Последнее выражение справедливо для произвольного момента времени; при этом в зависимости от того, какой реактивностью введен генератор в схему прямой последовательности, для него должна быть принята соответствующая э. д. с.

В данном случае удобно применить метод спрямленных характеристик (см. § 11-7), в соответствии с которым для каждого момента времени генератор характеризуется своими расчетными параметрами E_t и x_t , причем в общем случае при наличии АРВ значения E_t для какого-либо момента при разных видах короткого замыкания неодинаковы. Чтобы пояснить это, обратимся к рис. 15-15, из построения которого видно, что пока $(x_{\text{вн1}} + x_{\Delta}^{(n)}) \leq x_{\text{кр}t}$ (где $x_{\text{вн1}}$ — внешняя реактивность прямой последовательности до точки короткого замыкания), генератор как при трехфазном (луч OC), так и при данном несимметричном коротком замыкании (луч OD) работает в режиме увеличения возбуждения и, следовательно, при этих видах короткого замыкания характеризуется одними и теми же значениями E_t (отрезок OA) и x_t ($x_t \equiv \text{tg } \gamma_t$). Если $x_{\text{вн1}} + x_{\Delta}^{(n)} > x_{\text{кр}t}$, но $x_{\text{вн1}} < x_{\text{кр}t}$, то при несимметричном коротком замыкании (луч OL) генератор к этому моменту уже работает в режиме нормального напряжения и чтобы сохранить для генератора его x_t , вместо E_t следовало

бы ввести меньшую э. д. с. $E_t^{(n)} = U_H + I_{lt}^{(n)} x_t$ (отрезок $O'A'$). Поскольку $E_t^{(n)}$ является функцией искомого тока прямой последовательности $I_{lt}^{(n)}$, а напряжение генератора при его работе в этом режиме задано, ток $I_{lt}^{(n)}$, как известно, можно определить, полагая для генератора $E_t =$

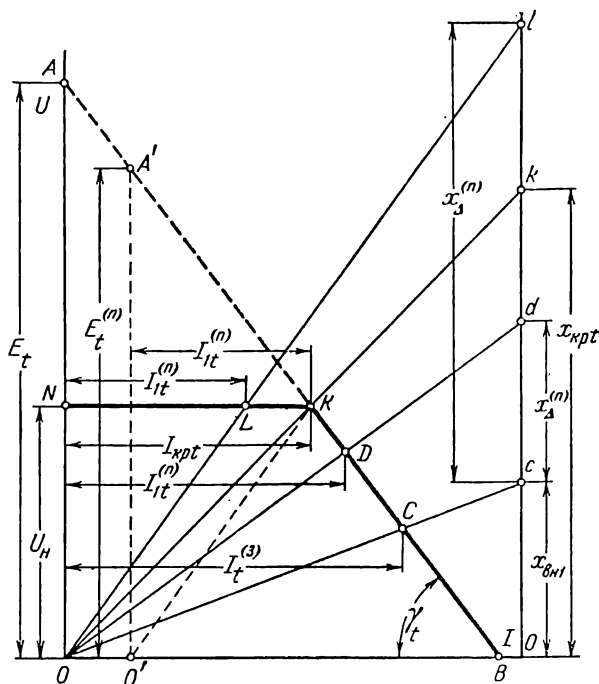


Рис. 15-15. К сравнению величины токов при различных видах короткого замыкания.

$= U_H$ и $x_t = 0$. Равным образом можно поступать при всех видах короткого замыкания, когда $x_{вн1} \geq x_{кр t}$.

Итак, $E_t^{(n)} = E_t^{(3)} = E_t$ соблюдается для начального момента короткого замыкания, для произвольного момента при отсутствии АРВ, а также при наличии АРВ, если $(x_{вн1} + x_{\Delta}^{(n)}) < x_{кр t}$. При этом искомое отношение тока

несимметричного короткого замыкания к току трехфазного короткого замыкания в той же точке будет

$$K_{(n-3)} = \frac{I_K^{(n)}}{I_K^{(3)}} = m^{(n)} \frac{1}{1 + \frac{x_{\Delta}^{(n)}}{x_{1\Sigma}}} \quad (15-64)$$

Соответственно при наличии АРВ, когда $x_{Kp\ t} > x_{BH1} > (x_{Kp\ t} - x_{\Delta}^{(n)})$,

$$K_{(n-3)} = m^{(n)} \frac{U_{II}}{E_t} \frac{x_{1\Sigma}}{x_{BH1} + x_{\Delta}^{(n)}} \quad (15-65)$$

и, наконец, когда $x_{BH1} > x_{Kp\ t}$,

$$K_{(n-3)} = m^{(n)} \frac{1}{1 + \frac{x_{\Delta}^{(n)}}{x_{BH1}}} \quad (15-66)$$

Найдем для каждого вида несимметричного короткого замыкания пределы этого отношения.

а) Двухфазное короткое замыкание

Из табл. 15-2 для двухфазного короткого замыкания

$$m^{(2)} = \sqrt{3} \text{ и } x_{\Delta}^{(2)} = x_{2\Sigma}.$$

Согласно (15-64) чем меньше $x_{2\Sigma}$ по сравнению с $x_{1\Sigma}$, тем больше отношение $K_{(2-3)}$; в пределе оно стремится к $\sqrt{3}$; это довольно близко к условиям установившегося режима короткого замыкания на выводах генератора.

Нижний предел $K_{(2-3)}$, очевидно, имеет место при условиях, когда $x_{2\Sigma}$ достигает наибольшего возможного значения. Это будет в том случае, если в схеме отсутствуют нагрузки (поскольку они существенно снижают $x_{2\Sigma}$), т. е.

$$x_{2\Sigma} = x_{2Г} + x_{BH1}$$

и соответственно

$$x_{1\Sigma} = x_{1Г} + x_{BH1}.$$

Поскольку $x_{2\Gamma} > x''_d$, при отсутствии АРВ нижний предел $K_{(2-3)}$ будет в начальный момент короткого замыкания на выводах генератора, причем для машин без демпферных обмоток он ниже, чем для машин с демпферными обмотками.

По мере увеличения внешней реактивности отношение $\frac{x_{2\Sigma}}{x_{1\Sigma}}$ стремится к единице, а $K_{(2-3)}$ — к $\frac{\sqrt{3}}{2}$.

При наличии АРВ, когда $x_{\text{вн1}}$ находится в диапазоне $x_{\text{кр } t} > x_{\text{вн1}} > (x_{\text{кр } t} - x_{\Delta}^{(2)})$, по (15-65) имеем:

$$K_{(2-3)} = \sqrt{3} \frac{I_{II}}{E_t} \cdot \frac{1 + \frac{x_t}{x_{\text{вн1}}}}{2 + \frac{x_{2\Gamma}}{x_{\text{вн1}}}}, \quad (15-65a)$$

откуда видно, что с ростом $x_{\text{вн1}}$ отношение $K_{(2-3)}$ падает и при $x_{\text{вн1}} = x_{\text{кр } t}$ достигает значения, которое может быть получено и из более простого выражения:

$$K_{(2-3)} = \sqrt{3} \frac{1}{2 + \frac{x_{2\Gamma}}{x_{\text{кр } t}}}. \quad (15-66a)$$

Это значение $K_{(2-3)}$, как нетрудно установить из (15-66), является минимальным при работе генератора в режиме нормального напряжения (т. е. при $x_{\text{вн1}} \geq x_{\text{кр } t}$), причем так как $x_{\text{кр } t}$ имеет наименьшую величину при установившемся режиме короткого замыкания, искомые пределы изменений $K_{(2-3)}$ будут

$$\frac{\sqrt{3}}{2 + \frac{x_{2\Gamma}}{x_{\text{кр } t}}} \leq K_{(2-3)} < \sqrt{3},$$

или практически примерно

$$0,6 \leq K_{(2-3)} \leq 1,6.$$

Для turbo- и гидрогенераторов средней мощности на рис. 15-16 приведены кривые изменения $K_{(2-3)}$ в установившемся режиме короткого замыкания в функции внешней реактивности цепи статора. Разный масштаб по

оси x принят для того, чтобы нагляднее выявить характер этих кривых в зоне малых значений внешней реактивности. При наличии АРВ значение $K_{(2-3)}=1$ наступает при очень небольших реактивностях, в то время как при

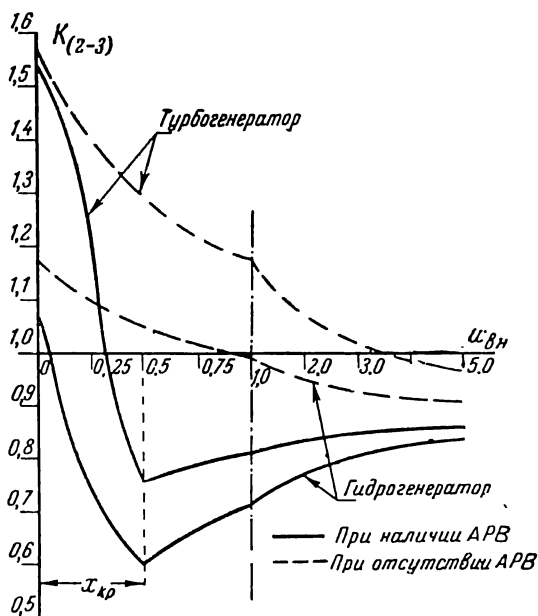


Рис. 15-16. Кривые изменения отношения установившихся токов двухфазного и трехфазного коротких замыканий в зависимости от удаленности короткого замыкания.

отсутствии АРВ, напротив, — при весьма значительных внешних реактивностях. С дальнейшим увеличением $x_{вн1}$ все кривые в пределе стремятся к значению $\frac{\sqrt{3}}{2}$.

При достаточно больших удаленностях короткого замыкания токи двух- и трехфазного короткого замыкания изменяются во времени сравнительно мало, благодаря чему между ними в течение всего процесса короткого замыкания сохраняется приблизительно постоянное соотношение

$$I_k^{(2)} \approx \frac{\sqrt{3}}{2} I_k^{(3)} = 0,87 I_k^{(3)}.$$

б) Однофазное короткое замыкание

Для однофазного короткого замыкания из табл. 15-2 имеем:

$$m^{(1)} = 3 \text{ и } x_{\Delta}^{(1)} = x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}.$$

Очевидно, наименьшее значение реактивности $x_{\Delta}^{(1)}$ имеет место при однофазном коротком замыкании на выводах генератора, нейтраль которого заземлена наглухо. Если при этом рассматривать установившийся режим короткого замыкания, когда $x_d \gg (x_2 + x_0)$, то из (15-64) видно, что отношение $K_{(1-3)}$ стремится к 3.

С другой стороны, заземляя нейтраль через сопротивление, ток однофазного короткого замыкания можно ограничить до сколь угодно малой величины; можно добиться и его исчезновения (при $x_0 = \infty$) *.

Таким образом, искомое отношение $K_{(1-3)}$ находится в пределах

$$0 \leq K_{(1-3)} < 3,$$

причем верхний предел практически не превышает 2,5.

При коротком замыкании в протяженной сети ($x_{2\Sigma} \approx x_{1\Sigma}$) величина отношения $K_{(1-3)}$, находясь в пределах

$$0 \leq K_{(1-3)} < 1,5;$$

изменяется в зависимости от $\frac{x_{0\Sigma}}{x_{1\Sigma}}$, как показано на рис. 15-17.

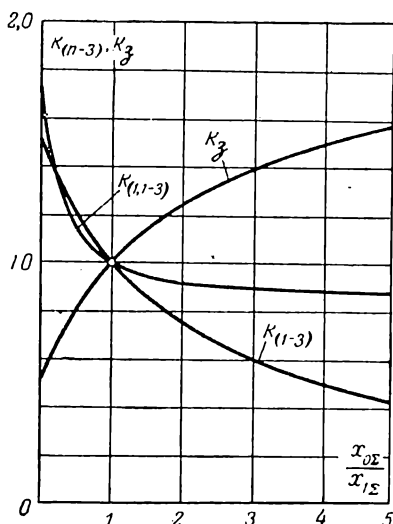


Рис. 15-17. Кривые изменения отношений $K_{(1-3)}$, $K_{(1,1-3)}$, K_3 в функции $x_{0\Sigma}/x_{1\Sigma}$.

* Пренебрегая током, обусловленным емкостью сети.

в) Двухфазное короткое замыкание на землю

Для этого вида короткого замыкания из табл. 15-2

$$m^{(1,1)} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{2\Sigma} x_{0\Sigma}}{(x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})^2}}$$

и

$$x_{\Delta}^{(1,1)} = \frac{x_{2\Sigma} x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}.$$

Наименьшее значение $x_{\Delta}^{(1,1)}$ будет при $x_{0\Sigma} \approx 0$ или $x_{2\Sigma} \approx 0$; при этом в обоих случаях $m^{(1,1)} = \sqrt{3}$. Следовательно, по (15-64) верхний предел, к которому стремится отношение $K_{(1,1-3)}$, составляет $\sqrt{3}$.

Наибольшее значение $x_{\Delta}^{(1,1)}$ имеет место при $x_{0\Sigma} = \infty$, т. е. когда нет заземленных нейтралей и, следовательно, данный вид короткого замыкания является обычным двухфазным коротким замыканием.

Таким образом, искомые пределы изменений отношения $K_{(1,1-3)}$ те же, что и для $K_{(2-3)}$.

Для условий короткого замыкания в протяженной сети ($x_{2\Sigma} \approx x_{1\Sigma}$) отношение $K_{(1,1-3)}$ находится в пределах

$$\frac{\sqrt{3}}{2} \leq K_{(1,1-3)} < \sqrt{3}$$

и его изменение в функции $x_{0\Sigma}/x_{1\Sigma}$ характеризует соответствующая кривая на рис. 15-17. Как видно, в диапазоне

$\frac{x_{0\Sigma}}{x_{1\Sigma}} = 0,2 \div 1$ ток однофазного короткого замыкания не-
много больше тока двухфазного короткого замыкания на
землю, в то время как при всех остальных значениях
 $\frac{x_{0\Sigma}}{x_{1\Sigma}}$ имеет место обратное соотношение, которое прогрес-

сивно увеличивается с ростом $\frac{x_{0\Sigma}}{x_{1\Sigma}}$.

г) Соотношение токов в земле

Практический интерес представляет сравнение величин токов в земле при однофазном и двухфазном коротких замыканиях на землю.

Используя (15-21), (15-22), (15-38) и (15-40), представим отношение тока однофазного короткого замыкания к току в земле при двухфазном коротком замыкании на землю в следующем виде¹:

$$K_3 = \frac{I_3^{(1)}}{I_3^{(1,1)}} = \frac{I_{K0}^{(1)}}{I_{K0}^{(1,1)}} = \frac{x_{1\Sigma}x_{2\Sigma} + x_{1\Sigma}x_{0\Sigma} + x_{2\Sigma}x_{0\Sigma}}{x_{1\Sigma}x_{2\Sigma} + x_{2\Sigma}^2 + x_{2\Sigma}x_{0\Sigma}}, \quad (15-67)$$

откуда следует, что в зависимости от соотношения между $x_{2\Sigma}^2$ и $x_{1\Sigma}x_{0\Sigma}$ может быть $K_3 \geq 1$.

При $x_{2\Sigma} = x_{1\Sigma}$ выражение (15-67) принимает более простой вид:

$$K_3 = \frac{1 + 2 \frac{x_{0\Sigma}}{x_{1\Sigma}}}{2 + \frac{x_{0\Sigma}}{x_{1\Sigma}}} \quad (15-67a)$$

и в данном случае пределы K_3 будут

$$0,5 < K_3 < 2.$$

Его изменение в функции $\frac{x_{0\Sigma}}{x_{1\Sigma}}$ иллюстрирует соответствующая кривая на рис. 15-17. Как видно, лишь при $x_{0\Sigma} = x_{1\Sigma}$ токи в земле при сравниваемых видах короткого замыкания одинаковы; при $x_{0\Sigma} > x_{1\Sigma}$ превышает ток в земле при однофазном коротком замыкании, а при $x_{0\Sigma} < x_{1\Sigma}$, напротив, ток при двухфазном коротком замыкании на землю.

Следует иметь в виду, что соотношения (15-67) и (15-67a) справедливы для токов нулевой последовательности любой ветви схемы (где вообще возможно протекание этих токов), так как они пропорциональны токам в месте короткого замыкания.

Пример 15-6. Для генератора с параметрами $x_d = 1,0$; $x'_d = 0,3$; $x_2 = 0,42$ и $x_0 = 0,06$, нейтраль которого заземлена через относительную реактивность $x = 0,25$, определить, в каком соотно-

¹ Для упрощения здесь не учтено возможное различие между результирующими э. д. с. при сравниваемых видах короткого замыкания, о чем указывалось ранее.

шении находятся значения постоянной времени $T_d^{(n)}$, начального переходного тока и установившегося тока при разных видах короткого замыкания на выводах генератора. В предшествующем режиме генератор работал на холостом ходу с номинальным напряжением. Его АРВ отключено.

Дополнительные реактивности для разных видов короткого замыкания будут:

$$x_{\Delta}^{(3)} = 0;$$

$$x_{\Delta}^{(2)} = 0,42;$$

$$x_{\Delta}^{(1)} = 0,42 + 0,06 + 3 \cdot 0,25 = 1,23;$$

$$x_{\Delta}^{(1,1)} = 0,42 // (0,06 + 3 \cdot 0,25) = 0,28.$$

Постоянные времени затухания свободного переходного тока по (15-52):

$$T_d^{(3)} = T_{f0} \frac{0,3}{1,0} = 0,3 T_{f0};$$

$$T_d^{(1,1)} = T_{f0} \frac{0,3 + 0,28}{1,0 + 0,28} = 0,45 T_{f0};$$

$$T_d^{(2)} = T_{f0} \frac{0,3 + 0,42}{1,0 + 0,42} = 0,51 T_{f0};$$

$$T_d^{(1)} = T_{f0} \frac{0,3 + 1,23}{1,0 + 1,23} = 0,69 T_{f0}$$

и искомое соотношение между ними составляет

$$T_d^{(3)} : T_d^{(1,1)} : T_d^{(2)} : T_d^{(1)} = 1 : 1,50 : 1,70 : 2,30.$$

Величины начального переходного тока:

$$I'^{(3)} = \frac{1}{0,3} = 3,33;$$

$$I'^{(1,1)} = \frac{1}{0,3 + 0,28} \sqrt[3]{1 - \frac{0,42 \cdot 0,81}{1,23^3}} = 2,65;$$

$$I'^{(2)} = \frac{\sqrt[3]{3}}{0,3 + 0,42} = 2,42;$$

$$I'^{(1)} = \frac{3}{0,3 + 1,23} = 1,96,$$

т. е. они находятся в соотношении

$$I'^{(3)} : I'^{(1,1)} : I'^{(2)} : I'^{(1)} = 1 : 0,8 : 0,73 : 0,59.$$

Аналогично находим величины установившегося тока:

$$I^{(3)} = 1,0; I^{(1,1)} = 1,2; I^{(2)} = 1,22 \text{ и } I^{(1)} = 1,34;$$

соотношение между ними равно

$$I^{(3)} : I^{(1,1)} : I^{(2)} : I^{(1)} = 1 : 1,2 : 1,22 : 1,34.$$

Пример 15-7. При данных предыдущего примера определить, в какой момент времени токи при трехфазном и двухфазном коротких замыканиях одинаковы.

В соответствии с полученными ранее результатами поставленное условие можно записать в следующем виде:

$$(3,33 - 1) e^{-\frac{t'}{0,3}} + 1 = (2,42 - 1,22) e^{-\frac{t'}{0,51}} + 1,22,$$

или

$$2,33 e^{-\frac{t'}{0,3}} - 1,2 e^{-\frac{t'}{0,51}} = 0,22,$$

где $t' = \frac{t}{T_{f0}}.$

Последнее уравнение проще всего решить подбором; он приводит к $t' = 0,28$, т. е. если, например, $T_{f0} = 5 \text{ сек}$, то искомое время будет $t = 0,28 \cdot 5 = 1,4 \text{ сек}$.

Пример 15-8. Определить величину реактивности, через которую должна быть заземлена нейтраль генератора с параметрами, приведенными в примере 15-6, чтобы при замыкании одной и двух фаз на землю на выводах генератора токи в нейтрали в начальный момент короткого замыкания были одинаковыми. Каково при этом будет напряжение нейтрали?

Поставленное условие выполняется при равенстве

$$x'_{d} x_{0\Sigma} = x_{2\Sigma}^2,$$

т. е.

$$0,3(0,06 + 3x) = 0,42^2,$$

откуда $x = 0,18$.

Начальное значение тока при однофазном коротком замыкании¹

$$I^{(1)} = \frac{3}{0,3 + 0,42 + 0,06 + 3 \cdot 0,18} = 2,28.$$

Напряжение нейтрали в начальный момент короткого замыкания

$$U = 2,28 \cdot 0,18 = 0,41.$$

¹ То же значение будет для тока в нейтрали при замыкании двух фаз на землю, в чем читатель может легко убедиться.

15-8. ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ

При выводе основных соотношений и расчетных выражений, характеризующих каждый вид короткого замыкания (см. § 15-2—15-4), были приведены векторные диаграммы токов и напряжений в месте короткого замыкания и показаны их изменения в зависимости от сопротивления дуги.

Теперь проследим, как деформируются векторные диаграммы токов и напряжений при разных видах короткого замыкания по мере удаления от места короткого и при переходе через трансформатор. Знакомство с этим вопросом имеет большое практическое значение при проектировании и анализе работы устройств релейной защиты и автоматизации, применяемых в современных электрических системах.

Обратимся к схеме рис. 15-18,а, где в конце воздушной линии предполагается тот или иной вид несимметричного короткого замыкания. Характер эпюр напряжения отдельных последовательностей вдоль элементов рассматриваемой схемы представлен на рис. 15-18,б, в и г для каждого несимметричного короткого замыкания. По мере приближения к генератору напряжение прямой последовательности возрастает, а напряжения обратной и нулевой последовательностей, напротив, уменьшаются (по абсолютной величине). При указанном на рис. 15-18,а соединении обмоток трансформатора напряжение нулевой последовательности за трансформатором отсутствует. Как видно из соотношения между U_{K2} и U_{K0} при однофазном коротком замыкании, в данном случае $x_{0\Sigma} > x_{2\Sigma}$. При другом соотношении между $x_{0\Sigma}$ и $x_{2\Sigma}$ соответственно изменятся эпюры напряжений U_0 и U_2 . Как видно, наибольшее искажение векторной диаграммы напряжений всегда получается в месте короткого замыкания. Для точек, расположенных ближе к источнику питания, это искажение становится все меньшим. Полностью симметричной сохраняется система векторов э. д. с.

Применительно к схеме рис. 15-18,а на рис. 15-19 построены векторные диаграммы токов и напряжений в месте двухфазного короткого замыкания через дугу с сопротивлением r_d — в начале линии и за трансформатором, считая, что обмотки последнего соединены по

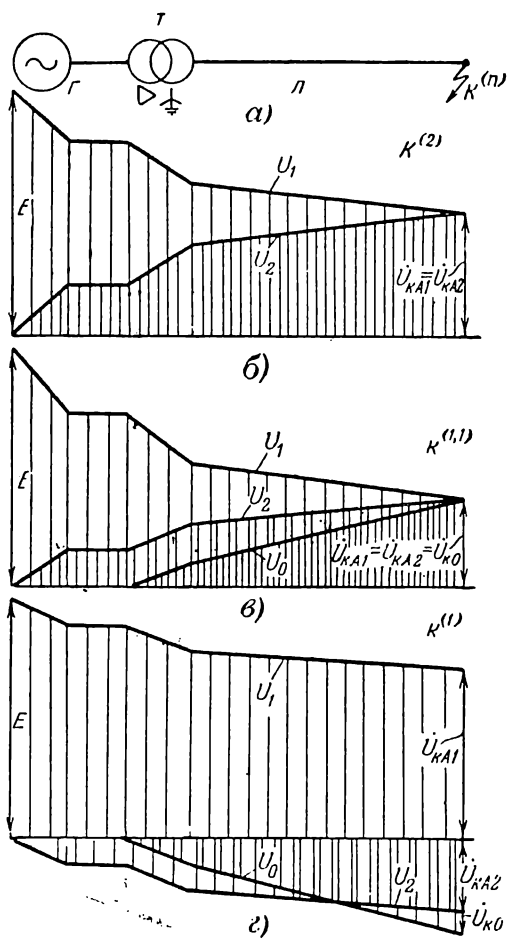


Рис. 15-18. Принципиальная схема (а) и эюры относительных напряжений отдельных последовательностей при двухфазном (б), двухфазном на землю (в) и однофазном (г) коротких замыканиях.

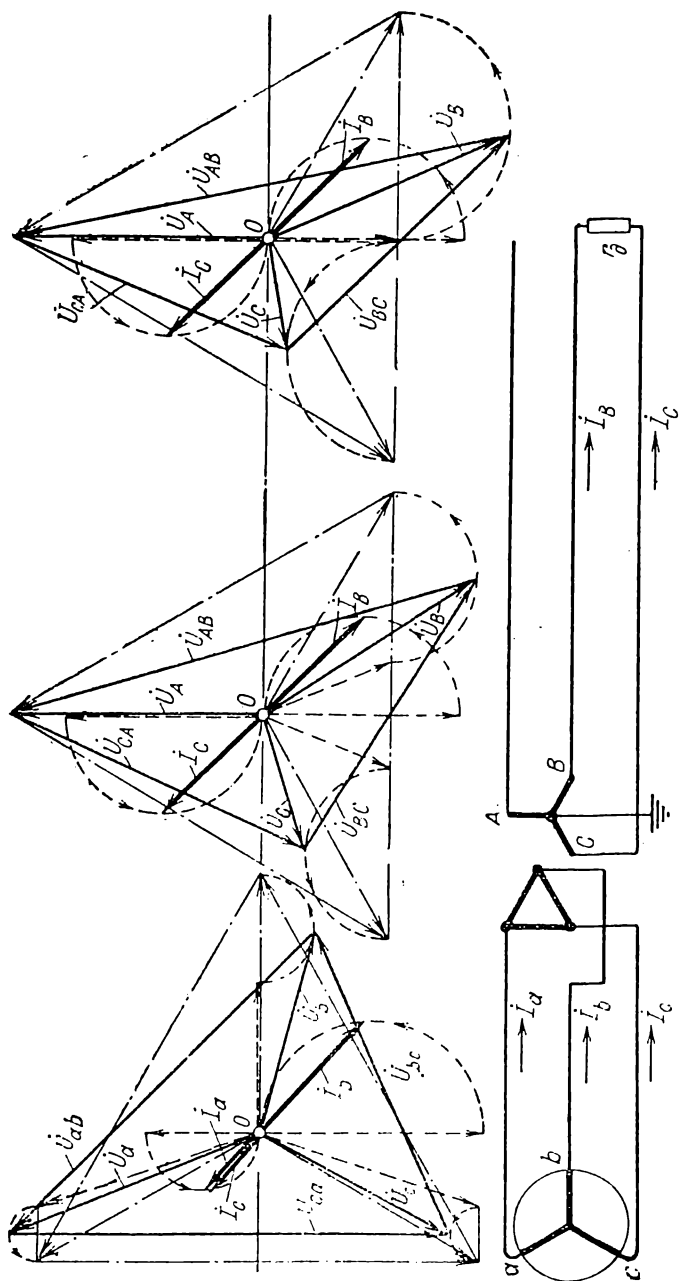


Рис. 15-19. Векторные диаграммы токов и напряжений при двухфазном коротком замыкании.

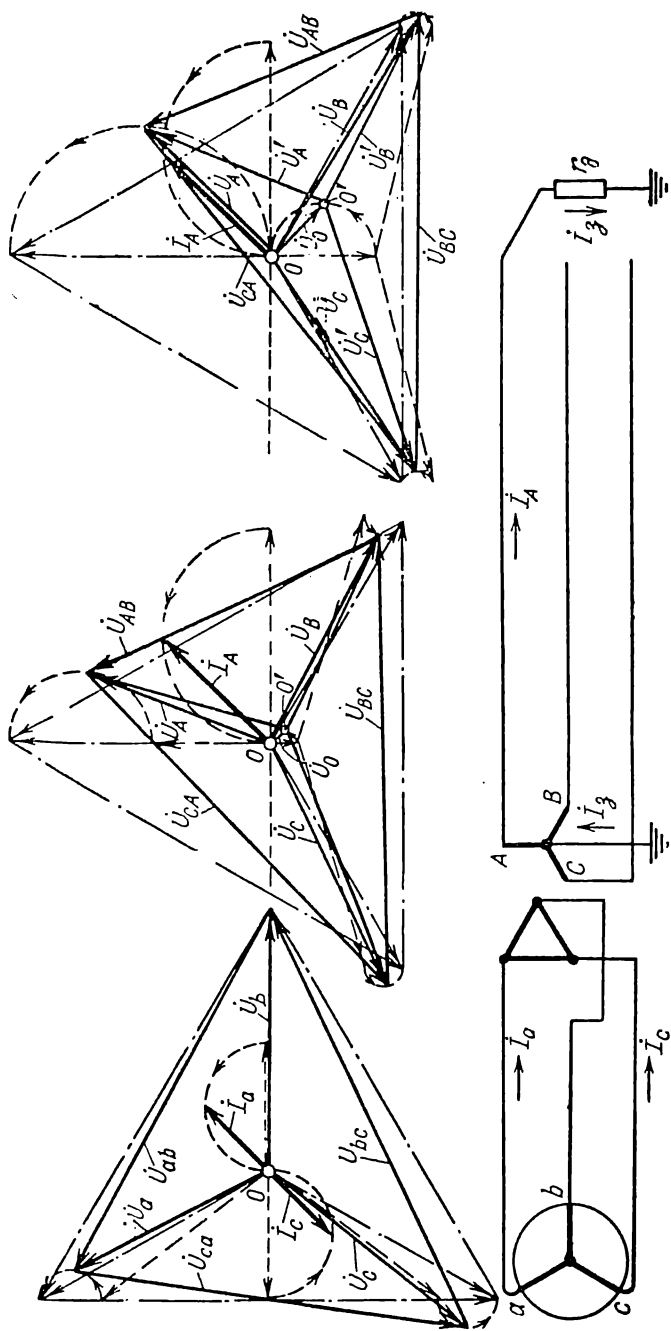


Рис. 15-20. Векторные диаграммы токов и напряжений при однофазном коротком замыкании.

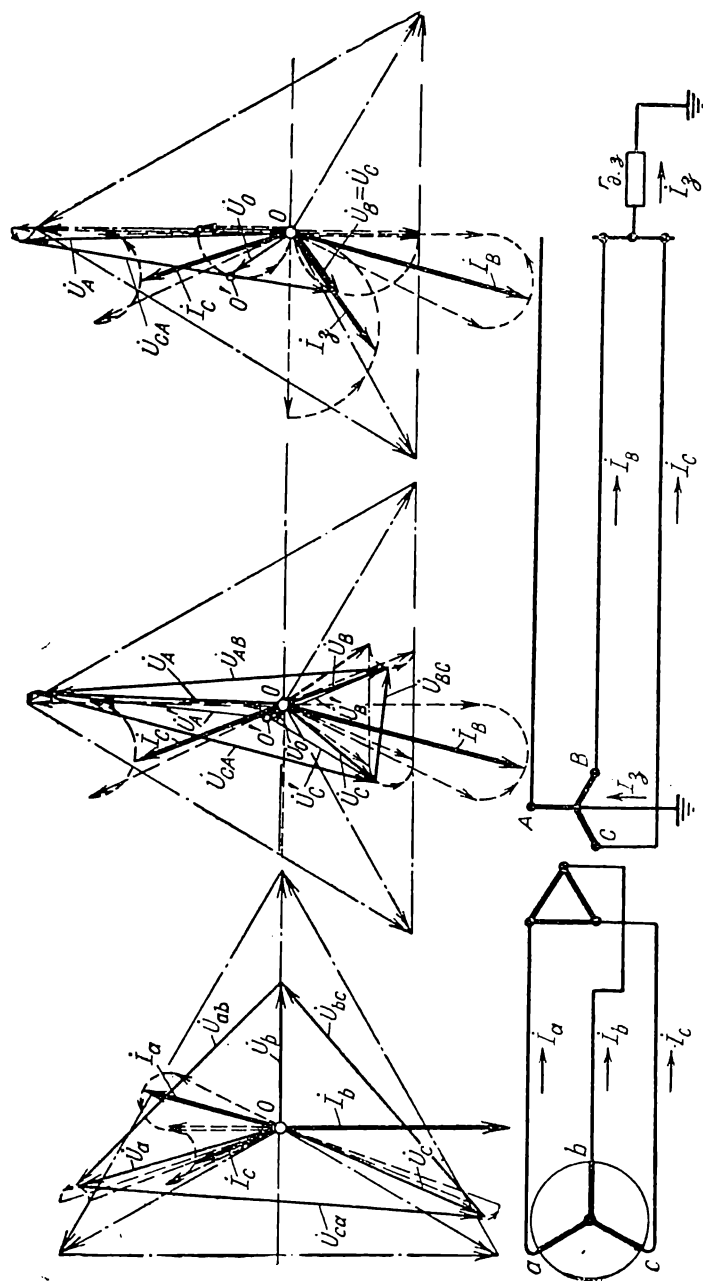


Рис. 15-21. Векторные диаграммы токов и напряжений при коротком замыкании двух фаз на землю через общую дугу.

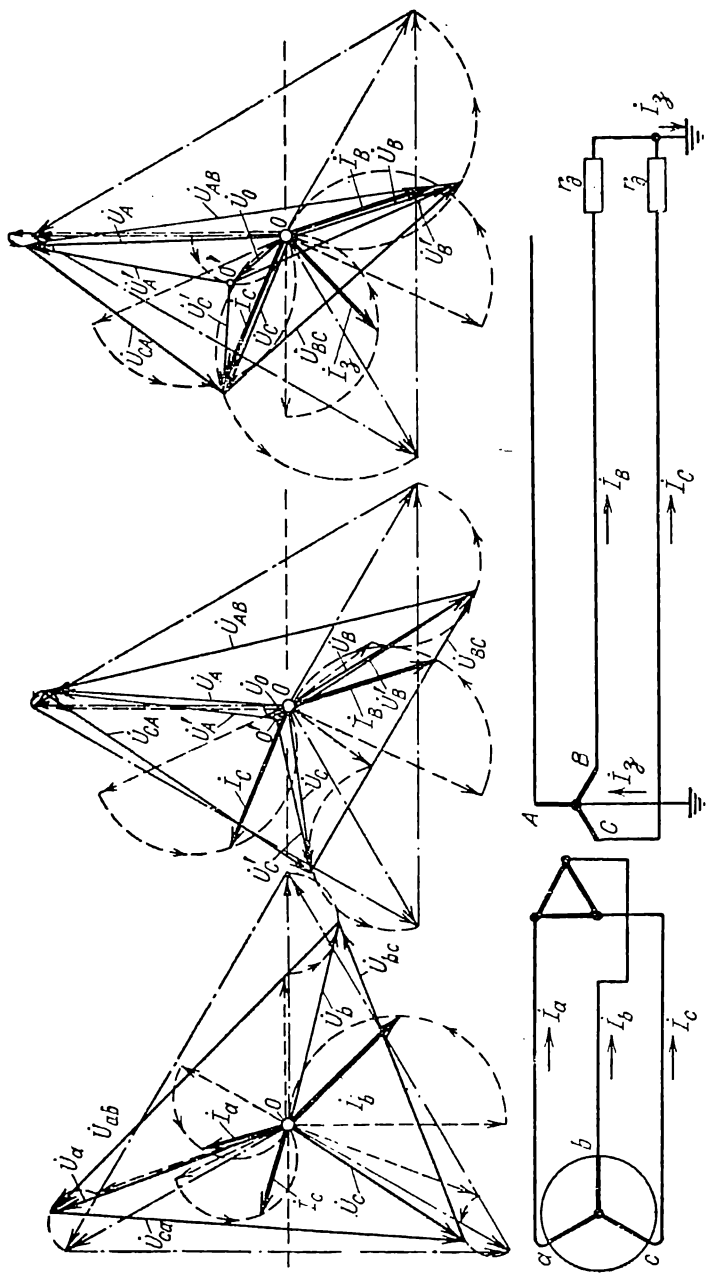


Рис. 15-22. Векторные диаграммы токов и напряжений при коротком замыкании двух фаз на землю через отдельные дуги.

схеме Y_0/Δ -11. Чтобы можно было сравнивать диаграммы на обеих сторонах трансформатора, принято, что токи и напряжения выражены в относительных единицах или приведены к одной ступени напряжения.

Нейтраль системы все время остается в центре тяжести треугольника линейных напряжений и ее потенциал равен нулю. При изменении сопротивления дуги, как отмечалось выше, концы векторов напряжений и токов перемещаются по соответствующим полуокружностям.

Аналогичные векторные диаграммы токов и напряжений при однофазном коротком замыкании приведены на рис. 15-20. С удалением от места короткого замыкания смещение нейтрали системы уменьшается. Интересно отметить, что благодаря трансформатору с нечетной группой соединения обмоток однофазное короткое замыкание на стороне звезды генератор воспринимает как двухфазное короткое замыкание.

На рис. 15-21 и 15-22 приведены векторные диаграммы токов и напряжений при двухфазном коротком замыкании на землю. Первые из них соответствуют случаю, когда обе поврежденные фазы замкнуты на землю через общую дугу с сопротивлением $r_{д.з.}$, а вторые — случаю, когда каждая из поврежденных фаз замкнута на землю через отдельную дугу с сопротивлением $r_{д.}$

Как и следовало ожидать, искажения векторных диаграмм напряжений при замыкании на землю через общую дугу сказываются сильнее, чем при замыкании фаз на землю через отдельные дуги.

15-9. ВЛИЯНИЕ НАГРУЗКИ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

Остановимся на качественной оценке влияния нагрузки при несимметричных коротких замыканиях.

В соответствии с правилом эквивалентности прямой последовательности влияние нагрузки в схеме прямой последовательности при любом несимметричном коротком замыкании можно оценить, рассматривая трехфазное короткое замыкание в точке, удаленной от действительной точки короткого на дополнительное сопротивление $Z_{\Delta}^{(n)}$. Поэтому все выводы относительно влияния нагрузки при трехфазном коротком замыкании, получен-

ные ранее (см. § 5-4, 6-4 и 11-2), могут быть распространены на оценку того же влияния в схеме прямой последовательности при несимметричном коротком замыкании.

Так, например, можно заранее утверждать, что кольцо остаточное напряжение прямой последовательности при несимметричном коротком замыкании больше, чем при трехфазном коротком замыкании в той же точке, возможное увеличение начального тока прямой последовательности за счет подпитки от двигателей при несимметричных коротких замыканиях всегда меньше, чем при трехфазном коротком замыкании. При этом, очевидно, и число участвующих в подпитке двигателей также меньше.

По той же причине при установившемся режиме несимметричного короткого замыкания влияние нагрузки в схеме прямой последовательности сказывается, напротив, сильнее, чем при трехфазном коротком замыкании в той же точке.

В схеме обратной последовательности нагрузка проявляет себя иначе. Ее параметры, как указывалось в § 14-2, не зависят от времени процесса короткого замыкания. Поскольку величина Z_2 нагрузки относительно невелика, участие нагрузок в схеме обратной последовательности может заметно уменьшить результирующее сопротивление обратной последовательности $Z_{2\Sigma}$ рассматриваемой схемы, что в конечном итоге приводит к увеличению токов всех последовательностей¹. В этом в сущности заключается особый эффект нагрузки (с двигателями) при несимметричных коротких замыканиях, который вне метода симметричных составляющих иногда объясняют как эффект генерирования двигателями тока при несимметричных коротких замыканиях.

Как отмечалось в § 13-4 и 14-3, в схему нулевой последовательности нагрузки, как правило, не входят.

Обратимся снова к элементарной схеме, представленной на рис. 11-1, и допустим, что в точке K произошло не трехфазное, а двухфазное короткое замыкание (рис. 15-23). Мощность обобщенной нагрузки, характеризующей установленными для нее средними парамет-

¹ Кроме тока нулевой последовательности при двухфазном коротком замыкании на землю, который, напротив, уменьшается.

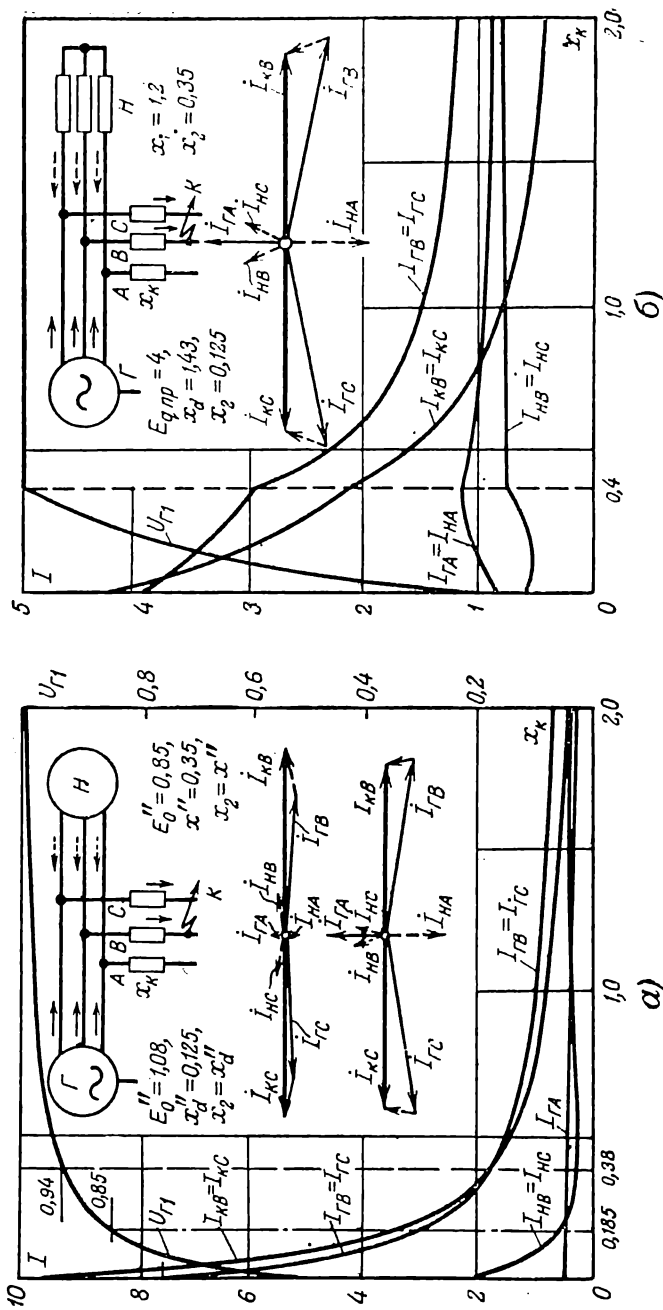


Рис. 15-23. Влияние нагрузки при двухфазном коротком замыкании.

а — в начальный момент короткого замыкания; б — при установившемся режиме короткого замыкания.

рами, принята, как и ранее, равной номинальной мощности генератора.

Приведенные на рис. 15-23,а кривые иллюстрируют изменение начальных значений напряжения прямой последовательности генератора и модулей фазных токов в генераторе, нагрузке и месте короткого замыкания в функции реактивности x_k , характеризующей удаленность короткого замыкания. Аналогичные кривые для установившегося режима короткого замыкания даны на рис. 15-23,б (масштаб напряжений здесь принят тем же, что и на рис. 15-23,а).

В начальный момент короткого замыкания при $x_k < 0,38$ ток поврежденных фаз в месте короткого замыкания больше, чем тех же фаз генератора, хотя, как видно, напряжение прямой последовательности $U_{Г1}$ уже при $x_k = 0,185$ достигает значения 0,85, при котором генерации тока прямой последовательности нагрузкой уже не будет. Это увеличение объясняется тем, что при $x_k < 0,38$ ток от генератора к месту короткого замыкания поступает не только по своим поврежденным фазам, но так же через здоровую и поврежденные фазы нагрузки, как это видно из верхней векторной диаграммы рис. 15-23,а. Нижняя векторная диаграмма того же рисунка соответствует условию $x_k > 0,38$, т. е. когда нагрузка отсасывает ток от места короткого.

При принятых параметрах генератора напряжение прямой последовательности $U_{Г1}$ в установившемся режиме короткого замыкания под действием АРВ достигает нормального значения при $x_k = 0,4$. Все кривые при этом значении x_k претерпевают перелом, так как здесь меняется режим генератора (вместо режима предельного возбуждения наступает режим нормального напряжения). Лишь при очень малых x_k (до 0,04) ток поврежденных фаз в месте короткого замыкания несколько больше тока поврежденных фаз генератора. При всех остальных значениях x_k , как видно по рис. 15-23,б, ток поврежденных фаз генератора, напротив, больше тока в месте короткого, причем по мере увеличения x_k разница между этими токами возрастает, как и при трехфазном коротком замыкании (см. § 6-4). Характер векторных диаграмм токов в отдельных ветвях рассматриваемой схемы при этих условиях сохраняется тот же, что и в начальный момент

короткого замыкания при $x_k > 0,38$ (ср. векторные диаграммы рис. 15-23, а и б), т. е. когда в нагрузочной ветви преобладает ток прямой последовательности.

Пример 15-9. Для схемы рис. 15-24, а определить, при какой длине линии l напряжение прямой последовательности генератора в начальный момент однофазного короткого замыкания в точке К составляет не менее 85% его номинального напряжения.

Генератор: 60 Мва, 10,5 кВ; $x''_d = 0,22$; $x_2 = 0,30$.

Трансформатор: 60 Мва, 154/10,5 кВ; $u_k = 10\%$.

Нагрузка: 44 Мва; $x'' = x_2 = 0,35$; $E'' = 0,85$.

Линия: $x_1 = 0,4$ ом/км; $x_0 = 3x_1$.

За базисные условия примем $S_6 = 60$ Мва; $U_6 = U_{ср}$.

Реактивности нагрузки при базисных условиях будут:

$$x_{н1} = 0,35 \cdot \frac{60}{44} = 0,48 \text{ и } x_{н2} = 0,48.$$

Базисные реактивности 1 км линии:

$$x_1 = 0,4 \cdot \frac{60}{154^2} = 0,001 = x_2 \text{ и } x_0 = 3 \cdot 0,001 = 0,003.$$

Считая, что в предшествующем режиме генератор работал с номинальным напряжением и его относительная нагрузка состав-

ляла $\frac{44}{60} = 0,73$ при $\cos \varphi = 0,8$ (т. е. $\sin \varphi = 0,6$), упрощенно находим его сверхпереходную э. д. с.:

$$E''_{ю1} \approx 1 + 0,22 \cdot 0,73 \cdot 0,6 = 1,095.$$

Схемы замещения отдельных последовательностей и их соединение в комплексную схему представлены на рис. 15-24, б.

Результирующая э. д. с.

$$E_{\Sigma} = \frac{1,095 \cdot 0,48 + 0,85 \cdot 0,22}{0,48 + 0,22} = 1,0.$$

Результирующие реактивности отдельных последовательностей:

$$x_{1\Sigma} = (0,22 // 0,48) + 0,1 + 0,001l = 0,25 + 0,001l;$$

$$x_{2\Sigma} = (0,30 // 0,48) + 0,1 + 0,001l = 0,285 + 0,001l;$$

$$x_{0\Sigma} = 0,10 + 0,003l.$$

$$\text{Суммарная реактивность } x_{\Sigma}^{(1)} = 0,635 + 0,005l.$$

В соответствии с заданным условием можно написать:

$$\frac{1}{0,635 + 0,005l} (0,485 + 0,005l) = 0,85,$$

откуда

$$l = 73,5 \text{ км.}$$

Отметим, что если пренебречь нагрузкой, то суммарная реактивность $x_{\Sigma}^{(1)} = 0,82 + 0,005l$ и искомая длина линии будет $l = 129$ км, т. е. на 76% больше. Настоящий пример показывает, что при заданном условии влияние нагрузки сказывается весьма существенно.

Пример 15-10. При двухфазном коротком замыкании в точке К схемы на рис. 15-25, а определить остаточное напряжение прямой последовательности за реактором в начальный момент короткого.

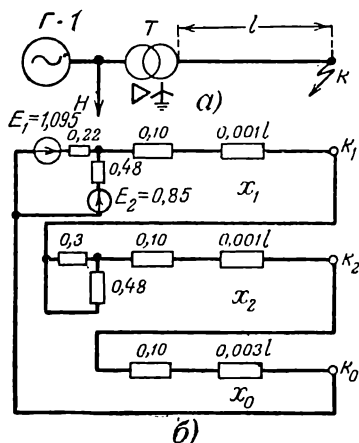


Рис. 15-24. К примеру 15-9.
а — исходная схема; б — комплексная схема замещения.

Относительные реактивности системы при $S=100$ Мва и $U=115$ кв: $x_1=x_2=0,1$.

Трансформатор: 60 Мза; 115/6,3 кв; $u_k=10,5\%$.

Реактор двоянный (Р): 2×1000 а; 6 кв; $x=8\%$; коэффициент связи $k=0,46$.

Нагрузки: Н-1 и Н-2 по 17,5 Мва; Н-3 и Н-4 по 8 Мва.

Примем $S_6=100$ Мва и $U_6=U_{ср}$. Тогда реактивности элементов при базисных условиях будут:

$$x_1 = 0,1; x_2 = 0,105 \frac{100}{60} = 0,175; x_{P(6)} = 0,08 \frac{9,2}{1,0} \cdot \frac{6}{6,3} = 0,7,$$

где $9,2 = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6,3}$ — базисный ток при 6,3 кв;

реактивностей ветвей схемы замещения двоянного реактора: $x_3 = -0,46 \cdot 0,7 = -0,32$ и $x_4 = x_5 = 0,7 + 0,32 = 1,02$;

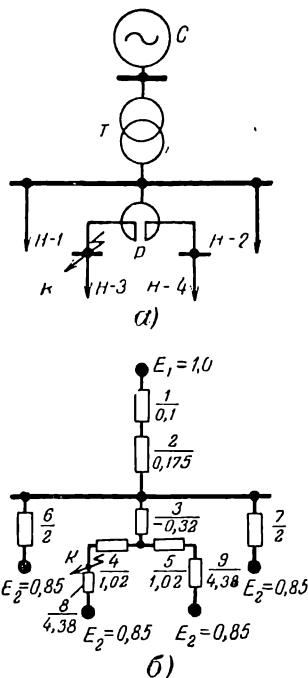


Рис. 15-25. К примеру 15-10.
а — исходная схема; б — схема замещения прямой последовательности.

реактивности нагрузок в соответствии со средними значениями их параметров для начального момента короткого замыкания:

$$x_6 = x_7 = 0,35 \frac{100}{17,5} = 2; \quad x_8 = x_9 = 0,35 \frac{100}{8} = 4,38.$$

Схема замещения прямой последовательности представлена на рис. 15-25,б, где, помимо реактивностей элементов, указаны относительные базисные величины э. д. с. источников питания.

Схема обратной последовательности в данном случае будет такой же, за исключением того, что в ней все э. д. с. равны нулю.

Преобразуем схему к элементарному виду:

$$x_{10} = (0,1 + 0,175) // 2 // 2 - 0,32 = -0,1; \quad E_3 = 1 // 0,85 = 0,97;$$

$$x_{11} = (-0,1) // (4,38 + 1,02) = -0,102; \quad E_4 = 0,97 // 0,85 = 0,97;$$

$$x_{12} = (1,02 - 0,102) // (4,38) = 0,76 \text{ и } E_5 = 0,97 // 0,85 = 0,955.$$

Ток прямой последовательности в месте короткого, имея в виду, что $x_{2\Sigma} = x_{1\Sigma} = 0,76$, составляет

$$I_{K1} = \frac{0,955}{2 \cdot 0,76} = 0,63$$

и напряжение прямой последовательности в месте короткого

$$U_{K1} = 0,63 \cdot 0,76 = 0,48.$$

Ток прямой последовательности в элементе 4

$$I_4 = \frac{0,97 - 0,48}{(1,02 - 0,102)} = 0,535,$$

а напряжение за элементом 4

$$U_4 = 0,48 + 0,535 \cdot 1,02 = 1,03.$$

Искомое напряжение прямой последовательности

$$U_1 = 1,03 - 0,32 \left(0,535 + \frac{1,03 - 0,85}{1,02 + 4,38} \right) = 0,85,$$

или

$$U_1 = 0,85 \cdot 6,3 = 5,35 \text{ кв.}$$

Если пренебречь всеми нагрузками, то

$$x_{1\Sigma} = 0,1 + 0,175 - 0,32 + 1,02 = 0,975$$

и искомое напряжение

$$U_1 = \frac{1}{2 \cdot 0,975} (1,02 - 0,32 + 0,975) = 0,86,$$

т. е. практически то же, что и выше. Как видно, в данном примере влияние нагрузки на искомое напряжение прямой последовательности за реактором практически совсем не сказывается.

15-10. ВЗАИМНОЕ ВЛИЯНИЕ СИНХРОННЫХ МАШИН ПРИ ПЕРЕХОДНОМ ПРОЦЕССЕ НЕСИММЕТРИЧНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

В заключение настоящей главы кратко остановимся на выявлении взаимного влияния синхронных машин на характер изменения токов и напряжений при переходном процессе несимметричного короткого замыкания.

Согласно правилу эквивалентности прямой последовательности (см. § 15-5) соображения и выводы, изложенные в гл. 10, в равной мере относятся к оценке изменения токов и напряжений прямой последовательности при любом несимметричном коротком замыкании. Что касается составляющих обратной и нулевой последовательностей токов или напряжений в произвольной ветви или точке схемы, то, коль скоро три принятых допущения (в частности, пренебрежении активными сопротивлениями цепи статора) они пропорциональны току прямой последовательности в месте короткого, их изменение определяется закономерностью изменения только этого тока.

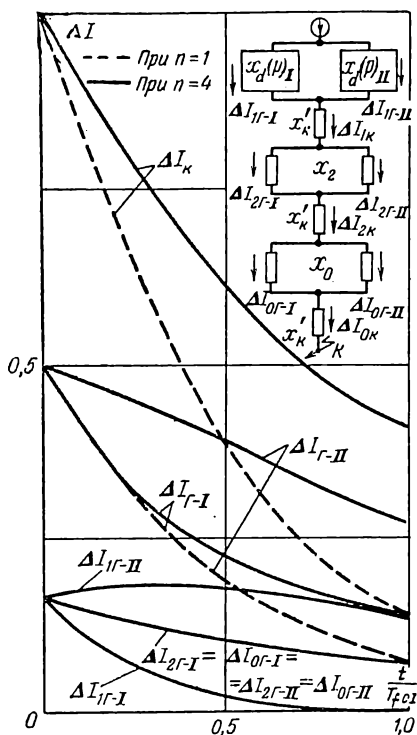


Рис. 15-26. Изменение свободных токов однофазного короткого замыкания при разных значениях постоянных времени T_g генераторов.

Таким образом, при несимметричном коротком замыкании свободная периодическая слагающая тока в произвольной ветви состоит из частных свободных токов в общем случае всех трех последовательностей, причем токи обратной и нулевой последовательностей для заданных конкретных условий

представляют собой некоторые постоянные доли соответствующих частных свободных токов прямой последовательности в месте короткого замыкания. В зависимости от того, сколь велико участие составляющих обратной и нулевой последовательностей в фазном токе той или иной ветви схемы, его изменение во времени может быть достаточно близким к изменению тока в месте короткого или, напротив, определяется в основном лишь изменением тока прямой последовательности данной ветви, которое, как отмечалось в § 10-2, может существенно отличаться от изменения тока в месте короткого замыкания.

Допустим, что в схеме рис. 10-1,а произошло однофазное короткое замыкание, причем нейтрали обоих генераторов наглухо заземлены. Как и раньше, считаем, что параметры генераторов отличаются только значениями своих постоянных времени T_{f0} .

Комплексная схема для рассматриваемого случая представлена на рис. 15-26, где в прямой последовательности генераторы введены своими операторными реактивностями. Чтобы воспользоваться для характеристики изменения тока прямой последовательности кривыми рис. 10-3, полученными для условий трехфазного короткого замыкания, очевидно, нужно предположить, что однофазное короткое замыкание произошло за реактивностью x'_k , величина которой удовлетворяет равенству

$$x_k = \frac{x_2}{2} + \frac{x_0}{2} + 3x'_k,$$

где x_2 и x_0 — реактивности обратной и нулевой последовательностей одного генератора.

На рис. 15-26 приведены кривые изменения симметричных составляющих свободных токов обоих генераторов, а также свободных фазных токов генераторов в месте короткого замыкания. Они даны для случая, когда постоянные времени T_{f0} генераторов отличаются существенно, $n=4$ и — для сравнения — при полной симметрии, т. е. $n=1$. Их построение выполнено на основе соответствующих кривых рис. 10-3,з.

При однофазном коротком замыкании в соответствии с принятыми условиями начальные значения свободных

токов всех последовательностей обоих генераторов одинаковы и каждый из них составляет $1/6 \Delta I_{\kappa|0|}$. Как видно, различие между свободными токами генераторов в данном случае меньше, чем при трехфазном коротком замыкании (см. рис. 10-3,з), причем если в последнем случае при $n > 1 \Delta I_{\Gamma-1}$ всегда меньше, чем при $n = 1$, то при однофазном коротком наблюдается обратная картина.

Из приведенного примера, разумеется, нельзя делать общих выводов, поскольку, как указывалось выше, характер изменения фазного тока в любой ветви схемы в значительной мере зависит от долевого участия в нем симметричных составляющих отдельных последовательностей. Сказанное относится также к оценке изменения напряжений при несимметричных коротких замыканиях.

Теперь обратимся к оценке влияния качаний генераторов при несимметричных коротких замыканиях. Как отмечалось ранее, качания возникают вследствие нарушения баланса между моментом на валу первичного двигателя и электромагнитным моментом, создаваемым практически только токами прямой последовательности. Можно заранее утверждать, что если трехфазное короткое в некоторой точке не вызывает нарушения устойчивости, то качания генератора при этом виде короткого сильнее, чем при любом несимметричном коротком в той же точке, так как в последнем случае напряжение прямой последовательности снижается меньше и соответственно токи прямой последовательности претерпевают меньшие изменения.

Дополнительное сопротивление $Z_{\Delta}^{(n)}$, вводимое в схему прямой последовательности, по существу эквивалентно подключению дополнительной нагрузочной ветви (обычно с малым коэффициентом мощности) или шунтированию ранее включенной нагрузки. В силу этого дополнительное сопротивление часто называют аварийным шунтом.

Пусть в точке K схемы рис. 10-4,а произошло не трехфазное, а, например, двухфазное короткое замыкание. Кривые рис. 10-4,з можно рассматривать как кривые изменения токов прямой последовательности в соответствующих ветвях схемы при двухфазном коротком

замыкании за реактивностью x'_K , если величина последней удовлетворяет равенству

$$x_K = \frac{x_2 x_C}{x_2 + x_C} + 2x'_K;$$

при принятых значениях реактивностей (см. § 10-3) $x_K=0,32$ и $x_C=0,57$, а также, считая $x_2=0,44$ и $x_{2C}=0,57$, находим $x'_K=0,035$.

Изменение тока поврежденных фаз в месте короткого замыкания в функции угла δ при принятых условиях, очевидно, выражается той же кривой, что и кривая I_K на рис. 10-4,2, но масштаб по оси ординат должен быть увеличен в $\sqrt{3}$ раз.

Определив собственные и взаимные реактивности в комплексной схеме и коэффициенты токораспределения в схеме обратной последовательности, нетрудно получить выражения для симметричных составляющих токов в любой ветви.

Так, для неповрежденной фазы A генератора, считая вектор напряжения фазы A системы совпадающим с осью действительных положительных величин, имеем:

$$I_{A1} = 2,6e^{-j\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right)} - 0,71e^{-j\frac{\pi}{2}};$$

$$I_{A2} = -0,93e^{-j\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right)} - 0,37e^{-j\frac{\pi}{2}}$$

и

$$I_A = 1,67e^{-j\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right)} - 1,08e^{-j\frac{\pi}{2}}.$$

Эти выражения могут быть представлены круговыми диаграммами (рис. 15-27,а), развертки которых дают искомые зависимости в виде кривых (рис. 15-27,б).

При определении токов поврежденных фаз (B и C) генератора графические построения можно несколько упростить, если вместо $\dot{I}_B$ и $\dot{I}_C$ находить соответственно $a\dot{I}_B$ и $a^2\dot{I}_C$, как показано на рис. 15-27,а. Концы векторов этих токов также скользят по соответствующим

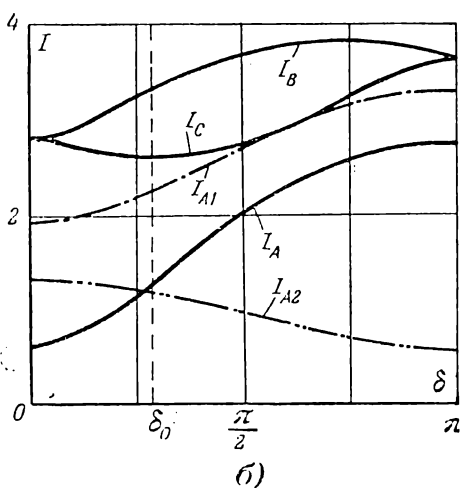
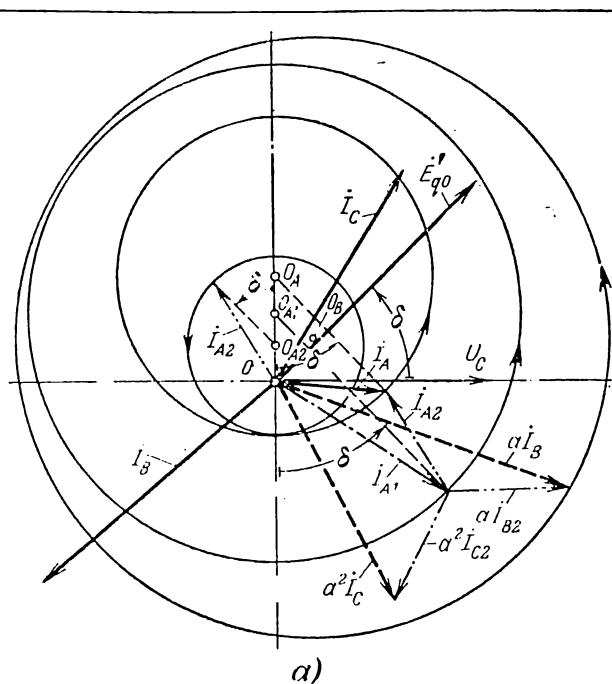


Рис. 15-27. К оценке влияния качаний генераторов при двухфазном коротком замыкании.

a — векторная и круговые диаграммы; **б** — изменение токов в зависимости от угла δ .

окружностям¹. Из кривых рис. 15-27,б видно, что при изменении δ от 0 до π ток I_B превышает ток I_C . В диапазоне от π до 2π , очевидно, имеет место обратное соотношение.

В общем случае в генераторной ветви с увеличением угла δ ток прямой последовательности возрастает, а токи обратной и нулевой последовательностей, напротив, падают. Поэтому когда в рассматриваемой фазе симметричные составляющие тока имеют один знак, влияние качаний сказывается меньше, чем когда эти составляющие имеют противоположные знаки. Наглядным примером может служить сравнение кривых фазных токов рис. 15-27,б с кривой I_r рис. 10-4,г. В то время как токи поврежденных фаз при двухфазном коротком замыкании зависят от угла δ слабее, чем при трехфазном коротком, ток неповрежденной фазы, напротив, зависит от угла δ сильнее.

Как отмечалось в § 10-3, качания генератора относительно мало сказываются на протекании электромагнитного переходного процесса, что позволяет учет качаний производить приближенно, используя практические методы расчета коротких замыканий (см. § 16-6).

15-11. ПРОСТОЕ ЗАМЫКАНИЕ НА ЗЕМЛЮ

При замыкании на землю одной из фаз в системе с изолированной нейтралью, т. е. при простом замыкании на землю, путь для тока, идущего в землю, осуществляется через емкостную проводимость элементов каждой фазы относительно земли.

Пусть в начале трехфазной линии, присоединенной к источнику переменного тока, произошло металлическое замыкание на землю (рис. 15-28,а). Распределенные вдоль линии емкости каждой фазы относительно земли условно представлены сосредоточенными емкостями, включенными в конце линии. Частичные емкости между отдельными фазами для простоты не показаны; при этом следует отметить, что их влияние на ток замыкания на землю очень мало (см. ниже).

¹ Центром окружности, по которой скользит вектор тока aI_B , на рис. 15-27,а является точка O_B .

Нетрудно проследить путь циркуляции тока замыкания на землю (он указан стрелками). Поступая в землю в месте замыкания, ток возвращается по неповрежденным фазам через их емкостные проводимости относительно земли. Емкостная проводимость поврежденной фазы оказывается зашунтированной рассматриваемым

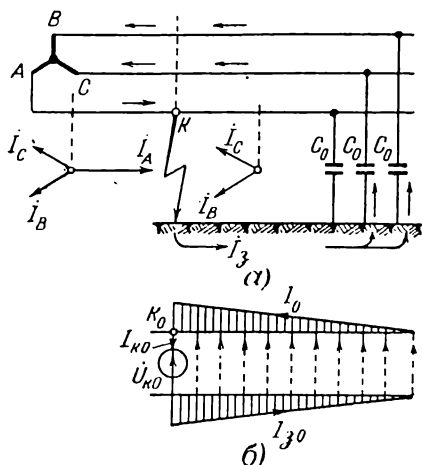


Рис. 15-28. Простое замыкание на землю.

a — принципиальная схема; *б* — эпюра пространственного распределения тока нулевой последовательности.

замыканием, и ток в этой фазе справа от места замыкания отсутствует, если пренебречь весьма малым током, который наводится токами двух других фаз на данном участке линии. Характер векторных диаграмм токов слева и справа от места замыкания показан на том же рисунке.

Поскольку емкостная проводимость линии распределена равномерно по ее длине, эпюра пространственного распределения тока нулевой последовательности, который со-

ставляет одну треть тока замыкания на землю, вдоль линии выражается наклонной прямой (рис. 15-28,б).

Граничные условия для простого замыкания на землю, естественно, те же, что и для однофазного короткого замыкания. Поэтому все выражения, полученные в § 15-3, в равной мере относятся к случаю простого замыкания на землю.

Емкостные сопротивления элементов электрической системы значительно превышают их индуктивные и активные сопротивления, что позволяет при определении тока простого замыкания на землю пренебречь последними и, следовательно, считать, что величина этого тока практически не зависит от места замыкания в рассматриваемой электрически связанной сети. Кроме того, так как этот ток относительно мал, при его нахождении можно считать, что напряжение источника сохраняется

неизменным. При таких допущениях в соответствии с (15-21) и (15-22) ток в месте замыкания на землю через дугу r_d будет

$$I_K = 3 \frac{\dot{U}_{\phi.c.p}}{3r_d - jx_{c0\Sigma}}, \quad (15-68)$$

где $x_{c0\Sigma}$ — результирующее емкостное сопротивление нулевой последовательности всех элементов (практически только линий и кабелей), электрически связанных с точкой замыкания; $U_{\phi.c.p}$ — среднее фазное напряжение той ступени, где рассматривается замыкание на землю.

Для симметричных составляющих напряжений за сопротивлением дуги при принятых допущениях согласно (15-26) — (15-28) имеем:

$$\dot{U}_{K'A1} = \dot{U}_{\phi.c.p}; \quad (15-69)$$

$$\dot{U}_{K'A2} = 0; \quad (15-70)$$

$$\dot{U}_{K'0} = \frac{jx_{c0\Sigma}}{3r_d - jx_{c0\Sigma}} \dot{U}_{\phi.c.p}. \quad (15-71)$$

На рис. 15-29 приведены векторные диаграммы напряжений и токов в месте простого замыкания на землю фазы А. Они построены при указанных допущениях. С изменением сопротивления дуги векторы токов и напряжений скользят по дугам соответствующих окружностей, как показано пунктиром. Треугольник линейных напряжений остается без изменений и лишь перемещается параллельно самому себе в соответствии с перемещением его центра тяжести, положение которого определяется напряжением нулевой последовательности. Неизменность линейных напряжений, в частности, обуславливает практически постоянное значение тока в емкостной проводимости между фазами как при нормальных условиях, так и при простом замыкании на землю.

Наибольшая величина тока замыкания на землю имеет место, разумеется, при металлическом замыкании ($r_d=0$) и согласно (15-68) составляет

$$I_K = 3j \frac{\dot{U}_{\phi.c.p}}{x_{c0\Sigma}}, \quad (15-72)$$

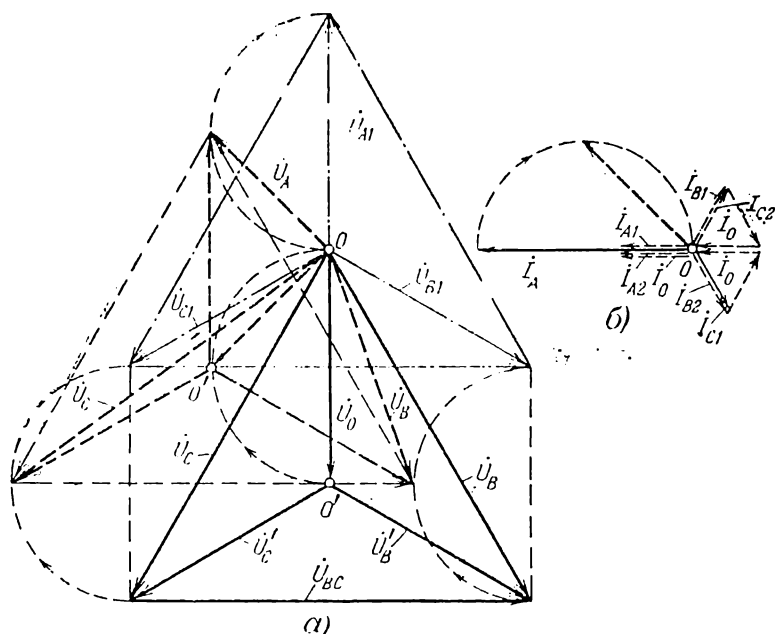


Рис. 15-29. Векторные диаграммы напряжений (а) и токов (б) в месте простого замыкания на землю.

т. е. она в 3 раза превышает емкостный ток на землю одной фазы в нормальных условиях.

С уменьшением сопротивления дуги напряжения поврежденной фазы стремится к нулю, а здоровых фаз — к соответствующим линейным напряжениям.

Аналогично комплексной схеме при однофазном коротком замыкании (см. рис. 15-10,б) может быть составлена такая же схема для простого замыкания на землю. Для этого, очевидно, нужно в схеме нулевой последовательности разземлить все нейтрали и в схемы каждой последовательности ввести соответствующие емкостные сопротивления. Пример такой комплексной схемы представлен на рис. 15-30. Здесь помимо емкостных сопротивлений, введены индуктивные сопротивления линии и трансформатора и сопротивление дуги.

Из приведенной схемы непосредственно следует, что для ограничения тока простого замыкания целесообразно нейтраль трансформатора заземлить через индуктивную

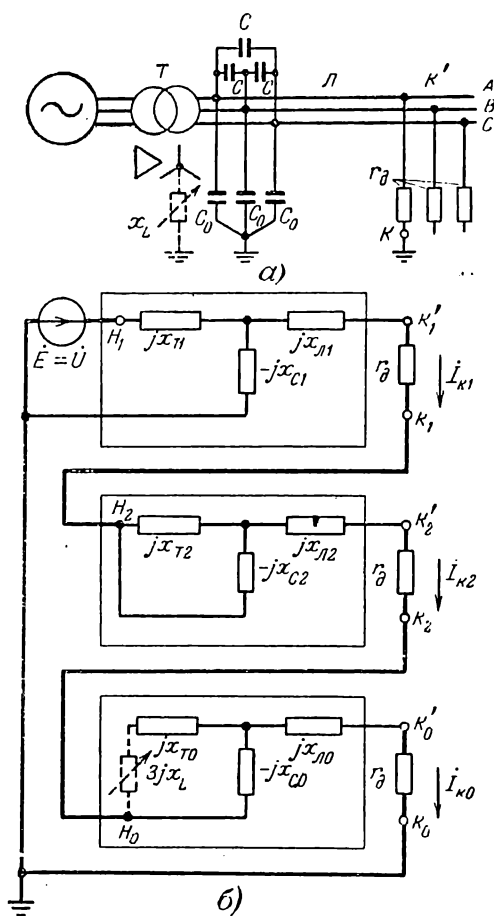


Рис. 15-30. Простое замыкание на землю через дугу.
 а — исходная схема; б — комплексная схема замещения.

катушку (как показано пунктиром). Индуктивность этой катушки можно выбрать таким образом, чтобы в цепи нулевой последовательности был обеспечен резонанс между индуктивностью и емкостью, что приведет к $x_{0\sigma} = \infty$, т. е. к отсутствию тока простого замыкания. Пренебрегая сопротивлением трансформатора, найдем, что данное условие будет выполнено при $x_L = \frac{1}{3} x_{c0}$.

Такие катушки называются дугогасящими. Их выполняют с регулированием индуктивности, для того чтобы можно было произвести их настройку при изменении в защищаемой сети. На том же принципе построены другие дугогасящие устройства, подключаемые непосредственно к фазам сети [Л. 116].

Пример 15-11. Определить ток при простом металлическом замыкании на землю в сети 37 кВ, имеющей воздушные линии передачи общей протяженностью 200 км.

Линия: провод АС-95; расположение проводов: по вершинам треугольника с расстояниями $d_{ab}=4,06$ м; $d_{ac}=3,5$ м; $d_{bc}=3,09$ м. Высота подвеса проводов $h_a=h_c=8$ м; $h_b=11$ м.

По соответствующим выражениям § 13-8 находим емкостное сопротивление нулевой последовательности линий. Предварительно определяем:

$$\begin{aligned} r &= 6,75 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \\ D_{cp} &= \sqrt[3]{4,06 \cdot 3,5 \cdot 3,09} = 3,53 \text{ м}; \\ D_i &= 2 \frac{8 + 11 + 8}{3} = 18 \text{ м}; \\ R'_{cp} &= \sqrt[3]{6,75 \cdot 10^{-3} \cdot 3,53^2} = 0,44 \text{ м}. \end{aligned}$$

Погонное значение емкостного сопротивления нулевой последовательности

$$x_{c0} = -j396 \left(\lg \frac{18}{0,44} \right) \cdot 10^3 = -j636 \cdot 10^3 \text{ ом}$$

и соответственно всей сети $x_{c0} = -j \frac{636}{200} \cdot 10^3 = -j3180 \text{ ом}$.

Искомый ток замыкания на землю

$$I_k = 3 \frac{37000}{\sqrt{3}(-j3180)} \approx j20 \text{ а}.$$

Чтобы полностью скомпенсировать ток замыкания на землю, в данном случае достаточно нейтраль обмотки 37 кВ трансформатора заземлить через катушку, индуктивное сопротивление которой должно быть

$$x_L = j \frac{3180}{3} = j1060 \text{ ом.}$$

15-12. ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. В каком соотношении находятся симметричные составляющие тока фазы B при коротком замыкании между фазами A и C ?

2. В чем заключается необходимость представления схемы рис. 15-2,а эквивалентной схемой рис. 15-2,б?

3. Построить векторную диаграмму напряжений при замыкании фазы B на землю в системе с изолированной нейтралью. Каково при этом смещение нейтралей системы?

4. Произошло металлическое замыкание на землю фаз A и C . В каком соотношении находятся симметричные составляющие напряжений фазы C в месте короткого?

5. Доказать, что минимум коэффициента $m^{(1,1)}=1,5$.

6. Для случая, когда фаза A короткозамкнута на землю, а фазы B и C — между собой (так называемое однофазно-двухфазное короткое замыкание), написать граничные условия и найти вытекающие из них соотношения для симметричных составляющих напряжений и токов в месте короткого (фазу A считать особой).

7. Для условий предыдущей задачи определить, в каком соотношении находятся модули токов фаз A и B .

8. В символах метода симметричных составляющих составить уравнения граничных условий для случая, когда фаза B заземлена наглухо, а фаза C заземлена через сопротивление r_c . Неповрежденную фазу A принять за особую.

9. Фаза A заземлена наглухо, а фазы B и C — соответственно через r_b и r_c . Выразить симметричные составляющие напряжения фазы A через симметричные составляющие тока той же фазы.

10. При каком допущении справедливо правило эквивалентности прямой последовательности, сформулированное в § 15-5?

11. Как изменяется величина тока однофазного короткого замыкания в схеме рис. 15-9. при перемещении точки короткого по линии, когда поочередно разземлена нейтраль одного или другого трансформатора?

12. Через какую реактивность нужно заземлить нейтраль трансформатора $T-2$ в схеме рис. 15-9, чтобы при однофазном коротком замыкании в конце линии токи в нейтральных обоих трансформаторов были одинаковыми? При этих условиях определить в номинальных относительных единицах начальные значения фазных токов и напряжений на обеих сторонах каждого трансформатора.

13. В схеме рис. 15-18,а требуется ограничить ток при однофазном коротком замыкании на линии. Для этого намечены три варианта включения реактора:

а) в фазах линии;

б) в нейтрали трансформатора;

в) в фазах на участке между генератором и трансформатором.

Установить относительную эффективность этих вариантов, считая, что в каждом из них используется реактор с одной и той же относительной базисной реактивностью.

14. Трансформатор 90 Мва, 115/154 кВ; соединение обмоток Y_0/Y_0-12 ; $u_k=11\%$; подключен со стороны 115 кВ к источнику бесконечной мощности, нейтраль которого заземлена наглухо. На выводе 154 кВ трансформатора произошло однофазное короткое замыкание (металлическое). Считая напряжение источника равным 110 кВ, определить ток в месте короткого и напряжения нейтралей трансформатора для следующих вариантов:

- а) обе нейтралей трансформатора заземлены наглухо;
- б) нейтраль обмотки 154 кВ заземлена через $x=25$ Ом, а нейтраль обмотки 115 кВ — наглухо;
- в) нейтраль обмотки 154 кВ заземлена наглухо, а нейтраль обмотки 115 кВ — через $x=25$ Ом;
- г) нейтралей обмоток 115 и 154 кВ объединены и их общая точка заземлена через $x=25$ Ом.

15. Провести решение примера 15-4 с учетом дуги в месте короткого замыкания, приняв ее относительное сопротивление $r_d=0,3$ (при тех же условиях, что и сопротивления других элементов).

16. Решить пример 15-5 при условии, что за трансформатором Т-2 также включен источник бесконечной мощности, который поддерживает напряжение 10,5 кВ.

17. В каком соотношении находятся величины токов при разных видах короткого замыкания, если постоянные времени затухания свободных переходных токов одинаковы?

18. Для генератора с параметрами $x_d=1,0$; $x_q=0,6$; $x'_d=0,3$; $r=0,01$; $I_{fnp}=3,3$; $T_{j0}=4,8$ сек; $T_e=0,35$ сек составить численное выражение для мгновенного значения тока при двухфазном коротком замыкании на его выводах. Считать, что короткое произошло в момент, когда напряжение неповрежденной фазы проходило через нуль. До короткого замыкания генератор работал на холостом ходу с номинальным напряжением.

19. При данных примера 15-6 определить, в какой момент времени токи при двухфазном и однофазном коротких замыканиях одинаковы.

20. Известно, что для генератора без АРВ установившиеся токи при трехфазном, двухфазном и однофазном коротких замыканиях в одной и той же точке сети одинаковы. Определить, в каком соотношении с током трехфазного короткого замыкания находится ток двухфазного короткого замыкания на землю в той же точке.

21. Составить комплексную схему замещения для случая, когда фаза А замкнута на землю через сопротивление дуги r_d , а две другие фазы В и С заземлены наглухо.

22. Как изменятся векторные диаграммы токов и напряжений рис. 15-19, если обмотку трансформатора генераторного напряжения соединить в звезду, а вторичную обмотку — в треугольник?

23. Как изменятся векторные диаграммы токов и напряжений генератора, представленные на рис. 15-20, если соединение обмоток трансформатора было бы не $Y_0/\Delta-11$, а $Y_0/\Delta-3$?

24. При найденной в примере 15-9 длине линии для схемы рис. 15-24,а определить напряжение прямой последовательности генератора при установившемся режиме однофазного короткого замыкания в точке К. Дополнительные данные для генератора: $x_d=1,1$; $I_{j0}=1,65$ и $I_{fnp}=3,2$. Решение произвести при наличии и отсутствии АРВ.

25. Оценить влияние нагрузки в начальный момент двухфазного короткого замыкания на шинах пониженного напряжения схемы рис. 15-25,а.

26. Как изменятся кривые свободных токов обоих генераторов, представленные на рис. 15-26, если нейтраль генератора $G-II$ заземлить, но в то же время считать, что внешняя реактивность x'_k уменьшена настолько, что величина $T_{a,3}^{(1)}$ сохранилась прежней?

27. На сборных шинах схемы рис. 10-1,а произошло двухфазное короткое замыкание. Операторные реактивности обоих генераторов даны в § 10-2. Реактивности обратной последовательности генераторов одинаковы: каждая из них составляет $x_2 = 2x'_d$. Построить кривые изменения свободных токов в поврежденной и неповрежденной фазах каждого генератора и в месте короткого, приняв $n = T_{f011}/T_{011} = 4$.

28. Подобно рис. 15-27 построить круговые диаграммы симметричных составляющих и фазных токов в ветви системы при условиях, изложенных в § 15-10. По этим диаграммам построить кривые изменения соответствующих токов в функции угла δ .

29. При двухфазном коротком замыкании на линии с общей относительной реактивностью $x=0,3$ измерены напряжения и токи прямой и обратной последовательностей в начале этой линии, относительные величины которых оказались следующими: $U_1=0,7$; $U_2=0,4$ и $I_1=I_2=0,8$. Определить (пренебрегая активными сопротивлениями, емкостью линии и другими второстепенными факторами), на какой относительной длине линии, считая от ее начала, произошло это короткое замыкание.

30. Линия передачи длиной 100 км (с $x_1=0,4$ ом/км и $x_0=2x_1$) подключена к шинам 115 кВ станции, а на другом конце отключена. При возникшем на ней коротком замыкании регистрирующими приборами зафиксированы следующие величины: токи в линии $I_A=I_C=600$ а; $I_0=200$ а; напряжения на шинах станции $U_1=34$ кВ (фазное) и $U_0=10$ кВ. Определить вид короткого замыкания и на каком расстоянии от шин оно произошло.

31. В середине линии с односторонним питанием произошло простое замыкание на землю. Показать путь циркуляции тока слева и справа от места замыкания.

32. Провести анализ векторных диаграмм токов, представленных на рис. 15-28,а. Какие симметричные составляющие они содержат?

33. Определить напряжение нейтрали системы при простом замыкании на землю через активное сопротивление дуги, численно равное результирующему емкостному сопротивлению нулевой последовательности сети, где произошло такое замыкание. Всеми остальными сопротивлениями пренебречь.

34. Провести решение примера 15-11, считая что вместо воздушной сети имеется кабельная сеть. Кабель ОСБ-35, сечение жилы 70 мм². Определить индуктивное сопротивление дугогасящей катушки, при котором обеспечивается полная компенсация тока замыкания.

35. Провести решение примера 15-11, считая что все линии данной сети защищены тросом ПС-50, который расположен симметрично относительно нижних проводов и находится от них на расстоянии 4,5 м.

ГЛАВА ШЕСТНАДЦАТАЯ

ПРИМЕНЕНИЕ ПРАКТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ К РАСЧЕТУ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ПРИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

16-1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Изложенные в гл. 11 практические методы расчета переходных процессов согласно правилу эквивалентности прямой последовательности могут быть применены для расчета переходного процесса при любом несимметричном коротком замыкании.

Ранее неоднократно отмечалось, что практические методы расчета обычно позволяют с относительно большей точностью оценить величину тока в месте короткого замыкания. Следовательно, коль скоро токи обратной и нулевой последовательностей при несимметричном коротком замыкании пропорциональны току прямой последовательности в месте короткого, то распределение токов и напряжений обратной и нулевой последовательностей также получается с относительно большей точностью, чем распределение токов и напряжений прямой последовательности. Это обстоятельство важно для практики, так как позволяет в тех случаях, когда требуется знать токи (или напряжения) только обратной и нулевой последовательностей (например, при определении токов, влияющих на провода связи, при проектировании и настройке специальных устройств релейной защиты и автоматики, а также при решении ряда других технических задач и вопросов), применять более простые методы расчета.

Хотя правило эквивалентности прямой последовательности и дает общий ответ на вопрос, как определить величины токов и напряжений прямой последовательности при любом несимметричном коротком замыкании в одной точке системы, тем не менее все же представляется целесообразным дополнительно остановиться на каждом из практических методов и отметить некоторую специфику их применения к расчету несимметричных коротких замыканий. Для большей наглядности каждый из этих методов иллюстрирован примерами.

16-2. РАСЧЕТ НАЧАЛЬНОГО СВЕРХПЕРЕХОДНОГО И УДАРНОГО ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

В большинстве практических расчетов несимметричного короткого замыкания для начального момента в качестве схемы обратной последовательности можно принимать схему прямой последовательности, исключив из последней все э. д. с. Соответственно этому результатирующие сопротивления (или реактивности) обратной и прямой последовательностей практически одинаковы, т. е.

$$Z_{2\Sigma} \approx Z'_{\Sigma} \text{ или } x_{2\Sigma} \approx x'_{\Sigma}.$$

Как теперь известно, напряжение прямой последовательности в любой точке при несимметричных коротких замыканиях всегда значительно выше, чем при трехфазном коротком замыкании в той же точке. Поэтому подпитывающий эффект отдельных двигателей или нагрузок в целом при несимметричных коротких замыканиях проявляется меньше, чем при трехфазном коротком. В силу этого часто представляется возможным при расчете ударного тока несимметричного короткого замыкания пренебрегать нагрузками и отдельными асинхронными двигателями, за исключением лишь тех, которые непосредственно связаны с точкой короткого замыкания и мощность которых достаточно велика.

Для оценки ударного коэффициента при несимметричном коротком замыкании можно использовать выражение (3-9), вводя в него эквивалентную постоянную времени затухания апериодической слагающей тока при данном виде короткого замыкания, определяемую по (15-56). 4

При необходимости более точного учета нагрузки, что встречается при определении токораспределения в начальный момент короткого замыкания, как отмечалось в § 2-7, удобно использовать принцип наложения предшествующего нормального режима на собственно аварийный режим. Расчет последнего при несимметричном коротком замыкании сводится к нахождению токов и напряжений в комплексной схеме, соответствующей данному виду короткого замыкания, при включении ее на напряжение, равное по величине и противоположное по направлению тому напряжению, которое было в точке короткого замыкания до его возникновения. Дополни-

тельное упрощение в расчете такого режима, как известно, состоит в том, что здесь можно пренебречь активными сопротивлениями элементов схемы. Однако в протяженной воздушной и особенно кабельной сети часто приходится учитывать активное сопротивление линий, влияние которого особенно заметно при однофазном коротком замыкании. Равным образом при учете токоограничивающего эффекта дуги, возникающей в месте короткого замыкания, также приходится вводить в схемы соответствующих последовательностей ее активное сопротивление.

Пример 16-1. Для условий примера 15-5 определить эквивалентную постоянную времени $T_{a.э}^{(1)}$ при однофазном коротком замыкании и сопоставить получающееся при этом приближенное значение тока в момент $t = 0,94 \cdot 10^{-2}$ сек с полученным в указанном примере.

Используя рис. 15-13,б, найдем суммарные индуктивности

$$L_{1\Sigma} = L_{2\Sigma} = 0,17 + 0,13 = 0,3 \text{ гн};$$

$$L_{0\Sigma} = (0,17 + 0,48) // 0,23 = 0,17 \text{ гн}$$

и суммарные активные сопротивления

$$r_{1\Sigma} = r_{2\Sigma} = 21 \text{ ом};$$

$$r_{0\Sigma} = 36 // 0 = 0.$$

Искомая постоянная времени в соответствии с (15-56)

$$T_{a.э}^{(1)} = \frac{2 \cdot 0,30 + 0,17}{2 \cdot 21 + 0} = 0,018 \text{ сек.}$$

Найденные в примере 15-5 начальные значения свободных токов позволяют определить начальную величину аperiodической слагающей тока. Она очевидно составляет:

$$i_{a|0|} = 490 + 1810 = 2300 \text{ а.}$$

Значение тока при $t = 0,94 \cdot 10^{-2}$ сек будет:

$$i_A = 2340 + 2300 \cdot e^{\frac{-0,94}{1,8}} = 3700 \text{ а,}$$

вместо 3650 а, т. е. больше всего лишь на 1,4%.

Пример 16-2. Для схемы рис. 11-3,а при двухфазном коротком замыкании в точке К определить начальные значения сверхпереходных токов в фазах линии Л-1. К данным, приведенным в примере 11-1, дополнительно известно, что реактивность генератора $x_2 = 0,213$ и у трансформатора Т-3 обмотки соединены по схеме $Y_0/\Delta-11$; нагрузка Н 120 Мва, 10,5 кВ.

Проведем решение, как и примера 11-1, путем наложения собственно аварийного режима на предшествующий нормальный режим, который задан в самом условии упомянутого примера.

При ранее выбранных базисных условиях (см. пример 11-1) реактивность обратной последовательности генератора будет:

$$x_2 = 0,213 \frac{500}{353} \left(\frac{20,0}{16,9} \right)^2 = 0,421.$$

Для нагрузки принимаем $x'' = x_2 = 0,35$, что при базисных условиях составит:

$$x'' = x_2 = 0,35 \frac{500}{120} \left(\frac{10,5}{10,75} \right)^2 = 1,4.$$

Остальные элементы в схему обратной последовательности войдут теми же реактивностями, что и в схему прямой последовательности.

Для большей точности расчета нагрузку нужно ввести как в схему прямой, так и в схему обратной последовательности. Комплексная схема для собственно аварийного режима в данном случае имеет вид, представленный на рис. 16-1, где указаны относительные базисные реактивности всех элементов¹.

Найдем результирующие реактивности: схемы прямой последовательности

$$x_8 = 0,347 + 0,274 + 0,202 = 0,823;$$

$$x_9 = 0,202 + 0,322 = 0,524;$$

$$x_{10} = 0,823 // 0,524 = 0,32; \quad x_{11} = 0,32 + 0,61 = 0,93;$$

$$x_{1\Sigma} = 0,93 // 1,4 = 0,559;$$

схемы обратной последовательности

$$x_8 = 0,421 + 0,274 + 0,202 = 0,897; \quad x_9 = 0,524;$$

$$x_{10} = 0,897 // 0,524 = 0,33; \quad x_{11} = 0,33 + 0,61 = 0,94;$$

$$x_{2\Sigma} = 0,94 // 1,4 = 0,563.$$

Считая неповрежденной фазу А, находим ток прямой последовательности в месте короткого

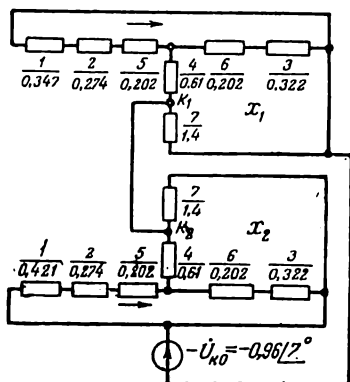


Рис. 16-1. Комплексная схема замещения к примеру 16-2.

¹ Один и тот же элемент в схемах разных последовательностей обозначен одинаковым порядковым номером.

$$I_{\kappa A1} = \frac{0 - (-0,96 \angle 7^\circ)}{(0,559 + j0,563) \angle 90^\circ} = 0,855 \angle -83^\circ.$$

Аварийная составляющая тока прямой последовательности фазы A линии $L-I$ будет:

$$I_{авA1} = 0,855 \angle -83^\circ \cdot \frac{0,559}{0,93} \frac{0,32}{0,823} = 0,2 \angle -83^\circ,$$

то же обратной последовательности

$$I_{авA2} = -0,855 \angle -83^\circ \frac{0,563}{0,94} \frac{0,33}{0,897} = -0,188 \angle -83^\circ.$$

Умножив эти токи на базисный ток $I_6 = 1,41$ *ка* (на стороне линии $L-I$) и перейдя к записи в комплексах, получим:

$$I_{авA1} = 1,41 \cdot 0,2 \angle -83^\circ = 0,034 - j0,282 \text{ ка};$$

$$I_{авA2} = -1,41 \cdot 0,188 \angle -83^\circ = -0,323 + j0,263 \text{ ка}.$$

Полный ток прямой последовательности фазы A линии $L-I$ определяем как сумму аварийной составляющей $I_{авA1}$ и предшествующего тока I_{A0} , т. е.

$$I_{A1} = 0,034 - j0,282 + 0,86 - j0,19 = 0,894 - j0,472 \text{ ка}.$$

При суммировании токов прямой и обратной последовательностей одноименных фаз необходимо учесть, что короткое замыкание отделено от рассматриваемой линии трансформатором, при переходе через который произойдет сдвиг симметричных составляющих токов друг относительно друга. В данном случае обмотки трансформатора $T-3$ соединены по схеме $Y_0/\Delta-11$, поэтому при переходе со стороны треугольника на сторону звезды ток прямой последовательности повернется на -30° , а обратной на $+30^\circ$. Как указывалось в § 14-5, можно поступить проще: сохранить векторы тока прямой последовательности и повернуть на удвоенный угол векторы тока обратной последовательности. Так, для фазы A линии $L-I$ получим:

$$I_A = 0,894 - j0,472 + (-0,323 + j0,263) e^{j60^\circ} = 0,504 - j0,62 \text{ ка}.$$

Полная векторная диаграмма токов в линии $L-I$ представлена на рис. 16-2. Из нее видно, что в данном случае аварийная составляющая тока значительно меньше тока предшествующего режима.

Пример 16-3. На линии схемы рис. 15-24,а в 100 км от станции произошло металлическое замыкание между фазами B и C с одно-временным замыканием образовавшейся общей точки через дугу на землю. Для начального момента нарушения режима построить векторные диаграммы токов в линии и напряжений в ее начале. Построение произвести с учетом активных сопротивлений линии и дуги, приняв для них следующие значения: для линии $r_1 = r_2 = 0,28$ *ом/км*, $r_0 = 0,43$ *ом/км*, для дуги $r_{д.з} = 9,5$ *ом*.

При принятых в примере 15-9 базисных условиях ($S_6 = 60$ *Мва* и $U_6 = U_{ср}$) сопротивления линии и дуги в относительных единицах будут:

$$Z_{Л1} = Z_{Л2} = 0,07 + j0,1, \quad Z_{Л0} = 0,11 + j0,3$$

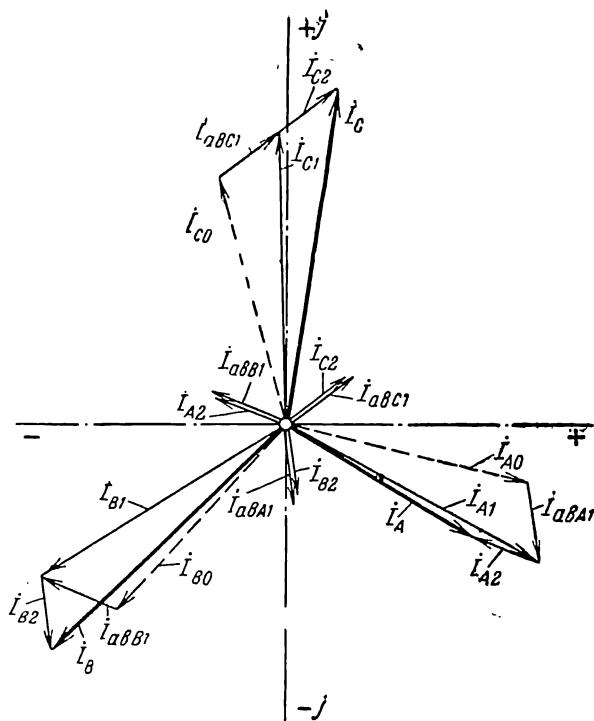


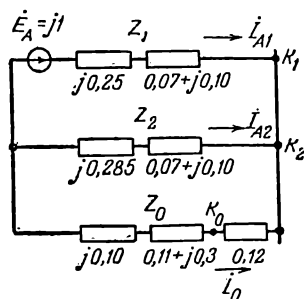
Рис. 16-2. Векторная диаграмма токов к примеру 16-2.

и

$$r_{д.з} = 0,04.$$

Комплексная схема для данного случая представлена на рис. 16-3. Здесь в схемах прямой и обратной последовательностей использованы упрощения, проведенные в примере 15-9.

Рис. 16-3. Комплексная схема замещения к примеру 16-3.



Результирующие сопротивления схем отдельных последовательностей равны:

$$Z_{1\Sigma} = 0,07 + j0,35 = 0,36 \angle 78,5^\circ;$$

$$Z_{2\Sigma} = 0,07 + j0,385 = 0,39 \angle 79,5^\circ;$$

$$Z_{0\Sigma} = 0,23 + j0,40 = 0,46 \angle 60^\circ.$$

Дополнительное сопротивление

$$Z_{\Delta}^{(1,1)} = (0,07 + j0,385) // (0,23 + j0,4) = 0,07 + j0,2 = 0,214 \angle 70,5^\circ.$$

Суммарное сопротивление для данного вида короткого замыкания

$$Z_{\Sigma}^{(1,1)} = (0,07 + j0,35) + (0,07 + j0,20) = 0,14 + j0,55 = 0,57 \angle 75,5^\circ.$$

Находим симметричные составляющие токов в месте короткого замыкания (которые в данном случае одновременно являются симметричными составляющими токов в линии):

$$I_{KA1} = \frac{1 \cdot \angle 90^\circ}{0,57 \angle 75,5^\circ} = 1,75 \angle 14,5^\circ;$$

$$I_{KA2} = (-1,75 \angle 14,5^\circ) \cdot \frac{0,214 \angle 70,5^\circ}{0,39 \angle 79,5^\circ} = -0,96 \angle 5,5^\circ;$$

$$I_{K0} = (-1,75 \angle 14,5^\circ) \cdot \frac{0,214 \angle 70,5^\circ}{0,46 \angle 60^\circ} = -0,82 \angle 24,5^\circ.$$

Симметричные составляющие напряжений в начале линии здесь легче определить, идя в схеме каждой последовательности от точки нулевого потенциала, т. е.

$$\dot{U}_{A1} = 1 \angle 90^\circ - (1,75 \angle 14,5^\circ) 0,25 \angle 90^\circ = 0,6 \angle 78^\circ;$$

$$\dot{U}_{A2} = 0 - (-0,96 \angle 5,5^\circ) 0,285 \angle 90^\circ = 0,274 \angle 95,5^\circ;$$

$$\dot{U}_0 = 0 - (-0,82 \angle 24,5^\circ) 0,10 \angle 90^\circ = 0,082 \angle 114,5^\circ.$$

По найденным симметричным составляющим токов и напряжений на рис. 16-4 построены векторные диаграммы. Как показано, ток фазы *B* значительно (на 25%) превышает ток фазы *C*. Легко убедиться, что смещенная нейтраль системы (точка *O'*) находится в центре тяжести треугольника линейных напряжений.

Пример 16-4. При однофазном коротком замыкании в точке *K* схемы рис. 16-5 построить кривые изменения начальных сверхпереходных токов в фазах обоих генераторов в зависимости от соотношения номинальных мощностей последних.

Параметры генераторов, отнесенные к своим номинальным условиям, следующие: $x''_d = 0,24$; $x_2 = 0,30$; $x_0 = 0,08$. Их относительные э. д. с. $E = 1,0$. Условно принято, что нейтраль генератора *I-1* заземлена через $x = 0,05$ (отнесено к номинальным условиям генератора).

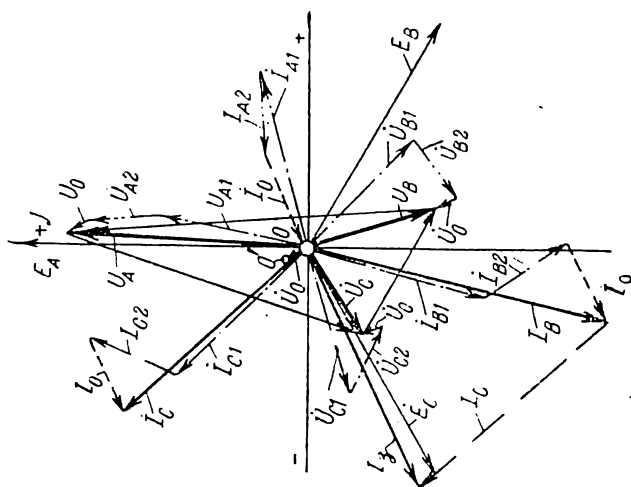


Рис. 16-4. Векторные диаграммы токов и напряжений к примеру 16-3.

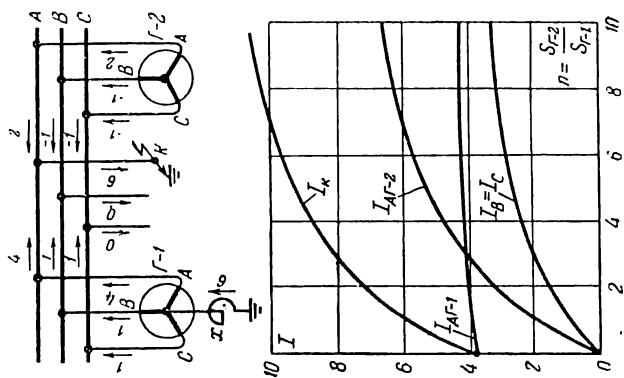


Рис. 16-5. К примеру 16-4.

Пусть номинальная мощность генератора $\Gamma-2$ $\dot{S}_{\Gamma-2} = n\dot{S}_{\Gamma-1}$. Тогда его реактивности, отнесенные к номинальной мощности генератора $\Gamma-1$, составят: $x_1 = \frac{0,24}{n}$ и $x_2 = \frac{0,30}{n}$.

Для результирующих реактивностей отдельных последовательностей имеем:

$$x_{1\Sigma} = \frac{0,24}{(n+1)}; \quad x_{2\Sigma} = \frac{0,30}{(n+1)}; \quad x_{0\Sigma} = 0,08 + 3 \cdot 0,05 = 0,23.$$

Принимая $\dot{E}_A = j1,0$, для тока прямой последовательности в месте короткого замыкания получим:

$$I_{KA1} = \frac{j1,0}{j \left[\frac{0,24}{(n+1)} + \frac{0,30}{(n+1)} + 0,23 \right]} \quad \text{и} \quad I_{KA} = 3 I_{KA1}.$$

Нетрудно установить, что токи в фазах могут быть представлены следующими выражениями:
для генератора $\Gamma-1$

$$I_A = I_{KA1} \frac{n+3}{n+1} \quad \text{и} \quad I_B = I_C = -I_{KA1} \frac{n}{n+1},$$

для генератора $\Gamma-2$

$$I_A = I_{KA1} \frac{2}{n+1} \quad \text{и} \quad I_B = I_C = -I_{KA1} \frac{n}{n+1}.$$

Полученные выражения позволяют легко построить искомые зависимости, которые представлены кривыми на рис. 16-5.

В пределе, когда $n = \infty$, токи достигают наибольших значений:

$$I_{KA} = 13,05; \quad I_{A\Gamma-1} = I_{B\Gamma-1} = I_{C\Gamma-1} = 4,35;$$

$$I_{A\Gamma-2} = 8,7, \quad I_{B\Gamma-2} = I_{C\Gamma-2} = -4,35.$$

Таким образом, при параллельной работе генератора $\Gamma-1$ с источником бесконечной мощности ток однофазного короткого замыкания (при заданной реактивности в нейтрали) увеличивается в $\frac{13,05}{3,9} = 3,35$ раза по сравнению с тем, который имеет место при одиночной работе генератора $\Gamma-1$ (в той же реактивности в его нейтрали).

Нанесенное на схеме рис. 16-5 токораспределение соответствует условию, что оба генератора одинаковые ($n=1$). Оно наглядно показывает, что генератор $\Gamma-2$ с незаземленной нейтралью участвует в питании однофазного короткого замыкания, используя за-

мкнутый контур через заземленную нейтраль и неповрежденные фазы генератора Г-1.

Как видно по характеру кривых рис. 16-5, ток в поврежденной фазе генератора Г-1 очень мало зависит от мощности параллельно работающего с ним генератора Г-2.

16-3. РАСЧЕТ ДЛЯ ВЫБОРА ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ ПО ОТКЛЮЧАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

В системах с заземленной нейтралью при выборе выключателей по отключающей способности приходится считаться с условиями однофазного короткого замыкания, если они оказываются тяжелее, чем условия трехфазного короткого замыкания [Л. 33].

Поскольку данный расчет является достаточно приближенным, то можно принимать $x_{2\Sigma} \approx x''_{\Sigma}$. Тогда расчетный ток однофазного короткого замыкания будет:

$$I_{\text{от.расч}}^{(1)} = \alpha \frac{\sqrt{3} U_{\text{ср}}}{2x''_{\Sigma} + x_{0\Sigma}} = \alpha \frac{3I_0}{2x''_{\Sigma(\sigma)} + x_{0\Sigma(\sigma)}}, \quad (16-1)$$

где α — коэффициент, учитывающий участие апериодической слагающей тока и затухание периодической слагающей тока к расчетному времени размыкания контактов выключателя.

Для определения величины этого коэффициента могут быть использованы кривые рис. 11-7, где в качестве аргумента следует принимать отношение:

$$\frac{x}{r} = \frac{2x''_{\Sigma} + x_{0\Sigma}}{2r_{\Sigma} + r_{0\Sigma}}, \quad (16-2)$$

в котором (как и при определении $T_{\text{а.э}}) x''_{\Sigma}$ и $x_{0\Sigma}$ находят при $r=0$, а r_{Σ} и $r_{0\Sigma}$ — при $x=0$.

При одной ступени трансформации между источником и точкой короткого замыкания значение α для данного расчетного времени и найденного отношения $\frac{x}{r}$ следует брать средним между теми значениями, которые дают сплошная и пунктирная кривые рис. 11-7. Для удаленного короткого, когда ступеней трансформации две и более, значение α следует находить по соответствующей пунктирной кривой того же рисунка.

Пример 16-5. При однофазном коротком замыкании в точке K схемы рис. 16-6,а определить ток для расчетного времени 2 периода.

Генераторы $G-1-G-3$ одинаковые, каждый 376 Мва, 20 кВ, $x''_d = 20,4\%$, $x_2 = 24,5\%$, $T_a = 0,43$ сек.

Автотрансформатор AT 480 Мва, 525/230/20 кВ, $u_{вс} = 10\%$, $u_{вн} = 30\%$, $u_{сн} = 20\%$.

Трансформаторы $T-1$ и $T-2$ одинаковые, каждый 360 Мва, 230/20 кВ, $u_K = 14\%$.

Линия: 100 км, $x_1 = 0,42$ ом/км, $r_1 = 0,07$ ом/км, $x_0 = 1,26$ ом/км, $r_0 = 0,22$ ом/км.

Система C — источник бесконечной мощности с наглухо заземленной нейтралью.

За базисные условия примем $S_б = 1000$ Мва и $U_б = U_{ср}$.

На рис. 16-6,б и в показаны схемы прямой (она же обратной) и нулевой последовательностей. Приведенные на них значения реактивностей и активных сопротивлений отдельных элементов выражены в относительных единицах при принятых базисных условиях. Активное сопротивление статорной обмотки генераторов определено, исходя из заданных величин x_2 и T_a , т. е.

$$r = \frac{x_2}{\omega T_a} \cdot \frac{S_б}{S_{н}} = \frac{0,245}{314 \cdot 0,43} \cdot \frac{1000}{376} = 0,0048.$$

Для автотрансформатора AT и трансформаторов $T-1$ и $T-2$ в соответствии с данными табл. 11-2 принято $\frac{x}{r} = 40$.

Результирующие реактивности и активные сопротивления в данном случае будут (определяя, как указывалось, x_Σ и r_Σ отдельно):

$$x''_\Sigma = \frac{(0,54 + 0,39)}{2} // (0,54 + 0,42) // (0,15 + 0,21) = 0,17;$$

$$r_\Sigma = \frac{(0,0048 + 0,01)}{3} // (0,025 + 0,005) = 0,0042;$$

$$x_{0\Sigma} = \frac{0,39}{2} // 0,42 // (0,45 + 0,21) = 0,11;$$

$$r_{0\Sigma} = \frac{0,01}{3} // (0,044 + 0,005) = 0,0031.$$

Отношение

$$\frac{2x''_\Sigma + x_{0\Sigma}}{2r_\Sigma + r_{0\Sigma}} = \frac{2 \cdot 0,17 + 0,11}{2 \cdot 0,0042 + 0,0031} = 39.$$

Интерполируя между соответствующими кривыми (для 2 периодов) рис. 11-7, для $\frac{x}{r} = 39$ находим $\alpha = 1,36$.

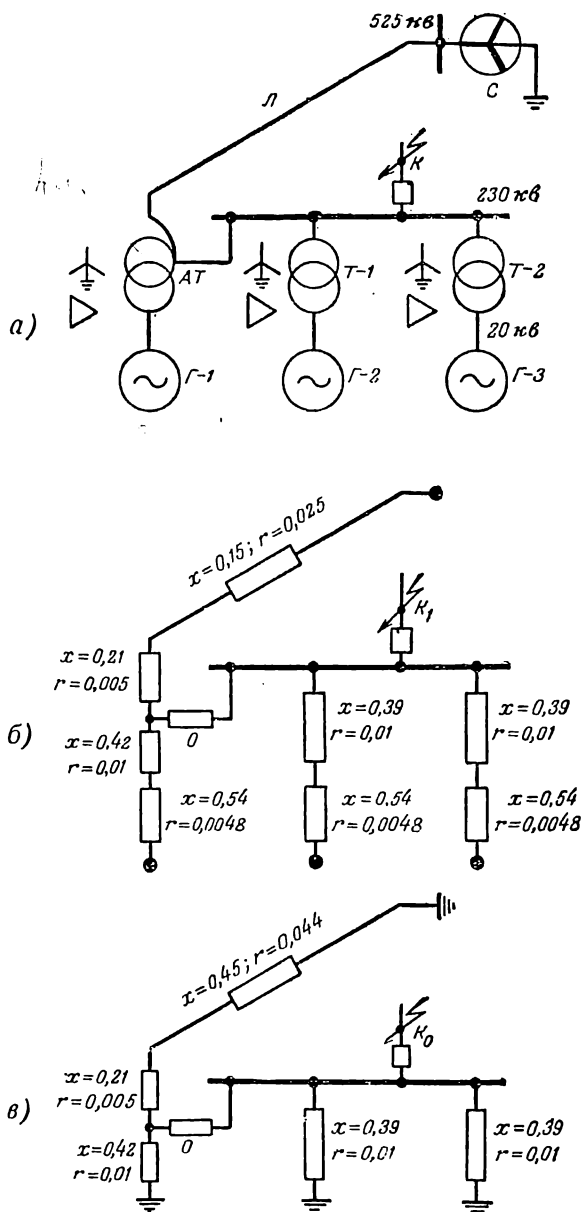


Рис. 16-6. К примеру 16-5.

а—исходная схема; б—схема замещения прямой (обратной) последовательности; в—схема замещения нулевой последовательности.

Следовательно, искомый ток при однофазном коротком замыкании будет:

$$I_{от.расч}^{(1)} = 1,36 \frac{3}{2 \cdot 0,17 + 0,11} \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 230} = 22,6 \text{ кА.}$$

16.4. МЕТОД РАСЧЕТНЫХ КРИВЫХ

Расчетные кривые, приведенные в § 11-5, могут быть использованы для приближенного определения тока прямой последовательности в произвольный момент процесса любого несимметричного короткого замыкания. Для этого нужно предварительно найти расчетную реактивность схемы прямой последовательности, в которой точка короткого замыкания должна быть отнесена на дополнительную реактивность $x_{\Delta}^{(n)}$ для данного вида короткого замыкания (табл. 15-2). Если при трехфазном коротком замыкании в рассматриваемой точке расчетная реактивность составляет $x_{расч}^{(3)}$, то, очевидно, при несимметричном коротком замыкании в той же точке расчетная реактивность будет:

$$x_{расч}^{(n)} = \left(1 + \frac{x_{\Delta}^{(n)}}{x_{1\Sigma}} \right) x_{расч}^{(3)}, \quad (16-3)$$

где $x_{1\Sigma}$ — результирующая реактивность схемы прямой последовательности относительно точки короткого замыкания, определяемая в соответствии с требованиями данного метода.

Выражение (16-3) справедливо как при расчете по общему изменению, так и при расчете с учетом индивидуального изменения. В последнем случае под $x_{расч}^{(3)}$ следует понимать расчетную реактивность генерирующей ветви, выделенной из системы при трехфазном коротком замыкании.

Выражению (16-3) можно придать и другой вид:

$$x_{расч}^{(n)} = \frac{(x_{1\Sigma} + x_{\Delta}^{(n)})}{C} \frac{S_n}{S_6}, \quad (16-4)$$

где $x_{1\Sigma}$ и $x_{\Delta}^{(n)}$ — выражены в относительных единицах при базисной мощности S_6 , Мва;

- S_n — суммарная номинальная мощность генераторов выделяемой ветви, *Мва*;
 C — коэффициент распределения для той же ветви, определяемый в схеме прямой последовательности.

При расчете по общему изменению $C=1$, а под S_n следует понимать суммарную номинальную мощность всех генераторов схемы.

Поскольку расчет по данному методу является достаточно приближенным, то при его применении к несимметричным коротким замыканиям не нужно составлять схемы обратной последовательности, а вполне достаточно принимать:

$$x_{2\Sigma} \approx x''_{\Sigma}.$$

Для найденной расчетной реактивности при данном виде короткого замыкания по соответствующим расчетным кривым находят значение относительного тока прямой последовательности в рассматриваемый момент времени t (рис. 16-7).

Величина периодической слагающей тока в месте несимметричного короткого замыкания при этом будет:

$$I_{kt}^{(n)} = m_{*kt}^{(n)} I_{n\Sigma}^{\circ} \quad (16-5)$$

или при расчете с учетом индивидуального изменения

$$I_{kt}^{(n)} = m^{(n)} [I_{*I\text{I}}^{(n)} I_{\text{II}}^{\circ} + I_{*I\text{III}}^{(n)} I_{\text{III}}^{\circ} + \dots], \quad (16-6)$$

где $m^{(n)}$ — коэффициент, значения которого для каждого вида короткого замыкания приведены в табл. 15-2 и на рис. 16-7;

$I_{n\Sigma}^{\circ}$ — суммарный номинальный ток генераторов, приведенный к напряжению той ступени, где рассматривается короткое;

$I_{*I\text{I}}^{\circ}, I_{*I\text{III}}^{\circ}, \dots$ — относительные токи прямой последовательности, найденные по расчетным кривым для выделенных ветвей *I*, *II* и т. д.;

$I_{\text{II}}^{\circ}, I_{\text{III}}^{\circ}, \dots$ — номинальные токи тех же ветвей, приведенные к напряжению ступени, где рассматривается короткое замыкание.

Источник бесконечной мощности при расчете несимметричных коротких замыканий надлежит учитывать так же, как и при расчете трехфазного короткого замыкания. Для этого нужно найти его взаимную реактивность относительно точки короткого замыкания, считая ее удаленной в схеме прямой последовательности на $x_{\Delta}^{(n)}$ от действи-

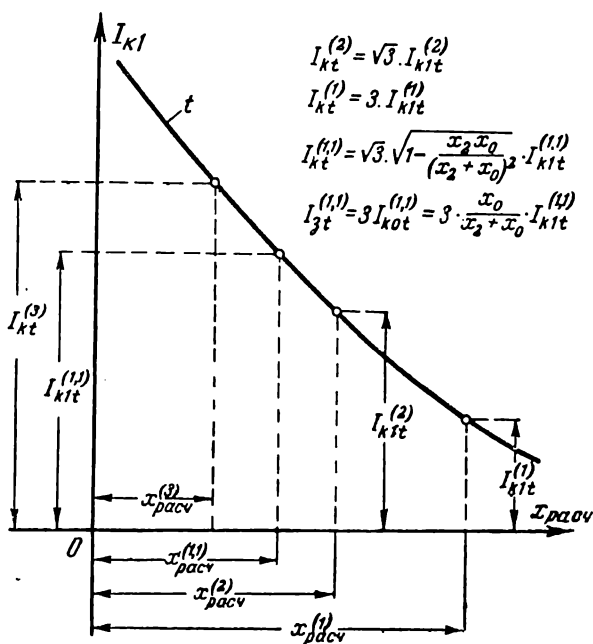


Рис. 16-7. Применение метода расчетных кривых к несимметричным коротким замыканиям.

тельной точки короткого, т. е. в (11-16) считать $x_{\Sigma} = x'_{\Sigma} + x_{\Delta}^{(n)}$. Затем найденный по (11-17) или (11-18) ток прямой последовательности от этого источника следует прибавить к току той же последовательности других генераторов.

Благодаря дополнительной реактивности $x_{\Delta}^{(n)}$ условия для отдельных генераторов (или станций) при несимметричных коротких замыканиях отличаются меньше, чем при трехфазном коротком замыкании в той же точке. Поэтому при расчете несимметричных коротких замыканий часто

можно не учитывать индивидуального изменения или этот учет производить для меньшего числа выделяемых ветвей.

Пример 16-6. При данных примера 11-5 определить ток через 1,5 сек при двухфазном коротком замыкании в точке К схемы рис. 11-13,а.

В примере 11-5 было найдено $x_{\text{расч}}^{(3)} = 0,66$. Следовательно, расчетное сопротивление при двухфазном коротком замыкании в той же точке будет:

$$x_{\text{расч}}^{(2)} \approx 2 \cdot 0,66 = 1,32.$$

По кривым рис. 11-11 при $x_{\text{расч}} = 1,32$ для $t = 1,5$ сек находим относительный ток прямой последовательности $I_{K1}^{(2)} = 0,82$.

Искомый ток короткого замыкания

$I_K^{(2)} = \sqrt{3} \cdot 0,82 \cdot 2,28 = 1,42 \cdot 2,28 = 3,24 \text{ ка}$ (против 3,7 ка при трехфазном коротком замыкании).

Пример 16-7. Для схемы рис. 16-6,а и данных примера 16-5 при однофазном коротком замыкании в точке К определить наименьшую величину тока, считая, что генераторы снабжены АРВ.

Сохраним те же базисные условия, что и в примере 16-5, т. е. $S_G = 1000 \text{ Мва}$ и $U_G = U_{\text{ср}}$. Найденные ранее результирующие реактивности составляют: $x''_{\Sigma} = 0,17 \approx x_{2\Sigma}$ и $x_{0\Sigma} = 0,11$.

Система как источник бесконечной мощности должна быть выделена. Ее коэффициент распределения в схеме прямой последовательности (рис. 16-6,б) равен $C_C = \frac{0,11}{0,15 + 0,21} = 0,48$; соответственно для генераторов, объединенных в один мощностью $S_{H\Sigma} = 3 \cdot 376 = 1128 \text{ Мва}$, коэффициент распределения $C_G = 1 - 0,48 = 0,52$.

Дополнительная реактивность для однофазного короткого замыкания в данном случае составляет $x_{\Delta}^{(1)} = 0,17 + 0,11 = 0,28$.

Взаимная реактивность системы относительно точки эквивалентного трёхфазного короткого замыкания будет:

$$x_{C_K}^{(1)} = \frac{0,17 + 0,28}{0,48} = 0,94.$$

Расчетная реактивность объединенного генератора

$$x_{\text{расч}}^{(1)} = \frac{0,17 + 0,28}{0,52} \cdot \frac{1128}{1000} = 0,98.$$

По кривым рис. 11-10 при $x_{\text{расч}} = 0,98$ находим, что наименьшее относительное значение тока прямой последовательности от объединенного генератора составляет $I_{1G}^{(1)} = 0,9$ и оно имеет место при $t \approx 0,5 \text{ сек}$. Этот ток при базисной мощности будет $I_{1G}^{(1)} = 0,9 \times \frac{1128}{1000} = 1,02$.

Таким образом, искомый наименьший ток при однофазном коротком замыкании

$$I_{\text{к.мин}}^{(1)} = 3 \cdot \left(1,02 + \frac{1}{0,94} \right) \cdot \frac{1\,000}{\sqrt{3} \cdot 230} = 15,6 \text{ кА.}$$

Пример 16-8. При двухфазном коротком замыкании на землю в точке К схемы рис. 16-8,а определить для $t=0,7$ сек ток в поврежденных фазах в месте короткого замыкания и токи в заземленных нейтральных трансформаторах Т-1.

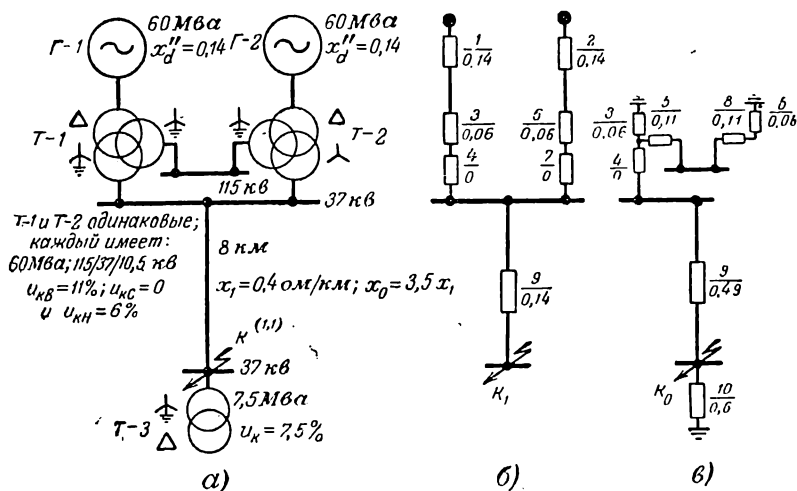


Рис. 16-8. К примеру 16-8.

а — исходная схема; б — схема замещения прямой (обратной) последовательности; в — схема замещения нулевой последовательности.

Исходные данные приведены на схеме рис. 16-8,а. Сба генератора снабжены АРВ.

Схема замещения прямой (она же обратной) и нулевой последовательностей показаны на рис. 16-18,б и в, где все реактивности выражены в относительных единицах при $S_6 = 60 \text{ Мва}$ и $U_6 = U_{\text{ср}}$. Ввиду симметрии схемы прямой последовательности относительно точки короткого замыкания в нее не введены реактивности обмоток 115 кВ трансформаторов Т-1 и Т-2.

Свертываем схемы:

прямой последовательности

$$x_{1\Sigma} = x_{2\Sigma} = \frac{0,14 + 0,06}{2} + 0,14 = 0,24$$

и нулевой последовательности

$$x_{11} = 0,06 // (0,06 + 2 \cdot 0,11) = 0,05; \quad x_{12} = 0,05 + 0,49 = 0,54;$$

$$x_{0\Sigma} = 0,54 // 0,6 = 0,28.$$

Дополнительная реактивность $x_{\Delta}^{(1,1)} = 0,24 // 0,28 = 0,13$ и расчетная реактивность

$$x_{\text{расч}}^{(1,1)} = (0,24 + 0,13) \cdot \frac{2 \cdot 60}{60} = 0,74,$$

при которой по кривым рис. 11-10 для $t = 0,7$ сек находим $I_{K1} = 1,16$.

Коэффициент $m^{(1,1)} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{0,24 \cdot 0,28}{(0,24 + 0,28)^2}} = 1,51$, следовательно, ток в поврежденных фазах

$$I_K^{(1,1)} = 1,51 \cdot 1,16 \cdot 1,87 = 3,28 \text{ ка},$$

где $I_{\text{нз}}^{\circ} = \frac{120}{\sqrt{3} \cdot 37} = 1,87 \text{ ка}$ — номинальный ток обшей генераторов, приведенный к 37 кВ.

Ток, поступающий в землю в месте короткого замыкания,

$$I_a = 3 \cdot 1,16 \cdot \frac{0,13}{0,28} \cdot 1,87 = 3,02 \text{ ка}.$$

Ток в нейтрали обмотки 37 кВ трансформатора Т-1

$$I = 3,02 \cdot \frac{0,28}{0,54} = 1,56 \text{ ка}$$

и ток в нейтрали обмотки 115 кВ того же трансформатора

$$I = 1,56 \cdot \frac{0,06}{(0,06 + 2 \cdot 0,11)} \cdot \frac{37}{115} = 0,09 \text{ ка}.$$

Пример 16-9. При однофазном коротком замыкании в точке К схемы 16-9,а определить для $t = 0,2$ сек значения тока нулевой последовательности на всех участках заданной схемы для двух случаев:

а) выключатель В-1 отключен, выключатели В-2 и В-3 включены;

б) выключатели В-1, В-2 и В-3 отключены.

Гидрогенераторы Г-1—Г-4 одинаковые, каждый 97 Мва, 10,5 кВ, $x''_d = 0,29$.

Трансформаторы Т-1 и Т-2 одинаковые, каждый 180 Мва, 230/10,5/10,5 кВ (т. е. его обмотка 10,5 кВ расщеплена на две параллельные ветви), $u_k = 14\%$, нейтрали обмоток 230 кВ заземлены через катушки, каждая из которых имеет $x = 25 \text{ ом}$.

Автотрансформаторы АТ-1 и АТ-2 одинаковые, каждый 120 Мва, 230/115/10,5 кВ, $u_{\text{вс}} = 9\%$, $u_{\text{вн}} = 31,8\%$, $u_{\text{сн}} = 18\%$.

Линия: 110 км, реактивности одной цепи $x_1 = 0,41 \text{ ом/км}$, $x_0 = 1,28 \text{ ом/км}$, взаимная реактивность между цепями $x_{01-11} = 0,6 \text{ ом/км}$.

Система: 500 Мва, 115 кВ, относительные реактивности $x_1 = 0,1 = x_2$, $x_0 = 0,2$.

За базисные условия примем $S_0 = 500 \text{ Мва}$ и $U_0 = U_{\text{ср}}$.

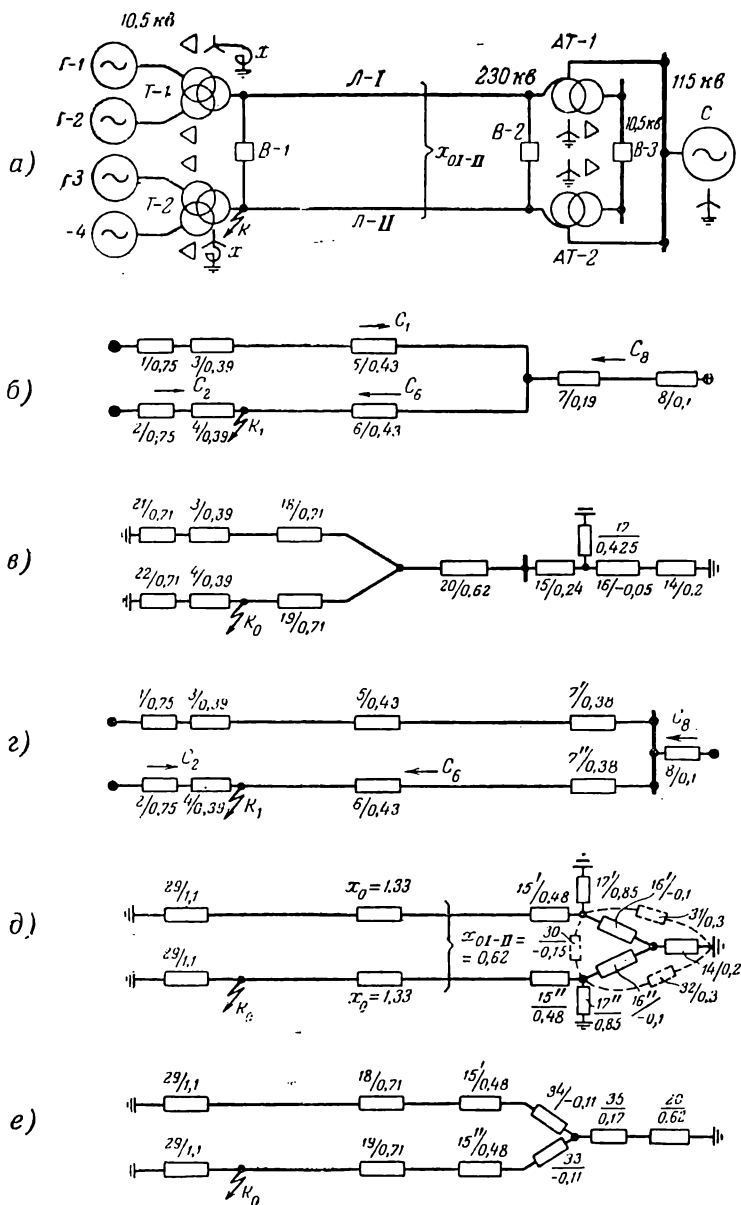


Рис. 16-9. К примеру 16-9.

а — исходная схема; б — схема замещения прямой (обратной) последовательности при включенном выключателе В-2; в — то же нулевой последовательности; г — схема замещения прямой (обратной) последовательности при отключенном выключателе В-2; д и е — то же нулевой последовательности.

Значения относительных реактивностей элементов при базисных условиях указаны на соответствующих схемах замещения рис. 16-9,б—е. Укрупненный блок из двух генераторов заменен одним генератором мощностью $2 \cdot 97 = 194 \text{ Мва}$.

а) Решение при отключенном В-1 и включенных В-2 и В-3.

В данном случае схема прямой последовательности имеет вид, показанный на рис. 16-9,б. Постепенным преобразованием находим:

$$\begin{aligned}x_9 &= 0,75 + 0,39 + 0,43 = 1,57; \quad x_{10} = 0,19 + 0,1 = 0,29; \\x_{11} &= 1,57 // 0,29 = 0,245; \quad x_{12} = 0,245 + 0,43 = 0,675; \\x_{13} &= 0,75 + 0,39 = 1,14 \text{ и результирующая реактивность} \\x_{1\Sigma} &= 1,14 // 0,675 = 0,424.\end{aligned}$$

В схеме нулевой последовательности (рис. 16-9,в) учтена взаимная индукция между цепями (элемент 20). Постепенным преобразованием схемы находим:

$$\begin{aligned}x_{23} &= 0,71 + 0,39 + 0,71 = 1,81; \quad x_{24} = 0,2 - 0,05 = 0,15; \\x_{25} &= 0,15 // 0,425 = 0,111; \quad x_{26} = 0,111 + 0,24 + 0,62 = 0,97; \\x_{27} &= 0,97 // 1,81 = 0,63; \quad x_{28} = 0,63 + 0,71 = 1,34; \\x_{29} &= 0,71 + 0,39 = 1,1; \quad x_{0\Sigma} = 1,1 // 1,34 = 0,605.\end{aligned}$$

Суммарная реактивность для однофазного короткого замыкания

$$x_{\Sigma}^{(1)} = 2 \cdot 0,424 + 0,605 = 1,453.$$

Если все источники объединить в один мощностью $S_{н\Sigma} = 500 + 2 \cdot 194 = 888 \text{ Мва}$, то его расчетная реактивность будет:

$$x_{\text{расч}}^{(1)} = 1,453 \cdot \frac{888}{500} = 2,58.$$

Для уточнения расчета выделим блок, состоящий из генераторов Г-3 и Г-4, в отдельную ветвь. Коэффициент распределения для этой ветви в схеме прямой последовательности составляет:

$$C_2 = \frac{0,424}{1,14} = 0,37,$$

и, следовательно, расчетная реактивность этой ветви будет:

$$x_{\text{расч}}^{(1)} = \frac{1,453}{0,37} \cdot \frac{194}{500} = 1,52.$$

Соответственно для системы вместе с генераторами Г-1 и Г-2

$$x_{\text{расч}}^{(1)} = \frac{1,453}{(1 - 0,37)} \cdot \frac{500 + 194}{500} = 3,2,$$

т. е. больше 3, что позволяет не считаться с изменением тока во времени и определять его упрощенно (как для начального момента).

Поскольку у выводов генераторов нет нагрузки, то на ток от генераторов Г-3 и Г-4, найденный по кривым рис. 11-11 для $x_{расч} = 1,52$ и $t = 0,2$ сек, согласно (11-20) вводим поправочный коэффициент

$$b = 1 + \frac{1,52 - 0,29}{1,2} = 2,02. \text{ При этом}$$

$$I_1 = 2,02 \cdot 0,67 = 1,35.$$

Таким образом, ток нулевой последовательности в месте короткого

$$I_{к0} = 1,35 \cdot \frac{194}{\sqrt{3} \cdot 230} + \frac{1}{3,2} \frac{694}{\sqrt{3} \cdot 230} = 1,2 \text{ ка}$$

Теперь, обращаясь к схеме рис. 16-9,а, нетрудно найти распределение тока нулевой последовательности и токи в нейтральных. Так, ток нулевой последовательности в трансформаторе Т-1

$$I_0 = 1\,200 \cdot \frac{0,605}{1,10} = 660 \text{ а}$$

и в его нейтрали

$$I_a = 3 \cdot 660 = 1\,980 \text{ а.}$$

Аналогично находим:
в линии Л-II

$$I_0 = 1\,200 - 660 = 540 \text{ а;}$$

на стороне 230 кВ автотрансформаторов АТ-1 и АТ-2

$$I_0 = 0,5 \cdot 540 \cdot \frac{0,63}{0,97} = 175 \text{ а;}$$

на стороне 115 кВ этих автотрансформаторов

$$I_0 = \left(175 \cdot \frac{230}{115} \right) \cdot \frac{0,11}{0,15} = 255 \text{ а;}$$

в нейтрали каждого автотрансформатора

$$I_a = 3(255 - 175) = 240 \text{ а.}$$

Искомое токораспределение приведено на рис. 16-10,а, где для упрощения чертежа соединение элементов условно показано лишь по одной фазе.

Напряжение нулевой последовательности в месте короткого составляет:

$$\dot{U}_{к0} = -\frac{1,2}{1,25} j 0,605 \cdot \frac{230}{\sqrt{3}} = -j 77 \text{ кВ,}$$

$$\text{где } I_0 = \frac{500}{\sqrt{3} \cdot 230} = 1,25 \text{ ка.}$$

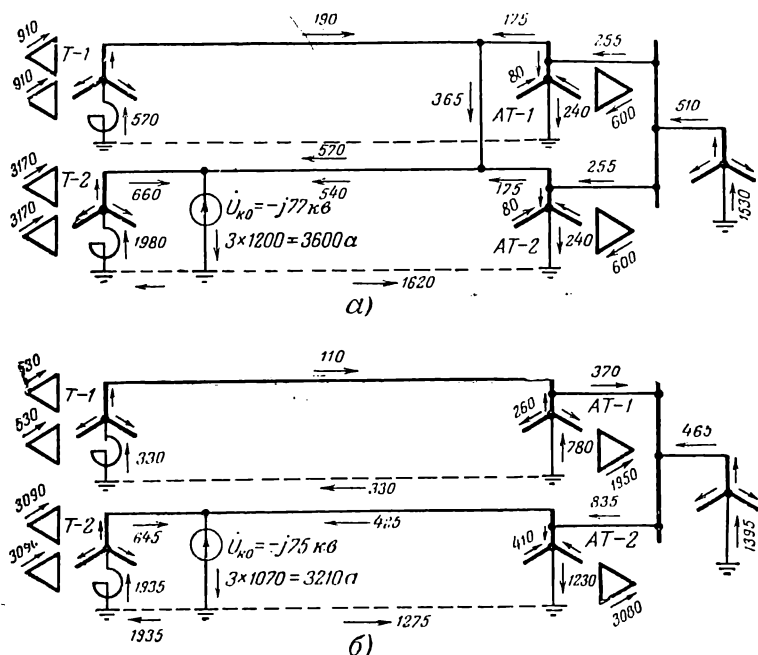


Рис. 16-10. Распределение токов нулевой последовательности и токов в нейтральных схемах примера 16-9.

а — при включенном выключателе *В-2*; *б* — при отключенном выключателе *В-2*.

б) Решение при отключенных выключателях В-1, В-2, В-3.

Схема прямой последовательности для этого случая представлена на рис. 16-9,з. Как видно (из сравнения реактивностей), участие генераторов *Г-1* и *Г-2* в питании короткого замыкания по сравнению с системой *С* ничтожно мало и им можно пренебречь. Тогда результирующее сопротивление прямой последовательности будет:

$$x_{1\Sigma} = 1,14 // (0,43 + 0,38 + 0,1) = 0,51.$$

Схема нулевой последовательности (рис. 16-9,д) имеет магнитную связь; чтобы освободиться от нее, схема должна быть предварительно преобразована. С этой целью звезду с элементами *16'*, *14*, *16''* заменим треугольником с элементами *30*, *31*, *32* и после параллельного сложения элементов *17'* с *31* и *17''* с *32* вновь образовавшийся треугольник преобразуем в звезду с элементами *33*, *34*, *35* (рис. 16-9,е). Теперь для учета указанной взаимной индукции достаточно последовательно с x_{35} ввести реактивность $x_{20} = 0,62$, как и в схеме рис. 16-9,в, а каждую цепь представить реактивностью $x_{18} = x_{19} = 1,33 - 0,62 = 0,71$.

Результирующая реактивность нулевой последовательности будет:

$$x_{36} = (1,1 + 0,71 + 0,48 - 0,11) // (0,17 + 0,62) = 0,58$$

и

$$x_{0\Sigma} = (0,58 - 0,11 + 0,48 + 0,71) // 1,1 = 0,662.$$

Суммарная реактивность для однофазного короткого замыкания

$$x_{\Sigma}^{(1)} = 2 \cdot 0,51 + 0,662 \approx 1,68.$$

Коэффициенты распределения в схеме прямой последовательности:

для генераторов Г-3 и Г-4

$$C_2 = \frac{0,51}{1,14} = 0,45,$$

для системы $C_8 \approx C_6 = 1 - 0,45 = 0,55$.

Расчетная реактивность генераторов Г-3 и Г-4

$$x_{\text{расч}}^{(1)} = \frac{1,68}{0,45} \cdot \frac{194}{500} = 1,43,$$

и поправочный коэффициент

$$b = 1 + \frac{1,43 - 0,29}{1,2} = 1,95.$$

Взаимная реактивность между системой и точкой короткого

$$x_{Cк}^{(1)} = \frac{1,68}{0,55} = 3,06.$$

По кривым рис. 11-11 для $t = 0,2$ сек и $x_{\text{расч}} = 1,43$ находим

$$I_1 = 0,70.$$

Следовательно, ток нулевой последовательности в месте короткого

$$I_{k0} = 0,7 \cdot 1,95 \cdot \frac{194}{\sqrt{3} \cdot 230} + \frac{1}{3,06} \cdot 1,25 = 1,07 \text{ кА}.$$

Распределение токов нулевой последовательности для данного случая приведено на рис. 16-10,б. Следует обратить внимание на существенное различие (особенно в автотрансформаторах) в распределении токов в обоих рассмотренных случаях.

Пример 16-10. Известно, что при трехфазном и однофазном коротких замыканиях в начале линии 230 кВ, связанной с системой мощностью 1500 Мва (тепловые станции), мощность короткого замыкания для $t = 0,2$ сек составляет соответственно 3400 Мва и 4700 Мва. Для того же момента времени и при тех же видах короткого замыкания определить значения мощностей короткого, если точка короткого удалена на 30 км данной линии. Для линии принять $x_1 = 0,4$ Ом/км и $x_0 = 3 \cdot x_1$.

Относительные величины мощностей (или токов) прямой последовательности будут:

$$\text{при трехфазном коротком замыкании } \dot{S}_{*k}^{(3)} = \frac{3\,400}{1\,500} = 2,25;$$

$$\text{при однофазном коротком замыкании } \dot{S}_{*k}^{(1)} = \frac{4\,700}{1\,500} = 3,14.$$

По кривым рис. 11-10 находим расчетные реактивности:

$$\text{при трехфазном коротком (по } I_{*k} = 2,25 \text{ и } t = 0,2 \text{ сек)} x_{\text{расч}}^{(3)} = 0,35;$$

$$\text{при однофазном коротком (по } I_{*k1} = \frac{3,14}{3} = 1,05 \text{ и } t = 0,2 \text{ сек)} x_{\text{расч}}^{(1)} = 0,85.$$

Следовательно, результирующая реактивность нулевой последовательности относительно начала линии будет:

$$x_{0\Sigma} = 0,85 - 2 \cdot 0,35 = 0,15.$$

Относительные реактивности линии:

$$x_1 = 0,4 \cdot 30 \cdot \frac{1\,500}{230^2} = 0,34 \text{ и } x_0 = 3 \cdot 0,34 = 1,02.$$

Расчетные реактивности при коротком на линии составят:

$$x_{\text{расч}}^{(3)} = 0,35 + 0,34 = 0,69 \text{ и } x_{\text{расч}}^{(1)} = 2 \cdot 0,69 + (0,15 + 1,02) = 2,55.$$

Искомые мощности короткого замыкания будут:

$$S_k^{(3)} = 1,25 \cdot 1\,500 = 1\,870 \text{ Мва и } S_k^{(1)} = 3 \cdot 0,38 \cdot 1\,500 = 1\,710 \text{ Мва,}$$

(где 1,25 и 0,38 — относительные величины по кривым рис. 11-10).

16-5. МЕТОД СПРЯМЛЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

При применении метода спрямленных характеристик к расчету несимметричных коротких замыканий в схему прямой последовательности для рассматриваемого момента времени t генераторы должны быть введены в зависимости от ожидаемого для них режима или своими расчетными э. д. с. (E_t) и реактивностями (x_t), если предполагается режим увеличения возбуждения, или $E = U_H$ и $x = 0$, если предполагается, что к данному моменту времени напряжение прямой последовательности генератора уже достигло нормальной величины, т. е. генератор работает в режиме нормального напряжения.

При оценке возможного режима генератора следует сопоставлять его $x_{крт}$ с внешней реактивностью, определяемой из схемы прямой последовательности, считая в ней точку эквивалентного трехфазного короткого замыкания, отнесенной на дополнительную реактивность $x_{\Delta}^{(n)}$. Когда в схеме имеется несколько генераторов, их

режимы выбирают, руководствуясь теми же соображениями, которые изложены в §§ 5-7 и 11-7.

Правильность выбранного режима генератора проверяют путем сравнения вычисленного для данного генератора тока прямой последовательности в рассматриваемый момент времени I_{1t} с его критическим током $I_{крт}$ для того же момента времени. Для режима увеличения возбуждения должно быть $I_{1t} \geq I_{крт}$; для режима нормального напряжения должно быть $I_{1t} \leq I_{крт}$.

Режим увеличения возбуждения может быть проверен также по напряжению прямой последовательности генератора, которое должно быть $U_{1t} \leq U_n$.

Следует подчеркнуть, что независимо от режима генератора в схему обратной последовательности, а также и в схему нулевой последовательности (если через генератор обеспечен путь циркуляции тока нулевой последовательности) генератор должен быть введен своими соответствующими реактивностями, т. е. x_2 и x_0 .

При отсутствии у генератора АРВ его следует вводить в схему прямой последовательности расчетными E_t и x_t , при этом никакой проверки режима производить не требуется.

Пример 16-11. Используя данные и схему примера 11-10 (рис. 11-25), определить фазные токи и напряжения генератора при двухфазном коротком замыкании в точке К. Расчет произвести для $t = 1,5$ сек при условии, что

а) генератор является типовым гидрогенератором, его $x_2 = 0,42$ и $I_{f0} = 1,7$;

б) генератор является гидрогенератором с параметрами, указанными в условии примера 11-10; дополнительно известно, что $x_2 = 0,42$.

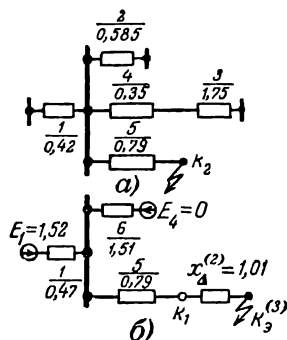


Рис. 16-11. К примеру 16-11.

а — схема замещения обратной последовательности; б — схема замещения прямой последовательности для эквивалентного трехфазного короткого замыкания.

Сохраним те же базисные условия, что и в примере 11-10, т. е. $S_6 = 50 \text{ Мва}$, $U_6 = 10,5 \text{ кВ}$, $I_6 = 2,75 \text{ ка}$.

Схема обратной последовательности представлена на рис. 16-11, а. Для нагрузок принято среднее значение $x_2 = 0,35$ (отнесенное к рабочей мощности нагрузки).

Результирующая реактивность обратной последовательности будет:

$$x_7 = 0,42 // (0,35 + 1,75) // 0,585 = 0,22.$$

и

$$x_{2\Sigma} = 0,22 + 0,79 = 1,01.$$

Следовательно, внешняя реактивность в схеме прямой последовательности (рис. 15-36, б) будет:

$$x_{вн} = (0,79 + 1,01) // 1,51 = 0,82.$$

а) При типовом гидрогенераторе

Поскольку $x_{кр1,5} = 0,9 > 0,82$, то генератор через $t = 1,5 \text{ сек}$ после двухфазного короткого замыкания также работает в режиме подъема возбуждения. Поэтому в схему прямой последовательности его следует ввести с новыми $E_{t=1,5} = E_1 = 1,52$ и $x_{t=1,5} = x_1 = 0,47$ (рис. 16-11, б).

В примере 11-10 было найдено $E_\Sigma = 1,16$ и $x_\Sigma = 1,15$. Находим ток прямой последовательности в месте короткого (считая $\dot{E}_A = jE_{(\Sigma)}$):

$$I_{кА1} = \frac{j1,16}{j(1,15 + 1,01)} = 0,538.$$

Напряжение прямой последовательности генератора

$$\dot{U}_{A1} = j(1,01 + 0,79) \cdot 0,538 = j0,97.$$

Ток прямой последовательности генератора

$$I_{A1} = \frac{j(1,52 - 0,97)}{j0,47} = 1,17,$$

то же обратной последовательности

$$I_{A2} = -0,538 \cdot \frac{0,22}{0,42} = -0,28.$$

Напряжение обратной последовательности генератора

$$\dot{U}_{A2} = 0 - (-0,28 \cdot j0,42) = j0,118.$$

Искомые фазные токи:

$$I_A = 1,17 - 0,28 = 0,89 \text{ или } I_A = 0,89 \cdot 2,75 = 2,45 \text{ ка};$$

$$I_B = a^2 \cdot 1,17 - a \cdot 0,28 = -0,45 - j1,26 \text{ или } I_B = \sqrt{0,45^2 + 1,26^2} = 1,34, \text{ т. е. } I_B = 1,34 \cdot 2,75 = 3,69 \text{ ка};$$

$$I_C = \hat{I}_B = -0,45 + j1,26 \text{ или } I_B = I_C = 3,69 \text{ ка};$$

фазные напряжения:

$$\dot{U}_A = j0,97 + j0,118 = j1,088 \text{ или } \dot{U}_A = j1,088 \cdot \frac{10,5}{\sqrt{3}} = j6,6 \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_B = a^2 j0,97 + a j0,118 = -0,54 - j0,74 \text{ или}$$

$$U_B = \sqrt{0,54^2 + 0,74^2} = 0,917, \text{ т. е. } U_B = 0,917 \cdot \frac{10,5}{\sqrt{3}} = 5,57 \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_C = \hat{\dot{U}}_B = -0,54 + j0,74 \text{ или } U_C = U_B = 5,57 \text{ кВ}.$$

Коэффициенты несимметрии:
токов

$$b_I = \frac{0,28}{1,17} = 0,24;$$

напряжений

$$b_U = \frac{0,118}{0,97} = 0,122.$$

б) При гидрогенераторе с заданными параметрами

При трехфазном коротком замыкании в точке К генератор с такими параметрами к $t=1,5 \text{ сек}$ уже достигал режима нормального напряжения (см. решение примера 11-10). Очевидно, при двухфазном коротком замыкании в той же точке этот режим несомненно будет иметь место и ток прямой последовательности в месте короткого будет:

$$I_{KA1} = \frac{j1}{j(0,79 + 1,01)} = 0,555.$$

Составляющие тока фазы А генератора

$$I_{A1} = 0,555 + \frac{j1}{j1,51} = 1,22 \text{ и } I_{A2} = -0,555 \cdot \frac{0,22}{0,42} = -0,29.$$

Напряжение обратной последовательности генератора

$$\dot{U}_{A2} = 0 - (-0,29 \cdot j0,42) = j0,122.$$

Аналогично предыдущему находим фазные токи и напряжения:

$$I_A = 0,93; I_B = -0,46 - j1,31; I_C = -0,46 + j1,31; I_B = I_C = 1,39 \text{ или } I_A = 2,55 \text{ ка}; I_B = I_C = 3,82 \text{ ка}.$$

$$\dot{U}_A = j1 + j0,122 = j1,122; \dot{U}_B = a^2 j1 + a j0,122 = -0,56 - j0,76;$$

$$\dot{U}_C = -0,56 + j0,76; U_B = U_C = 0,945,$$

$$\text{или } U_A = 1,122 \cdot \frac{10,5}{\sqrt{3}} = 6,8 \text{ кВ}; U_B = U_C = 0,945 \cdot \frac{10,5}{\sqrt{3}} = 6,73 \text{ кВ}.$$

Коэффициенты несимметрии:
токов

$$b_I = \frac{0,29}{1,22} = 0,238;$$

напряжений

$$b_U = \frac{0,122}{1} = 0,122.$$

Пример 16-12. При двухфазном коротком замыкании на землю в точке К-2 схемы рис. 11-26 определить для $t=1,2$ сек фазные токи линии Л-1 и напряжения в ее начале.

Исходные данные к схеме приведены в условии примера 11-11. Дополнительно к ним известно: для генераторов $x_2=0,15$, для нагрузок $x_2=0,35$ и для линии $x_0=3,5 x_1$.

Сохраним те же базисные условия, которые были приняты в примере 11-11, т. е. $S_0 = 500 \text{ Мва}$, $U_{01} = 18 \text{ кВ}$, $U_{011} = 242 \text{ кВ}$, $U_{0111} = 121 \text{ кВ}$, $U_{01V} = 12,1 \text{ кВ}$, $I_{011} = 1,19 \text{ ка}$.

На рис. 16-12 приведены схемы отдельных последовательностей. Поскольку рассматривается несимметричное короткое, то расположенные за ним элементы введены в расчетные схемы. Для всех генераторов принят режим подъема возбуждения. Постепенно свертывая схему прямой последовательности (рис. 16-12, а), находим:

$$x_{12} = 1,05 + 0,556 = 1,606; x_{13} = 0,5 // 1,606 = 0,381;$$

$$x_{14} = 0,381 + 0,278 = 0,659; E_6 = 1,29 // 0,95 = 1,03;$$

$$x_{15} = 0,525 + 0,167 = 0,692; x_{16} = 0,659 // 0,692 // 2,74 = 0,30;$$

$$E_7 = 1,03 // 1,29 // 0 = 1,03; x_{17} = 0,30 + 0,54 = 0,84;$$

$$x_{18} = 0,415 + 5,05 = 5,465; x_{1\Sigma} = 0,84 // 5,465 = 0,73 \text{ и}$$

$$E_\Sigma = 1,03 // 0 = 0,89.$$

Аналогично находим результирующие реактивности обратной последовательности (рис. 16-12, б) $x_{2\Sigma} = 0,522$ и нулевой последовательности (рис. 16-12, в) $x_{0\Sigma} = 0,64$.

Дополнительная реактивность для данного вида короткого замыкания

$$x_\Delta^{(1,1)} = 0,522 // 0,64 = 0,287.$$

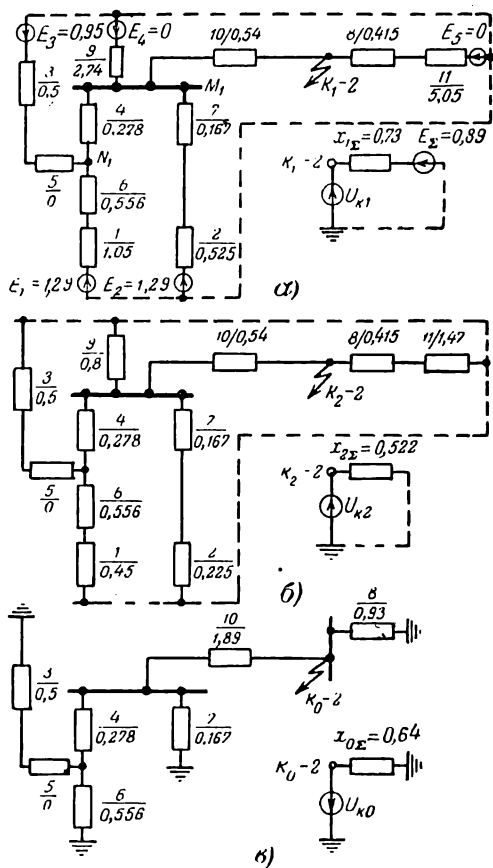


Рис. 16-12. К примеру 16-12.

а — схема замещения прямой последовательности;
 б — то же обратной последовательности; в — то же нулевой последовательности.

Принимая $\dot{E}_{A\Sigma} = j0,89$, находим ток прямой последовательности в месте короткого:

$$I_{KA1} = \frac{j0,89}{j(0,73 + 0,287)} = 0,875.$$

Симметричные составляющие напряжения фазы A в месте короткого

$$\dot{U}_{KA1} = \dot{U}_{KA2} = \dot{U}_{K0} = 0,875 \cdot j0,287 = j0,25.$$

Симметричные составляющие тока фазы A линии $L-I$ будут:

$$I_{A1} = \frac{j(1,03 - 0,25)}{j0,84} = 0,93;$$

$$I_{A2} = -0,875 \cdot \frac{0,287}{0,723} = -0,35,$$

где 0,723—реактивность части схемы рис. 16-12,б, слева от точки K_2-2 .

$$I_0 = -0,875 \cdot \frac{0,287}{2,02} = -0,125,$$

где 2,02 — реактивность части схемы рис. 16-12,б, слева от точки K_0-2 ;

Симметричные составляющие напряжения фазы A в начале линии будут:

$$\dot{U}_{A1} = j0,25 + 0,93 \cdot j0,54 = j0,75;$$

$$\dot{U}_{A2} = j0,25 - 0,35 \cdot j0,54 = j0,06$$

и

$$\dot{U}_0 = j0,25 - 0,125 \cdot j1,89 = j0,02.$$

Для проверки выбранных режимов находим токи прямой последовательности генераторов.

Ток генераторов $G-2$ и $G-3$

$$I_1 = \frac{1,29 - 0,75}{0,692} = 0,78 > I_{кр\prime} = 0,552, \text{ т. е.}$$

режим этих генераторов выбран правильно.

Для проверки режима генератора $G-I$ предварительно находим напряжение точки N_1 (рис. 16-12,а):

$$U_{N1} = 0,75 + \frac{1,03 - 0,75}{0,659} \cdot 0,278 = 0,87.$$

Следовательно ток прямой последовательности генератора $G-I$ будет:

$$I_1 = \frac{1,29 - 0,87}{1,606} = 0,28 > I_{кр\prime} = 0,276,$$

т. е. режим этого генератора также выбран правильно.

По найденным значениям симметричных составляющих легко построить векторные диаграммы напряжений и токов (рис. 16-13), из которых имеем: $I_A = 0,455$ и $I_B = I_C = 1,20$ или $I_A = 0,455 \times 1,19 = 0,54$ ка и $I_B = I_C = 1,20 \cdot 1,19 = 1,43$ ка;

$$U_A = 0,83 \cdot \frac{242}{\sqrt{3}} = 116 \text{ кВ} \text{ и } U_B = U_C = 0,7 \cdot \frac{242}{\sqrt{3}} = 98 \text{ кВ}.$$

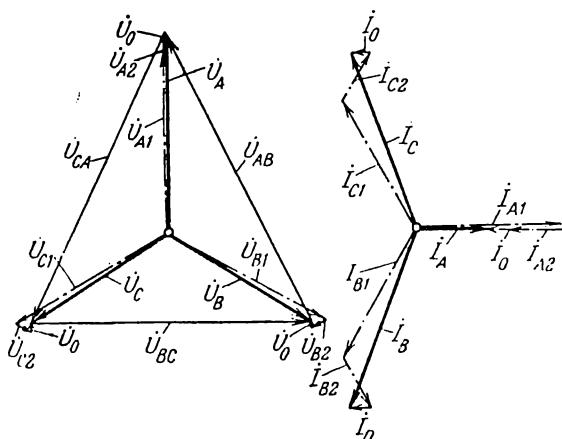


Рис. 16-13. Векторные диаграммы напряжений и токов к примеру 16-12.

Пример 16-13. При однофазном коротком замыкании через дугу с $r_d = 50$ ом в точке К-2 схемы рис. 11-26,а построить векторные диаграммы токов во всех ветвях, присоединенных к точке короткого. Построение произвести для условий, когда все генераторы перешли в режим нормального напряжения. Оценить примерно, в какой момент времени наступает этот режим.

В качестве базисных условий сохраним те же, что и в предыдущем примере, т. е. $S_6 = 500$ Мва, $U_{611} = 242$ кВ, $I_{611} = 1,19$ ка.

Сопротивление дуги в относительных базисных единицах будет:

$$r_d = 50 \cdot \frac{500}{242^2} = 0,432.$$

В соответствии с заданными условиями в схеме прямой последовательности рис. 16-12,а нужно положить $E_1 = E_2 = 1,0$ и $x_1 = x_2 = 0$. Ее постепенное преобразование дает: $x_{12} = (0,5 // 0,556) + 0,278 = 0,542$; $E_6 = 0,95 // 1,0 = 0,975$; $x_{13} = 0,542 // 0,167 // 2,74 = 0,122$; $E_7 = 0,975 // 1,0 // 0 = 0,95$; $x_{14} = 0,122 + 0,54 = 0,662$;

$$x_{15} = 0,415 + 5,05 = 5,465.$$

Аналогичные преобразования схем обратной и нулевой последовательностей позволяют представить комплексную схему для рас-

сма­тривае­мо­го ви­да ко­рот­ко­го за­мы­ка­ния, как по­ка­за­но на рис.16-14. Ре­зуль­ти­ру­ю­щие ре­ак­тив­но­сти схем от­дель­ных по­сле­до­ва­тель­но­стей бу­дут:

$$x_{1\Sigma} = 0,662 // 5,465 = 0,591;$$

$$x_{2\Sigma} = 0,723 // 1,885 = 0,522;$$

$$x_{0\Sigma} = 2,02 // 0,93 = 0,64$$

$$\text{Ре­зуль­ти­ру­ю­щая э. д. с. } E_{\Sigma} = \frac{0,95 \cdot 5,465}{0,662 + 5,465} = 0,85.$$

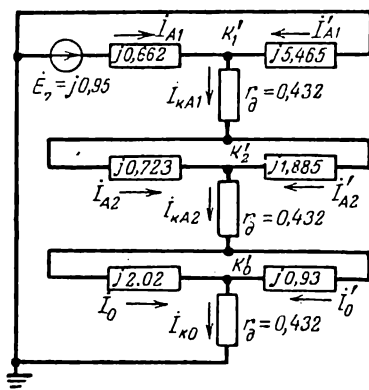


Рис. 16-14. Комплексная схема замещения к примеру 16-13.

Принимая $E_{A\Sigma} = j0,85$, находим ток прямой последовательности в месте короткого

$$I_{KA1} = \frac{j0,85}{3 \cdot 0,432 + j(0,591 + 0,522 + 0,64)} = 0,39 \angle 36,5^{\circ}.$$

Ток поврежденной фазы A в месте короткого

$$I_{KA} = 3 \cdot 0,39 \angle 36,5^{\circ} = 1,17 \angle 36,5^{\circ} \text{ или } I_{KA} = 1,19 \cdot 1,17 \angle 36,5^{\circ} = 1,4 \text{ ка.}$$

Симметричные составляющие напряжения фазы A перед дугой (точки K'_1 , K'_2 , K'_0 на рис. 16-14):

$$\dot{U}_{A1} = [3 \cdot 0,432 + j(0,522 + 0,64)] \cdot 0,39 \angle 36,5^{\circ} = 0,68 \angle 78,5^{\circ};$$

$$\dot{U}_{A2} = 0 - j0,522 \cdot 0,39 \angle 36,5^{\circ} = 0,204 \angle -53,5^{\circ};$$

$$\dot{U}_0 = 0 - j0,64 \cdot 0,39 \angle 36,5^{\circ} = 0,25 \angle -53,5^{\circ}.$$

Симметричные составляющие токов фазы A :
в трансформаторе $T-2$

$$I_{A1} = \frac{0 - 0,68 \angle 78,5^\circ}{2 \cdot j 5,465} = 0,063 \angle 168,5^\circ;$$

$$I_{A2} = \frac{0 - 0,204 \angle -53,5^\circ}{2 \cdot j 1,885} = 0,054 \angle 36,5^\circ;$$

$$I_0 = \frac{0 - 0,25 \angle -53,5^\circ}{j 0,93} = 0,270 \angle 36,5^\circ;$$

в трансформаторе $T-3$

$$I_{A1} = 0,063 \angle 168,5^\circ;$$

$$I_{A2} = 0,054 \angle 36,5^\circ;$$

$$I_0 = 0;$$

в линии $L-I$

$$I_{A1} = 0,39 \angle 36,5^\circ - 2 \cdot 0,063 \angle 168,5^\circ = 0,48 \angle 25^\circ;$$

$$I_{A2} = 0,39 \angle 36,5^\circ - 2 \cdot 0,054 \angle 36,5^\circ = 0,282 \angle 36,5^\circ;$$

$$I_0 = 0,39 \angle 36,5^\circ - 0,27 \angle 36,5^\circ = 0,120 \angle 36,5^\circ.$$

Построение векторных диаграмм токов по найденным симметричным составляющим приведено на рис. 16-15. Для места короткого замыкания, кроме векторной диаграммы токов, построена также векторная диаграмма напряжений (рис. 16-15,а). Чтобы нагляднее представить баланс токов, на рис. 16-15,б приведена векторная диаграмма суммы токов трансформаторов $T-2$ и $T-3$ на стороне звезды. Легко также построить векторные диаграммы токов каждого из этих трансформаторов (рис. 16-15,г и д).

На стороне звезды векторная диаграмма токов трансформатора $T-2$ отличается от аналогичной диаграммы трансформатора $T-3$ лишь наличием тока нулевой последовательности. На стороне треугольника эти диаграммы одинаковы, так как токи нулевой последовательности за обмоткой, соединенной треугольником, как известно, отсутствуют.

Теперь оценим, через какой промежуток времени напряжение прямой последовательности генераторов под действием АРВ достигнет нормальной величины. Прежде всего можно заранее утверждать, что подъем напряжения генераторов $G-2$ и $G-3$ закончится позже, чем генератора $G-1$, так как последний больше удален (электрически) от места короткого. Следовательно, чтобы ответить на поставленный вопрос, нужно найти ток прямой последовательности генераторов $G-2$ и $G-3$ при заданных условиях короткого замыкания и затем установить, в какой момент времени найденный ток равен критическому току этих генераторов.

Из векторной диаграммы рис. 16-16, построение которой не требует пояснений, находим, что ток прямой последовательности генераторов $G-2$ и $G-3$ составляет $I_{A1} = 0,66$ и он отстает от напряжения

на угол $\varphi_z = 74^\circ$. Этот ток, отнесенный к номинальным условиям данных генераторов, будет:

$$I_{A1} = 0,66 \cdot \frac{500}{333} = 0,99.$$

По аналогии с (5-28) и (5-29) при заданном угле φ_z критический ток для произвольного момента $I_{крt}$, выраженный в относительных

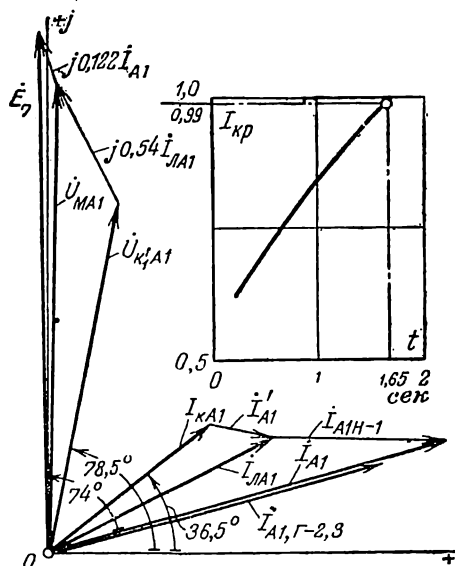


Рис. 16-16. К примеру 16-13.

тельных единицах при номинальных условиях генератора, можно представить в виде:

$$I_{крt} = \frac{(E_t^2 - 1)}{x_t (\sin \varphi_z + \sqrt{\sin^2 \varphi_z + (E_t^2 - 1)})}.$$

Для нескольких значений t (с учетом поправки на T_{f0} , т. е. вводя $t' = \frac{7}{11,9} t = 0,59t$, см. пример 11-11) по кривым рис. 11-24, а

находим значения E_t и x_t и затем по указанному выражению при $\sin 74^\circ = 0,96$ строим кривую $I_{крt} = f(t)$ (рис. 16-16), по которой устанавливаем, что режим нормального напряжения генераторов Г-2 и Г-3 наступит через 1,65 сек.

Пример 16-14. При установившемся режиме двухфазного короткого замыкания в точке К схемы рис. 16-17, а построить кривые изменения фазных токов обоих генераторов и в месте корот-

кого замыкания в функции тока возбуждения генератора $\Gamma-1$ $I_{f\Gamma-1}$, считая, что генератор $\Gamma-2$ имеет неизменное возбуждение $I_{f\Gamma-2} = 1$.

Генераторы одинаковые, реактивности каждого $x_d = 1,1$ и $x_2 = 0,4$.

Обозначим отношение э. д. с. генераторов $E_{q\Gamma-1}$ и $E_{q\Gamma-2}$, численно равных относительным токам возбуждения $I_{f\Gamma-1}$ и $I_{f\Gamma-2}$, через

$$\frac{E_{q\Gamma-1}}{E_{q\Gamma-2}} = \frac{I_{f\Gamma-1}}{I_{f\Gamma-2}} = n.$$

Тогда результирующая э. д. с. очевидно будет:

$$E_{\Sigma} = \frac{n+1}{2}.$$

Определив результирующие реактивности прямой и обратной последовательностей, т. е.

$$x_{1\Sigma} = \frac{1,1}{2} = 0,55 \text{ и } x_{2\Sigma} = \frac{0,4}{2} = 0,2,$$

найдем ток прямой последовательности в месте короткого

$$I_{K1} = \frac{n+1}{2(0,55+0,2)} = \frac{2(n+1)}{3} = 0,67(n+1)$$

и ток в поврежденных фазах

$$I_K = \sqrt{3} I_{K1} = \frac{2(n+1)}{\sqrt{3}} = 1,15(n+1).$$

Напряжение прямой последовательности в месте короткого

$$U_{K1} = 0,67(n+1) \cdot 0,2 = 0,134(n+1).$$

Симметричные составляющие токов фазы A :
генератора $\Gamma-1$

$$I_{A1} = \frac{n - 0,134(n+1)}{1,1} = 0,79n - 0,12;$$

$$I_{A2} = -\frac{I_{K1}}{2} = -0,335 \cdot (n+1);$$

генератора $\Gamma-2$

$$I_{A1} = 0,79 - 0,12n;$$

$$I_{A2} = -\frac{I_{K1}}{2} = -0,335 \cdot (n+1).$$

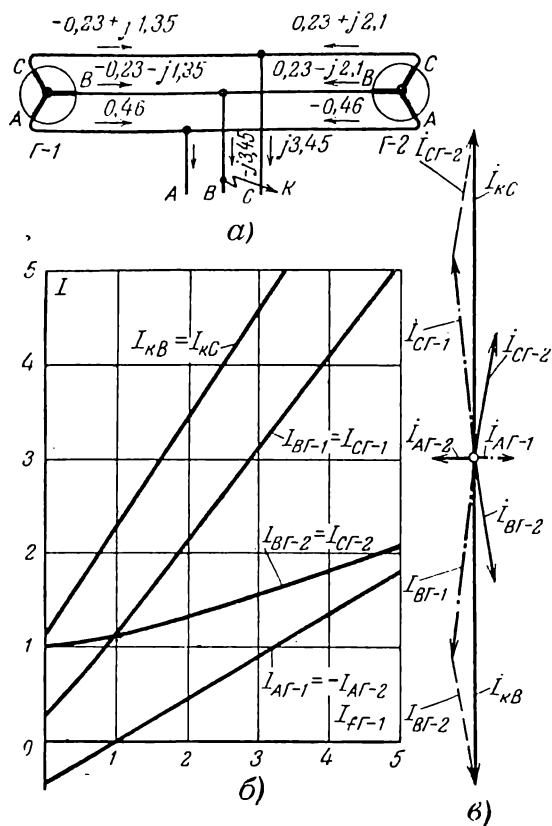


Рис. 16-17. К примеру 16-14.

а — исходная схема; б — кривые изменения фазных токов генераторов Г-1 и Г-2 и тока в месте короткого замыкания в зависимости от тока возбуждения генератора Г-1; в — векторная диаграмма токов.

Фазные токи:
генератора Г-1

$$I_A = 0,79n - 0,12 - 0,335(n+1) = 0,455(n-1);$$

$$\begin{aligned} I_B = \hat{I}_C &= (0,79n - 0,12) \cdot a^2 - 0,335(n+1) \cdot a = \\ &= 0,227(1-n) - j(0,185 + 0,97n) \end{aligned}$$

и их модуль $I_B' = I_C = \sqrt{0,085 + 0,255n + n^2};$

генератора $\Gamma-2$

$$I_A = -0,455(n-1),$$

$$I_B = I_C = \sqrt{0,085n^2 + 0,255n + 1}.$$

Полученные закономерности представлены графически на рис. 16-17, б. Линейная зависимость сохраняется только для тока в месте короткого замыкания и тока в неповрежденной фазе. Для большей наглядности на схеме рис. 16-17, а нанесено токораспределение при $n = I_{f\Gamma-1} = 2$, которое также представлено векторной диаграммой на рис. 16-17, в. Следует отметить, что с изменением знака у тока неповрежденной фазы соответственно меняется чередование фаз. Так, при $I_{f\Gamma-1} = 2$ (рис. 16-17, в) у генератора $\Gamma-1$ — прямое чередование фаз тока, а у генератора $\Gamma-2$ — обратное.

Пример 16-15. При двухфазном коротком замыкании на землю в точке K схемы рис. 16-18, а построить векторные диаграммы токов в обеих цепях линии передачи. Построение произвести для $t = 0,5$ сек, считая в одном случае выключатели $B-1$ и $B-2$ включенными и в другом — выключатель $B-1$ отключенным, а выключатель $B-2$ включенным.

Генератор Γ : 235 Мва, 13,8 кВ, $x_2 = 0,16$, $I_{f0} = 2,0$.

Трансформатор T : 180 Мва, 121/13,8 кВ, $u_K = 10,5\%$.

Автотрансформатор AT : 160 Мва, 220/115/11 кВ, $u_{BC} = 8\%$, $u_{BH} = 28\%$, $u_{CH} = 18\%$.

Линия: 124 км, $x_1 = 0,4$ ом/км одной цепи, $x_0 = 3,2x_1$ одной цепи, $x_{0I-II} = 2x_1$.

Нагрузки: $H-1$ 50 Мва, $H-2$ 150 Мва.

Система — источник бесконечной мощности ($x = 0$) с напряжением 220 кВ.

За базисные величины примем: $S_6 = 100$ Мва, $U_{6I} = 13,8$ кВ,

$$U_{6II} = 121 \text{ кВ}, U_{6III} = 121 \cdot \frac{220}{115} = 232 \text{ кВ}, I_{6II} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 121} = 0,48 \text{ ка}.$$

При включенных выключателях $B-1$ и $B-2$ для генератора примем режим подъема возбуждения. По кривым рис. 11-24, а для $t = 0,5$ сек при $I_{f0} = 2$ находим $E_{0,5} = 1,22$ и $x_{0,5} = 0,29$.

На рис. 16-18, б, в и г приведены схемы отдельных последовательностей, где все элементы выражены в относительных единицах при базисных условиях. В схемах прямой и обратной последовательностей взаимоиндукция между цепями линии не учтена, поскольку она весьма мала. В схеме нулевой последовательности (рис. 16-18, г) эта взаимоиндукция введена (элементы 12 и 13).

После преобразования в схемах каждой последовательности треугольника с элементами 4, 5, 6 в эквивалентную звезду с элементами 14, 15, 16 дальнейшее приведение этих схем к элементарному виду весьма просто. В результате такого приведения имеем $E_\Sigma = 1,0$, $x_{1\Sigma} = 0,133$, $x_{2\Sigma} = 0,121$, $x_{0\Sigma} = 0,223$.

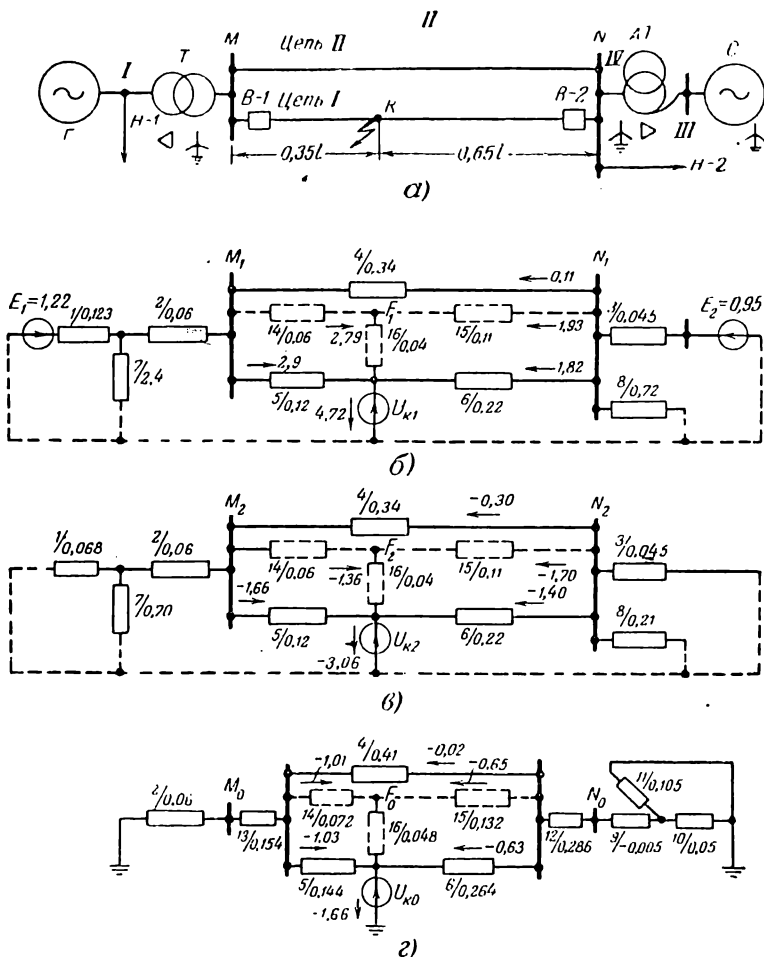


Рис. 16-18. К примеру 16-15.

а — исходная схема; б — схема замещения прямой последовательности; в — то же обратной последовательности; г — то же нулевой последовательности.

Дополнительная реактивность для данного вида короткого замыкания

$$x_{\Delta}^{(1,1)} = 0,121 // 0,223 = 0,079.$$

Принимая $\dot{E}_{A\Sigma} = j1$, находим ток прямой последовательности в месте короткого

$$I_{KA1} = \frac{j1}{j(0,133 + 0,079)} = 4,72.$$

Напряжение прямой последовательности в точке F_1 (рис. 16-18, б)·

$$\dot{U}_{A1} = 4,72j(0,079 + 0,04) = j0,56.$$

Распределение симметричных составляющих токов фазы А приведено на схемах рис. 16-18, б и г.

Правильность выбранного режима генератора Г подтверждается тем, что его напряжение прямой последовательности

$$\dot{U}_{A1} = j0,56 + 2,79j(0,06 + 0,03) \approx j0,9 < j1.$$

При отключенном выключателе В-1 в представленных схемах замещения каждой последовательности нужно разомкнуть цепь элемента 5; поскольку в данном случае резко увеличивается электрическая удаленность генератора Г, то для него следует принять режим нормального напряжения, т. е. в схеме прямой последовательности положить $E_1=1$ и $x_1=0$.

Свернув при этих условиях схемы отдельных последовательностей, найдем:

$$E_\Sigma = 0,9; x_{1\Sigma} = 0,258; x_{2\Sigma} = 0,263 \text{ и } x_{0\Sigma} = 0,474.$$

Следовательно, дополнительная реактизность

$$x_A^{(1,1)} = 0,263 // 0,474 = 0,169;$$

ток прямой последовательности в месте короткого

$$I_{KA1} = \frac{j0,9}{j(0,258 + 0,169)} = 2,1;$$

напряжение в точке N_1 (рис. 16-18, б)

$$\dot{U}_{A1} = 2,1j(0,169 + 0,22) = j0,82;$$

ток прямой последовательности генератора Г

$$I_{A1} = \frac{j(1 - 0,82)}{j(0,34 + 0,06)} + \frac{j1}{j2,4} = 0,88,$$

т. е. он меньше критического тока $I_{кр} = \frac{1,22 - 1}{0,123} = 1,79$, что указывает на правильность выбранного режима.

На рис. 16-19 приведены искомые векторные диаграммы токов. Там же указаны масштабы, в которых они построены. Для большей ясности масштаб для токов в цепи II принят в 2 раза большим, чем для токов в участках цепи I.

Принятые положительные направления токов на отдельных участках рассматриваемой двухцепной линии показаны стрелками на схеме рис. 16-19.

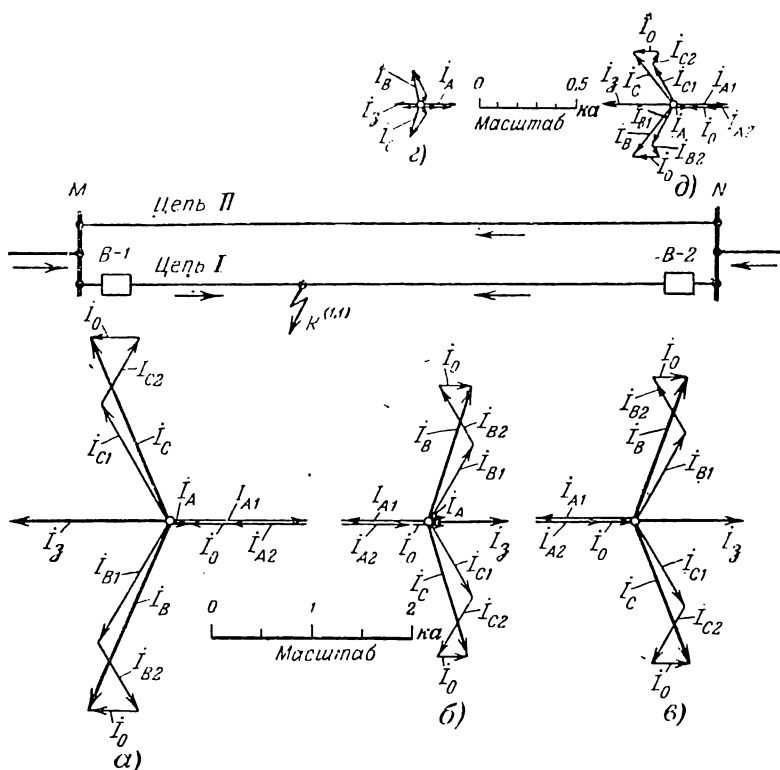


Рис. 16-10. Векторные диаграммы токов примера 16-15.

а — в выключателе *В-1*; *б* — в выключателе *В-2* при включенном выключателе *В-1*; *в* — то же при отключенном выключателе *В-1*; *г* — в цепи *II* при включенном выключателе *В-1*; *д* — то же при отключенном выключателе *В-1*.

16-6. ПРИБЛИЖЕННЫЙ УЧЕТ КАЧАНИЙ

Влияние качаний генераторов, которые возникают при **несимметричных коротких замыканиях**, на величины токов и напряжений с качественной стороны было рассмотрено в § 15-10. Теперь остановимся на вопросе, как практически приближенно учесть этот фактор.

В соответствии с правилом эквивалентности прямой последовательности приближенный учет качаний при определении токов и напряжений прямой последовательности любого вида короткого замыкания, очевидно, можно производить согласно указаний § 11-8. В данном случае

в выражениях (11-27) и (11-28) под P'_m и $x'_{гс}$ следует понимать соответственно максимальную активную мощность прямой последовательности, которую можно передать в заданной схеме при рассматриваемом виде и месте короткого замыкания, и взаимную реактивность между генератором (станцией) и системой, определяемую из схемы прямой последовательности, в которой генератор участвует своей реактивностью x'_d и точка короткого дополнително удалена на $x_{\Delta}^{(n)}$. Закономерность изменения угла $\delta' = f(\tau)$ находят по соответствующим типовым кривым, помещенным в Приложении П-14.

При определении тока прямой последовательности в любой ветви чисто реактивной схемы приближенный учет качаний сводится к тому, что найденные одним из практических методов значения токов прямой последовательности от генератора (станции) и системы суммируют геометрически под углом δ' , который имеет место в рассматриваемый момент времени. Модуль суммарного тока прямой последовательности можно определить также по выражению (11-31). $I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + 2I_1 I_2 \cos \delta'}$

Для определения токов обратной и нулевой последовательностей в произвольной ветви чисто реактивной схемы предварительно находят с учетом качаний значения токов этих последовательностей в месте короткого, а затем умножая их на соответствующие коэффициенты распределения, находят искомые токи в ветвях схемы.

По найденным значениям симметричных составляющих токов уже не представляет труда перейти к фазным токам.

Если требуется, то одновременно с токами находят также напряжения с учетом качаний.

Пример 16-16. При двухфазном коротком замыкании на землю в точке К схемы рис. 11-22,а определить наименьшую величину тока нулевой последовательности линии Л-2. Для реактивностей нулевой последовательности линий принять: для линии Л-1 $x_0 = 5x_1$ и для линии Л-2 $x_0 = 3x_1$.

Все остальные данные приведены в примерах 11-9 и 11-12.

Сохраним базисные условия те же, что и в указанных примерах, т. е. $S_6 = 600 \text{ Мва}$ и $U_6 = U_{ср}$.

Практически можно принять $x_{2\Sigma} \approx x_{1\Sigma} = 0,79$.

Резльтирующая реактивность нулевой последовательности будет:

$$x_{0\Sigma} = [(0,35 + 5 \cdot 0,33) // 0,47] + 3 \cdot 0,4 = 1,58,$$

Дополнительная реактивность $x_{\Delta}^{(1,1)} = 0,79 // 1,58 = 0,53$.

Перенесем в схеме рис. 11-22, б точку К за $x_{\Delta}^{(1,1)} = 0,53$. Тогда взаимная реактивность между генератором и системой будет:

$$x'_{ГС} = 1,16 + 0,59 + \frac{1,16 \cdot 0,59}{(0,4 + 0,53)} = 2,49.$$

Максимальная активная мощность, которая может быть передана при рассматриваемом коротком замыкании,

$$P'_m = \frac{1,27 \cdot 1,0}{2,49} = 0,51.$$

Аналогично решению примера 11-12 по (11-27) и (11-28) находим:

$$T = \frac{0,29}{0,51} = 0,57 \text{ и } t = \frac{\tau}{\sqrt{\frac{314}{3,08} \cdot 0,51}} \approx 0,14 \tau.$$

По кривым $\delta' = f(\tau)$ (см. приложение П-14) находим, что при $\sin \delta_0 = 0,4$ и $T = 0,57$ максимум угла $\delta' = 48^\circ$ и он наступит при $\tau = 3,5$, т. е. при $t = 0,14 \cdot 3,5 = 0,49$ сек.

Расчетные реактивности:

$$\text{станции } x_{\text{расч}} = \frac{(0,79 + 0,53)}{0,34} \cdot \frac{264}{600} = 1,71;$$

$$\text{системы } x_{\text{расч}} = \frac{(0,79 + 0,53)}{0,66} \cdot \frac{2\,000}{600} = 6,68.$$

Вводя поправку на различие в постоянных времени, по кривым рис. 11-11 для $t' = 0,49 \cdot \frac{5}{7,55} = 0,32$ сек и $x_{\text{расч}} = 1,71$ находим относительный ток прямой последовательности генераторов станции $I_{Г1} = 0,59$; благодаря отсутствию нагрузок у генераторов на этот ток вводим по (11-20) поправочный коэффициент

$$b = 1 + \frac{1,71 - 0,21}{1,2} = 2,25;$$

следовательно, ток прямой последовательности от генераторов станции

$$I_{Г1} = 2,25 \cdot 0,59 \cdot \frac{264}{\sqrt{3} \cdot 230} = 0,88 \text{ ка.}$$

Ток прямой последовательности от системы

$$I_{С1} = \frac{1}{6,68} \cdot \frac{2\,000}{\sqrt{3} \cdot 230} = 0,75 \text{ ка,}$$

Модуль тока прямой последовательности в месте короткого замыкания с учетом наибольшего сдвига между э. д. с. генераторов станции и системы по (11-31) составляет:

$$I_{K1} = \sqrt{0,88^2 + 0,75^2 + 2 \cdot 0,88 \cdot 0,75 \cdot \cos 48^\circ} = 1,49 \text{ кА}.$$

Модуль искомого тока нулевой последовательности в линии Л-2

$$I_0 = 1,49 \cdot \frac{0,53}{1,58} = 0,5 \text{ кА}.$$

Если пренебречь сдвигом между указанными э. д. с., то

$$I_K = 0,88 + 0,75 = 1,63 \text{ кА},$$

т. е. он окажется преувеличенным в данном случае примерно на 10%.

16-7. ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. Какое значение будет иметь эквивалентная постоянная времени затухания апериодической слагающей тока, если в примере 16-1 рассматривать не однофазное, а двухфазное короткое замыкание на землю?

2. Провести решение примера 16-2 для случая, когда двухфазное короткое замыкание произошло на выводах высшего напряжения трансформатора Т-3.

3. Для предыдущей задачи построить векторные диаграммы токов и напряжений трансформатора Т-3 (на обеих его сторонах), считая, что его обмотки соединены по схеме Y_0/Δ -11.

4. Провести решение примера 16-3 для случая, когда каждая из фаз В и С замкнулась на землю через сопротивление дуги $r_d = 9,5 \text{ Ом}$.

5. Вывести, при каком соотношении номинальных мощностей генераторов Г-1 и Г-2 примера 16-4 токи поврежденных фаз этих генераторов одинаковы.

6. Какие изменения должны быть внесены в схему рис. 16-5, чтобы при сохранении той же величины тока в месте короткого замыкания токи в неповрежденных фазах генераторов отсутствовали?

7. Установить зависимость между величиной реактивности, через которую следует заземлить нейтраль генератора Г-1 схемы рис. 16-5, и относительной номинальной мощностью генератора Г-2, чтобы токи в нейтрали генератора Г-1 при однофазном и двухфазном коротких замыканиях на землю в точке К были одинаковыми. Все исходные данные принять из условий примера 16-4.

8. В схеме рис. 16-6 точка однофазного короткого замыкания перенесена в конец линии, присоединенной к шинам 230 кВ. Линия имеет длину 70 км; ее полные сопротивления: $Z_1 = Z_2 = 0,17 + j0,41 \text{ Ом/км}$, $Z_0 = 0,32 + j1,43 \text{ Ом/км}$. Сопротивления остальных элементов принять из условий и решения примера 16-5. Определить величину тока для расчетного времени 3 периода.

9. Провести решение примера 16-7 для случая, когда в точке К схемы рис. 16-6 произошло не однофазное, а двухфазное короткое замыкание на землю.

10. Как изменятся искомые токи в примере 16-8, если заземлить нейтраль обмотки 37 кВ трансформатора $T-2$?

11. Для условий примера 16-8 определить напряжения прямой и обратной последовательностей генераторов $G-1$ и $G-2$.

12. Провести решение примера 16-9 для случая, когда линия $L-1$ отключена и заземлена по концам. Считать, что трансформатор $T-1$ отключен, а автотрансформатор $AT-1$ отключен только со стороны 230 кВ.

13. В схеме рис. 16-9 отключены трансформатор $T-1$, автотрансформатор $AT-1$ и линия $L-1$, причем последняя заземлена только со стороны станции. При однофазном коротком замыкании в точке K определить наибольшую величину напряжения, наведенного на свободном (разомкнутом) конце линии $L-1$.

14. Найти распределение и величины токов нулевой последовательности в схеме рис. 16-9 при однофазном коротком замыкании в точке K при условии, что нейтрали автотрансформаторов разземлены. Исходные данные приведены в условии примера 16-9. Решение провести для $t=0,2$ сек.

15. Как изменится решение примера 16-9, если вместо автотрансформаторов $AT-1$ и $AT-2$ в схеме рис. 16-9 поставить трехобмоточные трансформаторы с теми же параметрами?

16. В схеме рис. 11-25,а в точке K произошло двухфазное короткое замыкание, при этом реактор в одной из поврежденных фаз закорочен. Определить фазные токи и напряжения генератора для $t=1,5$ сек, считая, что генератор является типовым гидрогенератором и его $x_2=0,42$ и $I_{00}=1,7$. Полученные результаты сравнить с результатами решения примера 16-11.

17. Для условий примера 16-12 определить фазные токи и напряжения трансформаторов $T-2$ и $T-3$, считая соединение их обмоток $Y_0/\Delta-11$. Нейтраль обмотки высшего напряжения трансформатора $T-3$ не заземлена.

18. Провести решение примера 16-12 при условии, что вместо двухфазного короткого замыкания на землю в точке $K-2$ произошло двухфазное короткое замыкание (без замыкания на землю).

19. Показать деформации векторных диаграмм (рис. 16-15), полученных в решении примера 16-13, при изменении сопротивления дуги в месте однофазного короткого замыкания.

20. Каково будет изменение фазных токов обоих генераторов в примере 16-14, если пренебречь влиянием тока в неповрежденной фазе (т. е. уравнительным током между генераторами)?

21. Для условий примера 16-13 построить векторные диаграммы напряжений в начале линии $L-1$ и за трансформаторами $T-2$ и $T-3$.

22. Как изменятся величина и распределение токов нулевой последовательности в примере 16-15, если пренебречь взаимной индукцией нулевой последовательности между цепями линии в схеме рис. 16-18,а?

23. Провести решение примера 16-15 для случая однофазного короткого замыкания в той же точке.

24. Для условий примера 16-15 построить векторные диаграммы напряжений в начале и в конце линии передачи.

25. Построить кривые изменения токов поврежденной фазы в выключателях $B-1$ и $B-2$ при перемещении точки однофазного короткого замыкания по цепи I линии передачи в схеме рис. 16-18,а.

Построение произвести для $t=0,5$ сек по трем точкам, т. е. при коротком в начале, середине и в конце линии.

26. В схеме рис. 16-18,а цепь II линии отключена и заземлена с обоих концов. Определить ток однофазного короткого замыкания при коротком в середине цепи I линии и его распределение между заземленными нейтралями. Решение произвести для $t=0,2$ сек при исходных данных примера 16-15.

27. Используя метод спрямленных характеристик, определить для условий примера 16-16 изменение фазных токов в линии I-I с учетом возникших качаний.

28. Из кривых рис. П-14 следует, что при $\sin \delta'_0=0,4$ и $T \approx 0,8$ устойчивая работа генератора еще сохраняется. Определить, на каком расстоянии от шин 230 кВ схемы рис. 11-22,а может произойти двухфазное короткое замыкание на землю, чтобы было $T \approx 0,8$ и каковы при этом будут наибольшие и наименьшие величины фазных токов в линиях Л-1 и Л-2.

ГЛАВА СЕМНАДЦАТАЯ

ОДНОКРАТНАЯ ПРОДОЛЬНАЯ НЕСИММЕТРИЯ

17-1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Продольную несимметрию в какой-либо точке трехфазной системы в общем виде можно представить включением в рассечку каждой фазы неодинаковых сопротивлений Z_A , Z_B и Z_C (рис. 17-1,а). Последние могут быть еще связаны между собой взаимной индукцией, значения которой для каждой пары фаз также различны.

Чтобы несколько упростить выкладки, допустим, что указанной взаимной индукции нет. Тогда падения напряжений в фазах несимметричного участка цепи будут:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{U}_{LA} &= Z_A \dot{I}_{LA}; \\ \Delta \dot{U}_{LB} &= Z_B \dot{I}_{LB}; \\ \Delta \dot{U}_{LC} &= Z_C \dot{I}_{LC} \end{aligned} \right\} \quad (17-1)$$

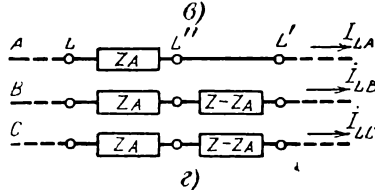
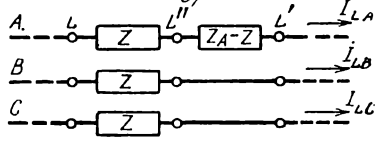
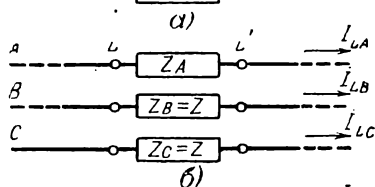
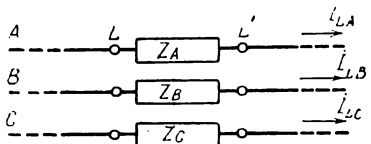
и соответственно в записи через симметричные составляющие, принимая за основную фазу А,

$$\Delta \dot{U}_{LA1} + \Delta \dot{U}_{LA2} + \Delta \dot{U}_{L0} = Z_A (\dot{I}_{LA1} + \dot{I}_{LA2} + \dot{I}_{L0}); \quad (17-2)$$

$$a^2 \Delta \dot{U}_{LA1} + a \Delta \dot{U}_{LA2} + \Delta \dot{U}_{L0} = Z_B (a^2 \dot{I}_{LA1} + a \dot{I}_{LA2} + \dot{I}_{L0}); \quad (17-3)$$

$$a \Delta \dot{U}_{LA1} + a^2 \Delta \dot{U}_{LA2} + \Delta \dot{U}_{L0} = Z_C (a \dot{I}_{LA1} + a^2 \dot{I}_{LA2} + \dot{I}_{L0}). \quad (17-4)$$

Эти уравнения содержат шесть неизвестных величин: $\Delta \dot{U}_{L0}$, $\Delta \dot{U}_{LA1}$, $\Delta \dot{U}_{LA2}$, I_{LA1} , I_{LA2} и I_{L0} , для нахождения которых надлежит использовать еще три основных уравнения падений напряжения в схемах каждой последовательности, составленных для симметричной части системы, которые по аналогии с (12-4)—(12-6) можно представить в виде:



$$\Delta \dot{U}_{LA1} = \dot{E}_{A\Sigma} - Z_{L1\Sigma} I_{LA1}; \quad (17-5)$$

$$\Delta \dot{U}_{LA2} = 0 - Z_{L2\Sigma} I_{LA2}; \quad (17-6)$$

$$\Delta \dot{U}_{L0} = 0 - Z_{L0\Sigma} I_{L0}; \quad (17-7)$$

где $Z_{L1\Sigma}$, $Z_{L2\Sigma}$, $Z_{L0\Sigma}$ — результирующие сопротивления схем соответствующих последовательностей относительно места продольной несимметрии (§ 14-4).

Таким образом, расчет продольной несимметрии принципиально ничем не отличается от расчета поперечной несимметрии (§ 15-1). Изложенный общий путь решения приводит к достаточно громоздким выражениям

Рис. 17-1. Продольная несимметрия.

а — общий случай; б — частный случай; в и г — варианты представления частного случая, приведенного в п. б.

даже при отсутствии взаимоиндукции на участке продольной несимметрии.

Поэтому в дальнейшем остановимся на некоторых частных случаях продольной несимметрии, которые нередко встречаются на практике. При этом каждый из них будем характеризовать своими граничными условиями, из которых вытекают достаточно простые соотношения для симметричных составляющих токов и напряжений в месте продольной несимметрии, позволяющие полу-

чить простые расчетные выражения, а также комплексные схемы замещения.

Обычно имеют место случаи, когда сопротивление одной фазы отлично от сопротивлений двух других фаз. Пусть, например, сопротивления $Z_B = Z_C = Z$ и $Z_A > Z$ (рис. 17-1,б). Такое включение сопротивлений можно заменить эквивалентным (рис. 17-1,в), где сопротивление Z отнесено к симметричной части системы и продольная несимметрия характеризуется сопротивлением $\Delta Z_A = (Z_A - Z)$ только в фазе А. Изменение ΔZ_A от нуля до бесконечности создает переход данного участка цепи от полной симметрии до наибольшей продольной несимметрии, когда фаза А оборвана. Аналогично можно представить эквивалентное включение сопротивлений только в две фазы (рис. 17-1,г), причем увеличение этих сопротивлений в пределе приводит к одновременному обрыву данных фаз. Именно такой путь перехода к пределу использован ниже при выходе расчетных выражений и комплексных схем замещения при обрывах одной и двух фаз.

17-2. СОПРОТИВЛЕНИЕ В ОДНОЙ ФАЗЕ

Рассмотрим участок трехфазной цепи, где только в фазе А включено некоторое сопротивление Z (рис. 17-2,а); можно предположить, что такие же сопротивления введены и в другие фазы, но они закорочены (рис. 17-2,б).

Граничные условия для данного случая будут:

$$\Delta \dot{U}_{LA} = Z \dot{I}_{LA}; \quad (17-8)$$

$$\Delta \dot{U}_{LB} = 0; \quad (17-9)$$

$$\Delta \dot{U}_{LC} = 0. \quad (17-10)$$

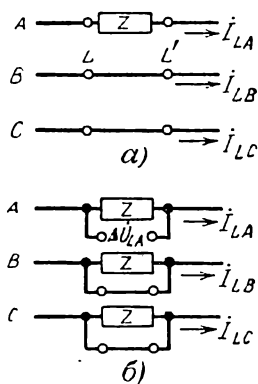


Рис. 17-2. Несимметрия от включения сопротивления в одну фазу.

а и б — варианты представления исходной схемы.

При разложении на симметричные составляющие условия (17-9) и (17-10) приводят к равенствам:

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = \Delta \dot{U}_{LA2} = \Delta \dot{U}_{L0} = \frac{1}{3} \Delta \dot{U}_{LA}, \quad (17-11)$$

которые позволяют условие (17-8) записать в виде:

$$3\Delta \dot{U}_{LA1} = Z(\dot{I}_{LA1} + \dot{I}_{LA2} + \dot{I}_{L0}). \quad (17-12)$$

Используя (17-6), (17-7) и (17-11), выразим $\dot{I}_{LA2}$ и $\dot{I}_{L0}$ через $\Delta \dot{U}_{LA1}$, т. е.

$$\dot{I}_{LA2} = -\frac{\Delta \dot{U}_{LA1}}{Z_{L2\Sigma}}; \quad (17-13)$$

$$\dot{I}_{L0} = -\frac{\Delta \dot{U}_{LA1}}{Z_{L0\Sigma}}. \quad (17-14)$$

После подстановки этих выражений в (17-12) и необходимых преобразований последнего найдем:

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = Z_{\Delta L}^{(1)} \dot{I}_{LA1}, \quad (17-15)$$

где

$$Z_{\Delta L}^{(1)} = \frac{1}{\frac{3}{Z} + \frac{1}{Z_{L2\Sigma}} + \frac{1}{Z_{L0\Sigma}}} = \frac{Z}{3} // Z_{L2\Sigma} // Z_{L0\Sigma}. \quad (17-16)$$

Теперь из (17-5) и (17-15)

$$\dot{I}_{LA1} = \frac{\dot{E}_{A\Sigma}}{Z_{L1\Sigma} + Z_{\Delta L}^{(1)}} \quad (17-17)$$

и согласно (17-13), (17-14) и (17-15) для токов обратной и нулевой последовательностей имеем:

$$\dot{I}_{LA2} = -\frac{Z_{\Delta L}^{(1)}}{Z_{L2\Sigma}} \dot{I}_{LA1}; \quad (17-13a)$$

$$\dot{I}_{L0} = -\frac{Z_{\Delta L}^{(1)}}{Z_{L0\Sigma}} \dot{I}_{LA1}. \quad (17-14a)$$

По найденным симметричным составляющим токов уже не представляет труда найти величины фазных токов.

Для получения выражений при обрыве одной фазы достаточно в (17-16) положить $Z = \infty$; при этом

$$Z_{\Delta L}^{(1)} = Z_{L2\Sigma} // Z_{L0\Sigma}. \quad (17-16a)$$

Соотношения (17-11) и (17-12) позволяют составить комплексную схему замещения (рис. 17-3,а) для рас-

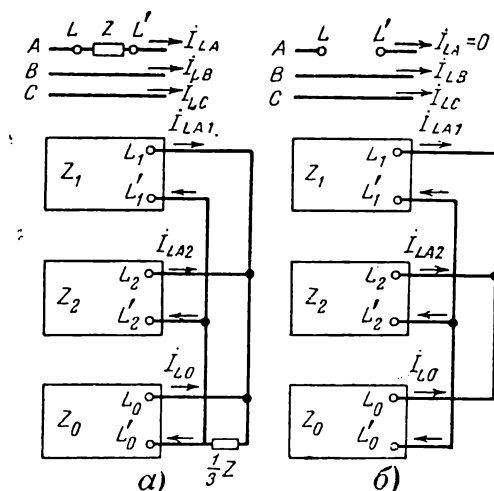


Рис. 17-3. Комплексные схемы замещения.

а — при наличии сопротивления в одной фазе;
б — при обрыве одной фазы.

считываемой продольной несимметрии. При обрыве фазы эта схема приобретает еще более простой вид (рис. 17-3,б).

Для определения напряжений с одной из сторон продольной несимметрии следует предварительно найти по схемам отдельных последовательностей симметричной части цепи соответствующие составляющие этих напряжений. Прибавив к последним $\Delta \dot{U}_{LA1}$, $\Delta \dot{U}_{LA2}$ и $\Delta \dot{U}_{L0}$, находим симметричные составляющие напряжений с другой стороны продольной несимметрии. Переход к фазным величинам напряжений производится известным способом.

В качестве примера рассмотрим схему, в которой все элементы чисто индуктивные и лишь на одном участке

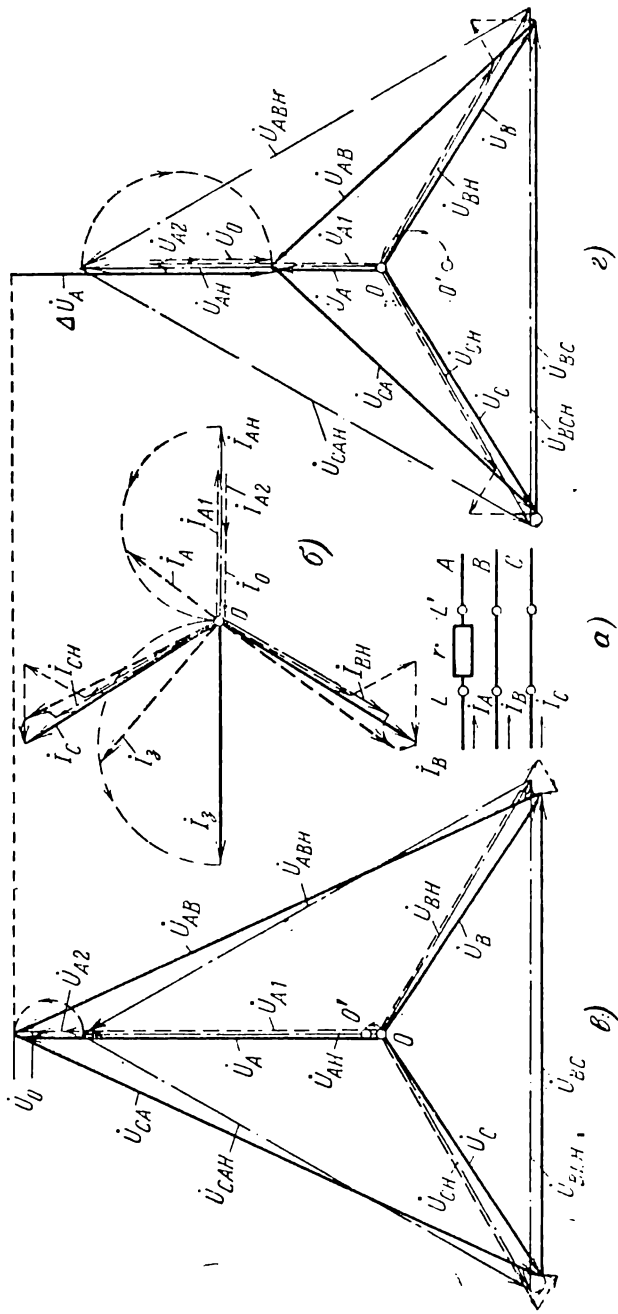


Рис. 17-4. Продольная несимметрия от включения активного сопротивления в одну фазу чисто индуктивной схемы.
а — исходная схема; б — векторная диаграмма токов в месте несимметрии; в и г — векторные диаграммы напряжений соответственно в точках L и L'.

в фазе A включено активное сопротивление r (рис. 17-4,а). Векторная диаграмма токов на этом участке и векторные диаграммы напряжений на его концах представлены на рис. 17-4,б, в и г. При изменении r от нуля до бесконечности концы векторов токов и напряже-

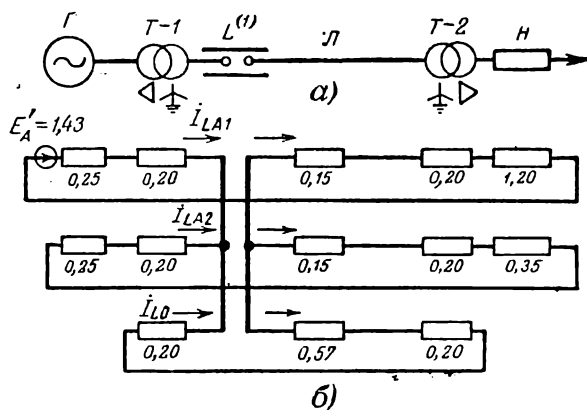


Рис. 17-5. К примеру 17-1.

а — исходная схема; б — комплексная схема замещения.

ний скользят по соответствующим окружностям. Сплошными жирными линиями показаны векторы отдельных величин при обрыве фазы A ($r = \infty$).

Пример 17-1. Для схемы рис. 17-5,а определить токи в линии при обрыве у нее одной фазы. Комплексная схема, где все элементы выражены в относительных единицах при базисных условиях, приведена на рис. 17-5,б.

Резльтирующие реактивности относительно места обрыва составляют:

$$x_{L1\Sigma} = 0,15 + 0,20 + 1,20 + 0,25 + 0,20 = 2,0;$$

$$x_{L2\Sigma} = 0,15 + 0,20 + 0,35 + 0,25 + 0,20 = 1,15;$$

$$x_{L0\Sigma} = 0,57 + 0,20 + 0,20 = 0,97.$$

Дополнительная реактивность

$$x_{\Delta L}^{(1)} = 1,15 // 0,97 = 0,526.$$

По (17-17) ток прямой последовательности

$$I_{LA1} = \frac{j1,43}{j(2,0 + 0,526)} = 0,565$$

и по (17-13а) и (17-14а), считая оборванной фазу A ,

$$I_{LA2} = -\frac{0,526}{1,15} \cdot 0,565 = -0,258;$$

$$I_{L0} = -\frac{0,526}{0,97} \cdot 0,565 = -0,307.$$

Ток в неповрежденных фазах линии

$$\begin{aligned} I_{LB} = \hat{I}_{LC} &= a^2 \cdot 0,565 - a \cdot 0,258 - 0,307 = -0,461 - \\ &- j 0,714 = 0,85 \angle 237^\circ. \end{aligned}$$

Поскольку структура выражений для токов в необорванных фазах идентична структуре выражений для токов в месте двухфазного короткого замыкания на землю, то модуль тока в необорванных фазах можно получить, используя коэффициент $m^{(1,1)}$ [см. (15-48)], т. е.

$$I_L = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{1,15 \cdot 0,97}{(1,15 + 0,97)^2}} \cdot 0,565 = 0,85.$$

Для сравнения отметим, что при нормальной работе линии фазный ток составляет $I = 0,715$. Следовательно, при обрыве одной фазы ток в здоровых фазах возрастает на $\frac{0,85 - 0,715}{0,715} \cdot 100 = 19\%$.

17-3. СОПРОТИВЛЕНИЕ В ДВУХ ФАЗАХ

Пусть в двух фазах, например B и C , включены сопротивления Z (рис. 17-6,а); аналогичное сопротивление можно считать также включенным и в фазу A , но оно закорочено (рис. 17-6,б).

Граничные условия для данной продольной несимметрии будут:

$$\Delta \dot{U}_{LA} = 0; \quad (17-18)$$

$$\Delta \dot{U}_{LB} = Z \dot{I}_{LB}; \quad (17-19)$$

$$\Delta \dot{U}_{LC} = Z \dot{I}_{LC}. \quad (17-20)$$

Запишем их через симметричные составляющие фазы A :

$$\Delta \dot{U}_{LA1} + \Delta \dot{U}_{LA2} + \Delta \dot{U}_{L0} = 0; \quad (17-18a)$$

$$\begin{aligned} a^2 \Delta \dot{U}_{LA1} + a \Delta \dot{U}_{LA2} + \Delta \dot{U}_{L0} &= Z (a^2 \dot{I}_{LA1} + a \dot{I}_{LA2} + \dot{I}_{L0}); \\ & \quad (17-19a) \end{aligned}$$

$$a\Delta\dot{U}_{LA1} + a^2\Delta\dot{U}_{LA2} + \Delta\dot{U}_{L0} = Z(a\dot{I}_{LA1} + a^2\dot{I}_{LA2} + \dot{I}_{L0}). \quad (17-20a)$$

Решение этих уравнений относительно симметричных составляющих падений напряжения дает:

$$\Delta\dot{U}_{L0} = \frac{Z}{3} [(\dot{I}_{L0} - \dot{I}_{LA1}) + (\dot{I}_{L0} - \dot{I}_{LA2})]; \quad (17-21)$$

$$\Delta\dot{U}_{LA1} = \frac{Z}{3} [(\dot{I}_{LA1} - \dot{I}_{LA2}) + (\dot{I}_{LA1} - \dot{I}_{L0})]; \quad (17-22)$$

$$\Delta\dot{U}_{LA2} = \frac{Z}{3} [(\dot{I}_{LA2} - \dot{I}_{LA1}) + (\dot{I}_{LA2} - \dot{I}_{L0})]. \quad (17-23)$$

Используя полученные уравнения, а также основные уравнения (17-5) — (17-7), можно найти расчетное выражение для тока $\dot{I}_{LA1}$ и соотношения между этим током и токами других последовательностей. Однако этот общий путь решения в данном случае требует довольно громоздких алгебраических преобразований.

Значительно проще решение можно получить из комплексной схемы замещения, которую легко составить в соответствии с уравнениями (17-21) — (17-23). Нетрудно убедиться, что этим уравнениям удовлетворяет схема рис. 17-7,а. Она может быть представлена и в ином виде, для чего достаточно звезду с сопротивлениями $Z/3$ заменить эквивалентным треугольником с сопротивлениями Z .

Следовательно, дополнительное сопротивление, вводимое в место обрыва схемы прямой последовательности, согласно комплексной схемы замещения будет:

$$Z_{\Delta L}^{(2)} = [(Z // Z_{L0\Sigma}) + (Z // Z_{L2\Sigma})] // Z; \quad (17-24)$$

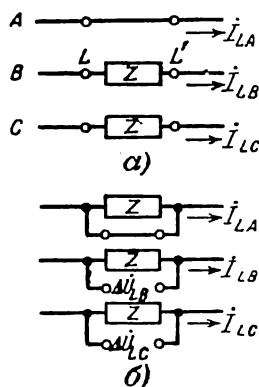


Рис. 17-6. Несимметрия от включения сопротивлений в две фазы.

а и б — варианты представления исходной схемы.

для тока прямой последовательности имеем:

$$\dot{I}_{LA1} = \frac{\dot{E}_{A\Sigma}}{Z_{L1\Sigma} + Z_{\Delta L}^{(2)}} \quad (17-25)$$

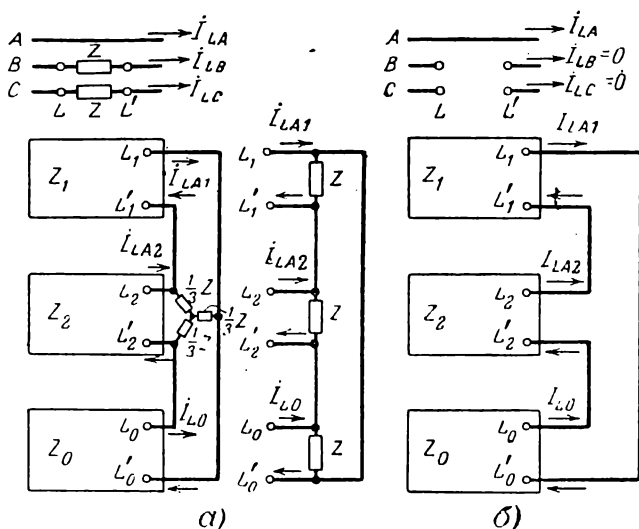


Рис. 17-7. Комплексные схемы замещения.
а — при наличии одинаковых сопротивлений в двух фазах;
б — при обрыве двух фаз.

и для токов других последовательностей:

$$\dot{I}_{LA2} = \dot{I}_{LA1} \frac{Z - Z_{\Delta L}^{(2)}}{Z + Z_{L2\Sigma}}; \quad (17-26)$$

$$\dot{I}_{L0} = \dot{I}_{LA1} \frac{Z - Z_{\Delta L}^{(2)}}{Z + Z_{L0\Sigma}}. \quad (17-27)$$

Составляющая прямой последовательности падения напряжения в месте несимметрии будет:

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = Z_{\Delta L}^{(2)} \dot{I}_{LA1}; \quad (17-28)$$

составляющие обратной и нулевой последовательностей легко найти по (17-6) и (17-7); целесообразно также использовать (17-18а).

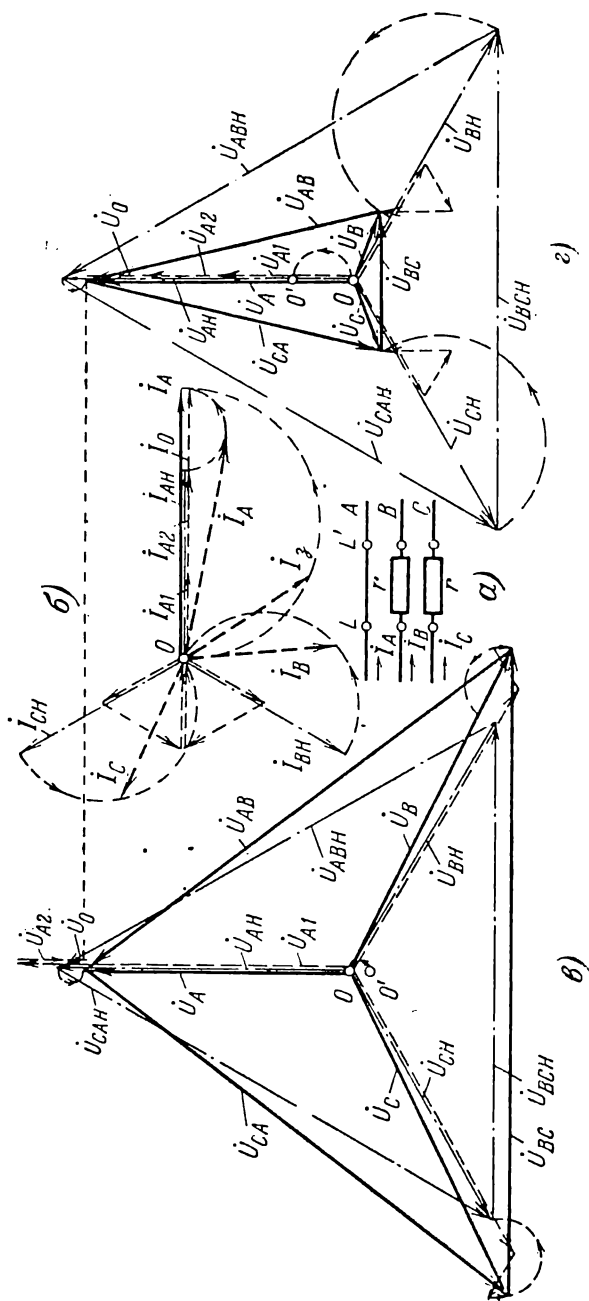


Рис. 17-8. Продольная несимметрия от включения в две фазы чисто индуктивной схемы одинаковых активных сопротивлений.

a — исходная схема; b — векторная диаграмма токов в месте несимметрии; c и z — векторные диаграммы напряжений соответственно в точках L и L' .

Для нахождения фазных величин достаточно произвести суммирование соответствующих симметричных составляющих.

При обрыве двух фаз, полагая $Z = \infty$, имеем:

$$Z_{\Delta L}^{(2)} = Z_{L2\Sigma} + Z_{L0\Sigma}, \quad (17-24a)$$

$$I_{LA1} = I_{LA2} = I_{L0}, \quad (17-29)$$

и комплексная схема приобретает вид рис. 17-7,б.

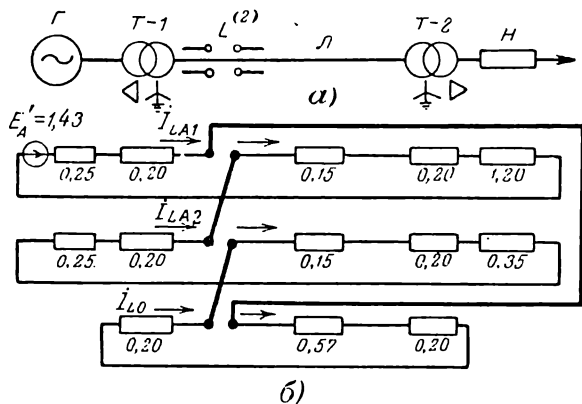


Рис. 17-9. К примеру 17-2.

a — исходная схема; *б* — комплексная схема замещения.

Для продольной несимметрии, вызванной включением одинаковых активных сопротивлений в фазы *B* и *C* (рис. 17-8,а) чисто индуктивной схемы, на рис. 17-8,б, в и г приведены векторные диаграммы токов и напряжений. При изменении *r* концы векторов скользят по соответствующим окружностям. Сплошными жирными линиями проведены векторы отдельных величин при обрыве фаз *B* и *C*.

Пример 17-2. Для схемы рис. 17-9,а* определить ток в фазе *A* линии при обрыве ее фаз *B* и *C*.

Комплексная схема для данного случая показана на рис. 17-9,б. Реактивности ее элементов выражены в относительных единицах при базисных условиях.

* Она та же, что и в примере 17-1 (см. рис. 17-5,а).

В примере 17-1 были найдены реактивности:

$$x_{L1\Sigma} = 2,0; \quad x_{L2\Sigma} = 1,15; \quad x_{L0\Sigma} = 0,97.$$

По (17-24, а) имеем:

$$x_{\Delta L}^{(2)} = 1,15 + 0,97 = 2,12.$$

В соответствии с (17-25) и (17-29) находим:

$$I_{LA1} = I_{LA2} = I_{L0} = \frac{j 1,43}{j (2,0 + 2,12)} = 0,35$$

и

$$I_{LA} = 3 \cdot 0,35 = 1,05,$$

т. е. на 47% больше, чем при нормальной работе линии.

17-4. ЛИНИЯ ПЕРЕДАЧИ «ДВА ПРОВОДА—ЗЕМЛЯ»

В трехфазной системе с изолированной нейтралью иногда для одной из фаз какой-либо линии (или ее отдельного участка) вместо провода используют землю (рис. 17-10). Такая линия передачи, которую сокращен-

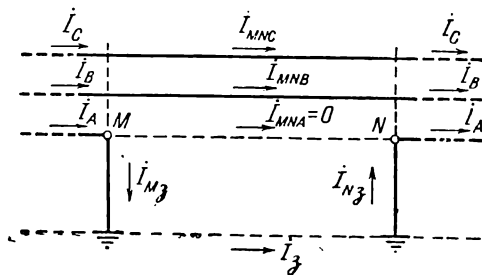


Рис. 17-10. Принципиальная схема линии передачи «два провода — земля» (ДПЗ).

но называют «два провода — земля» (ДПЗ), по существу представляет собой частный случай местной продольной несимметрии. Поскольку он вызывает практический интерес, остановимся на нем более подробно.

Пусть на участке между точками *M* и *N* трехфазной линии провод фазы *A* снят и в этих точках данная фаза заземлена, как показано на рис. 17-10. Для простоты выкладок пренебрежем сопротивлениями заземлений

указанных точек, а также сопротивлением самой земли¹.

Граничные условия для несимметричного участка данной линии будут:

$$I_{MNA} = 0; \quad (17-30)$$

$$\dot{U}_{MA} = 0; \quad (17-31)$$

$$\dot{U}_{NA} = 0. \quad (17-32)$$

При принятых условиях падение напряжения на участке MN заземленной фазы

$$\Delta \dot{U}_{MNA} = 0. \quad (17-33)$$

За пределами точек M и N система фазных токов уравновешена, т. е.

$$I_A + I_B + I_C = 0, \quad (17-34)$$

причем в незаземленных фазах

$$\left. \begin{aligned} I_B &= I_{MNB}; \\ I_C &= I_{MNC}. \end{aligned} \right\} \quad (17-35)$$

Согласно (17-30) симметричные составляющие токов на участке MN связаны соотношением

$$I_{MNA1} + I_{MNA2} + I_{MN0} = 0. \quad (17-30a)$$

Найдем связь между симметричными составляющими токов на участке MN и за его пределами.

Для тока прямой последовательности с учетом (17-34), (17-35) и (17-30a) имеем:

$$\begin{aligned} I_{A1} &= \frac{1}{3} (I_A + aI_B + a^2I_C) = \frac{1}{3} [(a-1)I_B + \\ &+ (a^2-1)I_C] = \frac{1}{3} [(a-1)(a^2I_{MNA1} + aI_{MNA2} + I_{MN0}) + \\ &+ (a^2-1)(aI_{MNA1} + a^2I_{MNA2} + I_{MN0})] = 2I_{MNA1} + I_{MNA2}. \end{aligned} \quad (17-36)$$

¹ Учет этих сопротивлений не вызывает принципиальных трудностей.

Аналогично для тока обратной последовательности

$$I_{A2} = I_{MNA1} + 2I_{MNA2}. \quad (17-37)$$

Следовательно, из (17-36) и (17-37) находим нужные соотношения:

$$I_{MNA1} = \frac{2I_{A1} - I_{A2}}{3}; \quad (17-38)$$

$$I_{MNA2} = \frac{2I_{A2} - I_{A1}}{3}, \quad (17-39)$$

и в соответствии с (17-30а)

$$I_{MNO} = -\frac{I_{A1} + I_{A2}}{3}. \quad (17-40)$$

Теперь определим симметричные составляющие падений напряжений на участке MN , используя для этого выражения для падений напряжений в каждой фазе:

$$\Delta\dot{U}_{MNA} = \Delta\dot{U}_{MNA1} + \Delta\dot{U}_{MNA2} + \Delta\dot{U}_{MNO} = 0; \quad (17-41)$$

$$\begin{aligned} \Delta\dot{U}_{MNB} &= a^2\Delta\dot{U}_{MNA1} + a\Delta\dot{U}_{MNA2} + \Delta\dot{U}_{MNO} = \\ &= Z_{MN1}a^2I_{MNA1} + aZ_{MN1}I_{MNA2} + Z_{MNO}I_{MNO}; \end{aligned} \quad (17-42)$$

$$\begin{aligned} \Delta\dot{U}_{MNC} &= a\Delta\dot{U}_{MNA1} + a^2\Delta\dot{U}_{MNA2} + \Delta\dot{U}_{MNO} = \\ &= aZ_{MN1}I_{MNA1} + a^2Z_{MN1}I_{MNA2} + Z_{MNO}I_{MNO}. \end{aligned} \quad (17-43)$$

После подстановки в эти уравнения соотношений (17-38) — (17-40) и их решения относительно симметричных составляющих падений напряжений получим:

$$\Delta\dot{U}_{MNA1} = \frac{Z'_{\Delta}}{3}I_{A1} + \frac{Z''_{\Delta}}{3}(I_{A1} - I_{A2}); \quad (17-44)$$

$$\Delta\dot{U}_{MNA2} = \frac{Z'_{\Delta}}{3}I_{A2} + \frac{Z''_{\Delta}}{3}(I_{A2} - I_{A1}); \quad (17-45)$$

$$\Delta\dot{U}_{MNO} = -\frac{Z'_{\Delta}}{3}(I_{A1} + I_{A2}), \quad (17-46)$$

где

$$Z'_{\Delta} = \frac{Z_{MN1} + 2Z_{MNO}}{3}; \quad (17-47)$$

$$Z''_{\Delta} = \frac{4Z_{MN1} - Z_{MNO}}{3}. \quad (17-48)$$

Для дальнейшего решения нужно дополнительно использовать уравнения для симметричных составляющих падений напряжений на участке MN , составленные для симметричной части схемы. Однако такой общий путь связан с выполнением достаточно громоздких и утомительных преобразований. Поэтому, как и в § 17-3, перей-

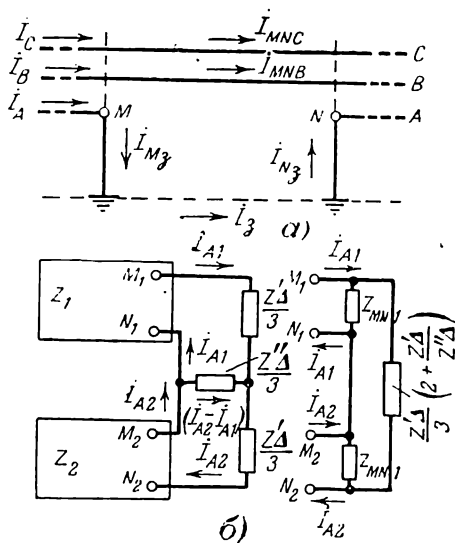


Рис. 17-11. К учету линии передачи «два провода — земля».
 а — исходная схема; б — варианты соединения схем прямой и обратной последовательностей в комплексную схему.

дем сразу к составлению комплексной схемы замещения, из которой затем проще получить выражения для симметричных составляющих токов линии ДПЗ.

Нетрудно убедиться, что представленное на рис. 17-11,б соединение схем прямой и обратной последовательностей полностью удовлетворяет уравнениям (17-44) — (17-46). Оно может быть выполнено в двух вариантах: либо в виде звезды, либо в виде треугольника. Как видно, напряжение между точками N_2 и M_1 соответствует ΔU_{MNO} .

Из комплексной схемы рис. 17-11,б следует, что для определения тока прямой последовательности в симмет-

ричной части сети достаточно схему прямой последовательности линии ДПЗ представить сопротивлением

$$Z_{\Delta}^{(\text{ДПЗ})} = Z_{MN1} \parallel \left[(Z_{MN1} \parallel Z_{MN2\Sigma}) + \frac{Z'_{\Delta}}{3} \left(2 + \frac{Z'_{\Delta}}{Z''_{\Delta}} \right) \right]. \quad (17-49)$$

Тогда

$$I_{A1} = \frac{\dot{E}_{A\Sigma}}{Z_{MN1\Sigma} + Z_{\Delta}^{(\text{ДПЗ})}}. \quad (17-50)$$

Ток обратной последовательности в той же части сети согласно схеме рис. 17-11,б будет:

$$I_{A2} = I_{A1} \frac{Z_{MN1} - Z_{\Delta}^{(\text{ДПЗ})}}{Z_{MN1} + Z_{MN2\Sigma}}. \quad (17-51)$$

Зная токи I_{A1} и I_{A2} , по (17-38) — (17-40) легко найти симметричные составляющие токов в линии ДПЗ. При использовании расчетной модели токи I_{MNA1} и I_{MNA2} получаются непосредственным замером в ветвях Z_{MN1} , а ток I_{MNO} находят из (17-30а).

Переход к фазным величинам производят известным графическим или аналитическим суммированием симметричных составляющих рассматриваемых величин.

Интересно отметить, что, как следует из (17-48) и схемы рис. 17-11,б, при $Z_{MNO} = 4Z_{MN1}$ ток обратной последовательности в симметричной части схемы совсем отсутствует, несмотря на наличие несимметричного участка сети. Соотношения между Z_{MNO} и Z_{MN1} , довольно близкие к указанному, имеют место у воздушных одноцепных линий без хорошо проводящих заземленных тросов; это собственно и обуславливает практическую возможность применения линий ДПЗ.

Предельный случай, когда $Z_{MNO} = \infty$, соответствует обрыву фазы А. При этом комплексная схема рис. 17-11,б переходит в схему рис. 17-3,б, где только нужно отключить схему нулевой последовательности, поскольку рассматривается сеть с изолированной нейтралью.

Пример 17-3. В схеме рис. 17-5,а разземлены нейтрали обоих трансформаторов и линия переведена на работу по системе ДПЗ, как это показано на рис. 17-12,а. Построить векторные диаграммы токов в линии и трансформаторах и напряжений по концам линии.

Комплексная схема с указанием э. д. с. и реактивных элементов, выраженных в относительных единицах при базисных условиях, представлена на рис. 17-12,б.

В данном случае по (17-47) и (17-48) имеем:

$$x'_{\Delta} = j \frac{0,15 + 2 \cdot 0,57}{3} = j0,43;$$

$$x''_{\Delta} = j \frac{4 \cdot 0,15 - 0,57}{3} = j0,01,$$

и, следовательно, сопротивление, соединяющее точки M_1 и N_2 в схеме рис. 17-12,б, будет:

$$x_{M_1 N_2} = j \frac{0,43}{3} \cdot \left(2 + \frac{0,43}{0,01} \right) = j6,45.$$

Находим значения реактивностей:

$$x_{MN2\Sigma} = j (0,20 + 0,25 + 0,35 + 0,20) = j1,0$$

и по (17-49)

$$x_{\Delta}^{(ДПЗ)} = j \{ 0,15 // [(0,15 // 1,0) + 6,45] \} = j0,147.$$

Ток прямой последовательности в симметричной части схемы (при $x_{MN1\Sigma} = 1,85$)

$$I_{A1} = \frac{j1,43}{j(1,85 + 0,147)} = 0,72$$

и ток обратной последовательности по (17-51)

$$I_{A2} = 0,72 \cdot \frac{0,15 - 0,147}{0,15 + 1,0} = 0,72 \cdot 0,0026 \approx 0,$$

т. е. ток обратной последовательности в симметричной части схемы ничтожно мал, что объясняется близостью значений $4x_{MN1}$ и x_{MN0} , в самом деле $4x_{MN1} = 0,60$ и $x_{MN0} = 0,57$.

Симметричные составляющие токов в линии ДПЗ согласно (17-38)—(17-40) при $I_{A2} = 0$ будут:

$$I_{NNA1} = 0,48, \quad I_{MNA2} = -0,24 \text{ и } I_{MNO} = -0,24.$$

В симметричной части схемы токи практически такие же, как при обычном полнофазном режиме линии.

Напряжения по концам линии ДПЗ определяются практически суммированием напряжений прямой последовательности с напряжениями нулевой последовательности, которые согласно граничным

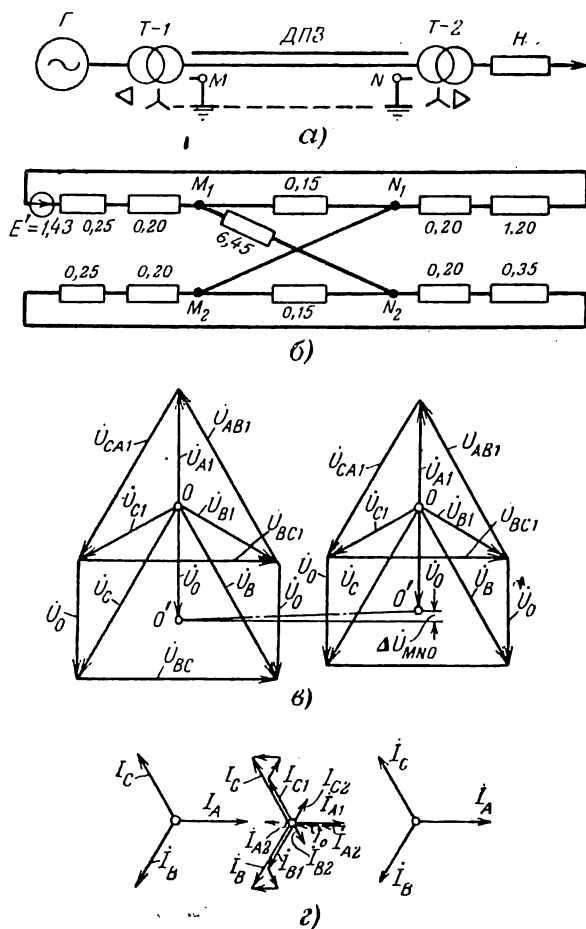


Рис. 17-12. К примеру 17-3.

a — исходная схема; **б** — комплексная схема замещения; **в** — векторные диаграммы напряжений в точках M и N ; **г** — векторные диаграммы токов в ДПЗ и в обмотках высшего напряжения обоих трансформаторов.

условиям (17-31) и (17-32) равны и противоположны напряжениям прямой последовательности (так как $U_2 \approx 0$) фазы A в точках ее заземления (M и N).

Построение искомых векторных диаграмм приведено на рис. 17-12, в и г. Поскольку $I_{MN2} = I_{MN0}$ и $x_{MN0} = 3,8 \cdot x_{MN1}$, то ΔU_{MN2} в 3,8 раза меньше ΔU_{MN0} , в силу чего ΔU_{MN2} пренебрежено.

17-5. ПРАВИЛО ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ ПРЯМОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Структура выражений (17-17), (17-25) и (17-50) показывает, что ток прямой последовательности при однократной продольной несимметрии можно определять как ток симметричного трехфазного режима в схеме, где несимметричный участок заменен симметричной цепью, величина сопротивлений которой для каждого вида продольной несимметрии определяется сопротивлениями как самого несимметричного участка, так и схем обратной и нулевой последовательностей относительно места несимметрии.

Изложенное положение, представляющее собой по существу правило эквивалентности прямой последовательности при продольной несимметрии, аналогично такому же правилу при поперечной несимметрии (§ 15-5) и позволяет ток прямой последовательности в месте несимметрии выразить в общем виде как

$$j_{L1}^{(n)} = \frac{\dot{E}_\Sigma}{Z_{L1\Sigma} + Z_{\Delta L}^{(n)}}, \quad (17-52)$$

а падение напряжения прямой последовательности на несимметричном участке

$$\Delta \dot{U}_{L1}^{(n)} = Z_{\Delta L}^{(n)} j_{L1}^{(n)}, \quad (17-53)$$

где верхний индекс (n) условно показывает вид рассматриваемой несимметрии [например, (1) — обрыв одной фазы, (2) — обрыв двух фаз, (ДПЗ) — линия «два провода — земля»].

Принципиальная схема рис. 17-13 иллюстрирует два последних выражения.

Следует напомнить, что правило эквивалентности прямой последовательности справедливо при учете только основной гармоники переменных величин.

При внезапном возникновении той или иной продольной несимметрии анализ и расчет переходного процесса можно вести известными методами, используя указанное правило эквивалентности или развернутую комплексную схему замещения для рассматриваемого вида несимметрии. Возникновение продольной несимметрии может сопровождаться как увеличением сопротивления цепи (например, обрывы фаз), так и его уменьшением (например, шунтирование сопротивления в одной или в двух фазах). Для чисто индуктивной цепи в первом случае переходный процесс, очевидно, протекает медленнее, чем во втором. Каких-либо соотношений и неравенств для случаев продольной несимметрии (подобно приведенным в § 15-5) в общем виде установить не представляется возможным. Что касается некоторых частных случаев продольной несимметрии, то здесь можно привести некоторые соотношения. Так, например, постоянная времени затухания свободного переходного тока при обрыве одной фазы всегда меньше, чем при обрыве двух фаз на том же участке схемы. Напротив, шунтирование сопротивлений в двух фазах уменьшит постоянную времени затухания свободного тока больше, чем шунтирование этого сопротивления только в одной фазе.

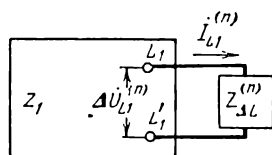


Рис. 17-13. К правилу эквивалентности прямой последовательности при продольной несимметрии.

Пример 17-4. Составить численные выражения, определяющие изменение периодической слагающей тока в здоровых фазах для условий примеров 17-1 и 17-2, т. е. при обрыве одной и при обрыве двух фаз в схеме рис. 17-5,а. Дополнительно известно, что у генератора $x_d = 1,0$ и $E_{q0} = 1,97$, АРВ отключен.

Реактивность прямой последовательности относительно места обрыва при установившемся режиме составляет:

$$x_{dL\gamma} = 1,0 + 0,2 + 0,15 + 0,2 + 1,2 = 2,75.$$

В примерах 17-1 и 17-2 были найдены аналогичная реактивность для начального момента $x'_{dL\gamma} = 2,0$ и дополнительные реактивности $x_{\Delta L}^{(1)} = 0,526$ и $x_{\Delta L}^{(2)} = 2,12$.

Токи прямой последовательности для установившегося режима: после обрыва одной фазы

$$\dot{I}_{LA1}^{(1)} = \frac{j1,97}{j(2,75 + 0,526)} = 0,60;$$

после обрыва двух фаз

$$I_{LA1}^{(2)} = \frac{j1,97}{j(2,75 + 2,12)} = 0,40.$$

Аналогичные значения для начального момента были ранее найдены: $I_{LA1}^{(1)} = 0,565$ и $I_{LA1}^{(2)} = 0,35$.

Постоянные времени затухания свободного переходного тока будут:

при обрыве одной фазы

$$T'_d = T_{f0} \frac{2,0 + 0,526}{2,75 + 0,526} = 0,77T_{f0};$$

при обрыве двух фаз

$$T'_d = T_{f0} \frac{2,0 + 2,12}{2,75 + 2,12} = 0,85T_{f0}.$$

Следовательно, искомые выражения для токов будут:
при обрыве одной фазы

$$I_L^{(1)} = 1,5 \left[(0,565 - 0,60) \cdot e^{-\frac{\tau}{0,77}} + 0,60 \right] = -0,05 \cdot e^{-\frac{\tau}{0,77}} + 0,90;$$

при обрыве двух фаз

$$I_L^{(2)} = 3 \left[(0,35 - 0,40) \cdot e^{-\frac{\tau}{0,85}} + 0,40 \right] = -0,15 \cdot e^{-\frac{\tau}{0,85}} + 1,2,$$

где 1, 5 и 3 — коэффициенты, определяющие суммирование симметричных составляющих токов, и $\tau = t/T_{f0}$.

17-6. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ

Задача нахождения симметричных составляющих токов и напряжений при продольной несимметрии полностью решается на основе комплексной схемы замещения для рассматриваемого вида несимметрии. При этом следует иметь в виду некоторую особенность продольной несимметрии, заключающуюся в том, что если напряжения прямой последовательности по концам несимметричного участка отличаются только по величине, то напряжения обратной и нулевой последовательностей отличаются также и по знаку.

Наглядным примером могут служить эпюры напряжений отдельных последовательностей, показанные на рис. 17-14. Они построены для той же схемы (рис. 17-14,а), которая использована в примерах 17-1 и 17-2.

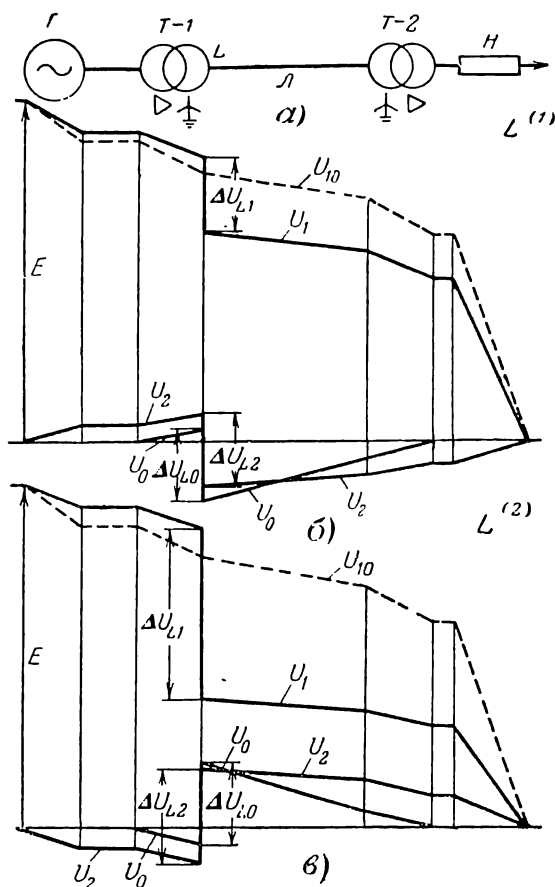


Рис. 17-14. Эпюры напряжений отдельных последовательностей.

a — исходная схема; b — эпюры при обрыве одной фазы линии; $в$ — эпюры при обрыве двух фаз линии.

Пунктиром проведена эпюра напряжений в нормальном режиме данной схемы.

В схеме с односторонним питанием (рис. 17-14, a) при обрыве одной фазы (рис. 17-14, b) напряжение прямой последовательности за местом обрыва значительно выше, чем при обрыве двух фаз (рис. 17-14, $в$). До места обрыва эти напряжения находятся в обратном соотношении,

Напряжения обратной и нулевой последовательностей при обрыве одной и двух фаз по знаку противоположны. По мере удаления от места продольной несимметрии степень искажения векторной диаграммы напряжений снижается, так как возрастает относительное участие составляющей напряжения прямой последовательности, даже при удалении от источника питания, как это видно из эпюр рис. 17-14, б и в. Правда, в последнем случае сами величины напряжений прямой последовательности существенно меньше (особенно при обрыве двух фаз), чем при нормальном режиме.

Если сохраняется предшествующая э. д. с. источника, то напряжения прямой последовательности до места обрыва оказываются, напротив, выше предшествующих.

17-7. ПРИМЕНЕНИЕ ПРИНЦИПА НАЛОЖЕНИЯ

Когда предшествующий режим цепи, где произошел обрыв одной или двух фаз, известен, то определение токов и напряжений после обрыва удобно вести, используя принцип наложения.

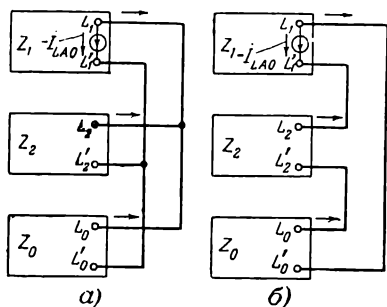


Рис. 17-15. К применению принципа наложения.

а — при обрыве одной фазы; б — при обрыве двух фаз.

В соответствии с последним неполнофазный режим можно представить как результат наложения на предшествующий режим собственно аварийного режима, определяемого при условии, что в месте обрыва введен источник тока ($-I_{LA0}$) и все э. д. с. из схемы исключены.

Применительно к обрыву одной и обрыву двух фаз на рис. 17-15, а и б показаны комплексные

схемы замещения для собственно аварийных режимов. Источник тока включается в место обрыва в схеме прямой последовательности. Нетрудно видеть, что если его закоротить и в схему прямой последовательности ввести э. д. с. E_0 , то для этой схемы будет создан предшествующий режим, при этом составляющих токов обратной и нулевой последовательностей не будет.

Распределение тока, получаемое в схемах обратной и нулевой последовательностей соответствующей комплексной схемы собственно аварийного режима (рис. 17-15) при введении в место обрыва источника тока $-I_{LA0}$, определяет значения токов и напряжений обратной и нулевой последовательностей. Для нахождения токов прямой последовательности в любой ветви нужно полученный для этой ветви собственно аварийный ток прямой последовательности сложить с ее предшествующим током. Аналогично следует поступать при определении напряжений прямой последовательности.

Из указанной формы принципа наложения непосредственно следует: чем больше предшествующий ток в цепи, где в последующем предполагается обрыв неполного числа фаз, тем соответственно больше собственно аварийные составляющие и тем, следовательно, сильнее искажена симметрия токов и напряжений.

Как отмечалось в § 2-7, принцип наложения часто можно применять недостаточно строго, определяя собственно аварийный режим для чисто индуктивной схемы и налагая его затем на предшествующий режим, который соответствует схеме с элементами, выраженными своими полными сопротивлениями. Эта нестрогость обычно приводит к погрешностям, лежащим в допустимых пределах.

Пример 17-5. Решить пример 17-2 с использованием принципа наложения, зная, что предшествующий ток линии составляет $I_{LA0} = 0,715$ (в относительных базисных единицах).

В соответствии с рис. 17-15,б и имея в виду, что $x_{L1\Sigma} = 2,0$, $x_{L2\Sigma} = 1,15$ и $x_{L0\Sigma} = 0,97$, находим собственно аварийные составляющие токов в линии:

$$I_{ав L A1} = (-0,715) \cdot \frac{(1,15 + 0,97)}{2,0 + 1,15 + 0,97} = -0,365;$$

$$I_{LA2} = I_{LA0} = -(-0,715) \cdot \frac{2,0}{2,0 + 1,15 + 0,97} = -0,35.$$

Ток прямой последовательности будет:

$$I_{LA1} = 0,715 - 0,365 = 0,35,$$

и ток в здоровой фазе

$$I_{LA} = 3 \cdot 0,35 = 1,05.$$

Пример 17-6. Для схемы рис. 17-16,а построить векторные диаграммы токов в обеих цепях линии при обрыве фазы А цепи I. Предшествующие фазовые токи каждой цепи линии составляют 305 а.

Генератор: 250 Мва, 13,8 кВ, $x'_d = 0,29$, $x_2 = 0,36$.

Трансформатор Т: 240 Мва, 248/13,8 кВ, $u_k = 14\%$.

Автотрансформатор АТ: 200 Мва, 209/121/11 кВ, $u_{BC} = 9\%$, $u_{BH} = 35\%$, $u_{CH} = 20\%$.

Линия Л: $x_1 = 0,41$ ом/км одной цепи, $x_0 = 3,5x_1$ одной цепи, $x_{1-110} = 2 \cdot 0,41 = 0,82$ ом/км, длина линии 175 км.

Система С — источник бесконечной мощности напряжением 110 кВ.

Соединение обмоток трансформатора и автотрансформатора показано на рис. 17-16,а. Нейтраль системы заземлена наглухо.

Решение проводим по принципу наложения. Комплексная схема для собственно аварийного режима заданной схемы представлена на рис. 17-16,б. Реактивности всех ее элементов выражены в омах и приведены к стороне, где включена линия.

Результирующие реактивности схем отдельных последовательностей составляют:

$$x_{L1\Sigma} = 117,8 \text{ ом}; \quad x_{L2\Sigma} = 119,8 \text{ ом}; \quad x_{L0\Sigma} = 177,3 \text{ ом}.$$

Результирующая реактивность комплексной схемы относительно источника тока

$$x = 117,8 // 119,8 // 177,3 = 44,5 \text{ ом}.$$

Собственно аварийная составляющая тока прямой последовательности в месте обрыва

$$I_{авL1} = -305 \cdot \frac{44,5}{117,8} = -115 \text{ а};$$

составляющие токов обратной и нулевой последовательности в месте обрыва

$$I_{LA2} = -305 \cdot \frac{44,5}{119,8} = -113 \text{ а};$$

$$I_{L0} = -305 \cdot \frac{44,5}{177,3} = -77 \text{ а}.$$

Распределение этих токов в схемах соответствующих последовательностей показано на рис. 17-16,б.

По найденным составляющим токов на рис. 17-16,а построены требуемые векторные диаграммы токов.

17-8. ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. Написать граничные условия для места обрыва одной фазы и установить вытекающие из них соотношения для симметричных составляющих токов и напряжений в этом месте.

2. То же для места обрыва двух фаз в одном и том же месте.

3. Провести решение примера 17-1, считая, что в место обрыва в той же точке L включено активное сопротивление, относительная величина которого при базисных условиях $r=3$.

4. Написать граничные условия для продольной несимметрии, вызванной включением в фазы следующих сопротивлений: $r_A=100 \text{ ом}$, $r_B=200 \text{ ом}$ и $r_C=400 \text{ ом}$. Установить, какие при этом будут соотношения между симметричными составляющими токов и напряжений в месте несимметрии.

5. Генератор через реактор питает асинхронный двигатель, номинальная мощность которого равна номинальной мощности генератора. Произошло металлическое замыкание одной фазы реактора. Определить начальное значение переходного тока в этой фазе, если известно, что генератор имеет $x'_d=0,26$, $x_2=0,37$ и до повреждения реактора работал с номинальной нагрузкой при $\cos \varphi=0,8$; кратность пускового тока двигателя $I_{\text{пуск}}=5$, реактивность реактора $x=12\%$.

6. Для условий примера 17-2 построить векторные диаграммы напряжений на обоих концах линии.

7. Насколько изменится ток в здоровых фазах линии примера 17-1, если разземлить нейтраль одного из трансформаторов?

8. Каковы значения коэффициента несимметрии напряжений у генератора и у нагрузки в условиях примеров 17-1 и 17-2?

9. Написать граничные условия для обоих концов линии передачи «два провода — земля» при учете переходных сопротивлений в точках заземления фазы и установить вытекающие из них соотношения для симметричных составляющих токов и напряжений.

10. Для примера 17-3 установить зависимость коэффициента несимметрии токов в симметричной части схемы от соотношения между x_0 и x_1 линии передачи.

11. Доказать, что комплексная схема замещения рис. 17-11,б при $x_{MN0}=\infty$ переходит в комплексную схему рис. 17-3,б при разомкнутой цепи схемы нулевой последовательности.

12. Построить эпюру напряжений отдельных последовательностей для условий примера 17-3.

13. Составить численные выражения для токов в здоровых фазах примера 17-1 в функции от времени, приняв дополнительные данные из примера 17-4 и считая нейтраль трансформатора $T-2$ разземленной.

14. Генератор через реактивность включен на шины источника бесконечной мощности. Произошло внезапное зашунтирование одной из фаз этой реактивностью. Написать выражение для мгновенного значения тока в этой фазе, имея в виду, что генератор работал с номинальной нагрузкой при $\cos \varphi=0,85$ и его параметры следующие: $x_d=1,0$, $x_q=0,65$, $x'_d=0,3$, $x_2=0,44$, $T_{J0}=5 \text{ сек}$, $I_{\text{нр}}=3,5$, нейтраль не заземлена; реактивность связи с системой, выраженная в относительных единицах при номинальных условиях генератора, составляет $x=0,6$. Изменением угла сдвига между θ , д. с. $E'_d(E_q)$ генератора и напряжением системы пренебречь. Считать, что генератор имеет ионное возбуждение и форсировка возбуждения происходит с постоянной времени $T_e \approx 0$.

15. Как изменится ток в фазе A цепи II линии примера 17-6, если разземлить либо нейтраль трансформатора, либо нейтраль автотрансформатора?

16. Провести решение примера 17-6 для случая обрыва двух фаз цепи I в одной и той же точке.

17. Построить векторные диаграммы напряжений на обоих концах линии примера 17-6.

18. Определить напряжение оборванной фазы линии примера 17-6 у места обрыва и в конце линии.

19. Считая E'_{q0} генератора постоянной по величине, определить для условий примера 17-6 ток фазы A (поврежденной) цепи II с учетом наибольшего изменения угла δ' между E'_{q0} и напряжением системы U_c . До обрыва фазы передаваемая мощность на приемном конце системы передачи (т. е. за автотрансформатором AT) составляла 200 Мвт при $\cos \varphi = 1$.

20. К шинам источника бесконечной мощности, на которых поддерживается синусоидальное напряжение 10 кВ , подключен потребитель мощностью 10 Мвт при $\cos \varphi = 1$. Его питание осуществляется через два кабеля марки АСХ240 длиной $1,5 \text{ км}$. Нейтраль системы не заземлена. Определить ток нулевой последовательности в кабелях при обрыве у одного из них одной фазы. Параметры кабеля: $x_1 = 0,07 \text{ ом/км}$, $r_1 = 0,13 \text{ ом/км}$, $x_0 = 4,5 x_1$, $r_0 = 0,30 \text{ ом/км}$. Кабели включены параллельно. Для нагрузки принять $Z_1 = Z_2$.

ГЛАВА ВОСЕМНАДЦАТАЯ

СЛОЖНЫЕ ВИДЫ ПОВРЕЖДЕНИЙ

18-1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

В § 1-1 отмечалось, что сложные виды повреждений представляют собой совокупность нескольких несимметричных замыканий или нарушений продольной симметрии отдельных участков системы. Возможны случаи, когда в нескольких точках имеют место не только или поперечная или продольная несимметрия, но также одновременно оба вида несимметрии в различных комбинациях.

Практический интерес обычно представляет одновременное нарушение симметрии лишь в двух точках системы, так как более сложные повреждения являются редкими исключениями. Поэтому в дальнейшем ограничимся рассмотрением лишь двухкратной несимметрии. При этом будем считать, что обе несимметрии возникают одновременно, хотя в действительности они могут следовать одна за другой (это дополнительно усложняет

расчеты необходимо учесть для второй во времени несимметрии необычных начальных условий).

Исследованию сложных видов повреждений, проведенному в течение последних 10—15 лет, посвящена весьма обширная литература [Л. 117—140]. Ниже дано изложение лишь основных принципов расчета таких повреждений. Их конкретное применение показано на двух наиболее часто встречающихся случаях, а именно: при двойных замыканиях на землю в системе с изолированной нейтралью и при однофазном коротком замыкании с одновременным обрывом фазы.

18.2. ОБЩИЙ ПУТЬ РЕШЕНИЯ

Расчет любого сложного вида повреждения, равно как и однократной несимметрии, целесообразно вести с применением теории симметричных составляющих. При принятых в § 2-1 допущениях такой расчет представляет собой решение задачи линейной цепи.

Как известно, любая несимметрия в полной мере характеризуется симметричными составляющими токов и напряжений в месте этой несимметрии. Следовательно, при двухкратной несимметрии подлежат определению двенадцать неизвестных величин, а именно: по три симметричных составляющих токов и напряжений в каждой точке несимметрии. Для определения этих неизвестных, очевидно, нужно составить такое же число независимых уравнений.

В гл. 15 и 17 было установлено, что из граничных условий возникшей несимметрии непосредственно вытекают три соотношения для симметричных составляющих токов и напряжений в месте данной несимметрии. Таким образом, при двухкратной несимметрии половина общего числа необходимых уравнений является следствием граничных условий. Остальные уравнения также нетрудно получить, рассматривая связи между токами и напряжениями одноименной последовательности. Так, при поперечных несимметриях одновременно в произвольных точках M и N заданной системы схемы отдельных последовательностей, которые после преобразований (§ 2-6) имеют элементарный вид (рис. 18-1), для составляющих напряжений в точках несимметрии можно написать:

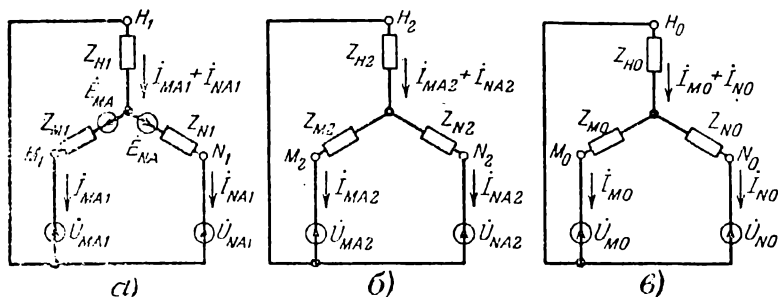


Рис. 18-1. Элементарные схемы прямой (а), обратной (б) и нулевой (в) последовательностей при несимметричных коротких замыканиях одновременно в двух точках (М и N).

для прямой последовательности (рис. 18-1,а)

$$\dot{U}_{MA1} = \dot{E}_{MA} - \dot{I}_{MA1}(Z_{M1} + Z_{H1}) - \dot{I}_{NA1}Z_{H1}; \quad (18-1)$$

$$\dot{U}_{NA1} = \dot{E}_{NA} - \dot{I}_{MA1}Z_{H1} - \dot{I}_{NA1}(Z_{N1} + Z_{H1}); \quad (18-2)$$

для обратной последовательности (рис. 18-1,б)

$$\dot{U}_{MA2} = -\dot{I}_{MA2}(Z_{M2} + Z_{H2}) - \dot{I}_{NA2}Z_{H2}; \quad (18-3)$$

$$\dot{U}_{NA2} = -\dot{I}_{MA2}Z_{H2} - \dot{I}_{NA2}(Z_{N2} + Z_{H2}); \quad (18-4)$$

для нулевой последовательности (рис. 18-1,в)

$$\dot{U}_{M0} = -\dot{I}_{M0}(Z_{M0} + Z_{H0}) - \dot{I}_{N0}Z_{H0}; \quad (18-5)$$

$$\dot{U}_{N0} = -\dot{I}_{M0}Z_{H0} - \dot{I}_{N0}(Z_{N0} + Z_{H0}). \quad (18-6)$$

Такую форму записи уравнений называют формой Z. Их можно представить также в форме Y, т. е. выразить симметричные составляющие токов через э. д. с., напряжения и проводимости элементов схем отдельных последовательностей. Для каждого конкретного случая сложной несимметрии используют ту форму записи, которая дает наиболее простой и удобный путь решения. Иногда представляется целесообразным одновременное применение обеих форм записи или одной из смешанных форм, как, например, форма четырехполюсника.

Дальнейший расчет двухкратной несимметрии по существу сводится к решению системы 12 линейных урав-

нений. Оно может быть выполнено различными известными способами и, в частности, с применением матричной алгебры.

Используя уравнения (18-3) — (18-6) и уравнения, вытекающие из граничных условий, можно получить два уравнения, характеризующие дополнительную связь между токами и напряжениями прямой последовательности в точках несимметрии. В форме Z эти уравнения имеют вид:

$$\dot{U}_{MA1} = k \dot{I}_{MA1} + m \dot{I}_{NA1}; \quad (18-7)$$

$$\dot{U}_{NA1} = n \dot{I}_{MA1} + l \dot{I}_{NA1}, \quad (18-8)$$

где k, l, m, n — коэффициенты, величины которых для каждого вида сложной несимметрии определяются параметрами схем обратной и нулевой последовательностей.

Следовательно, как только найдены эти коэффициенты, задача определения токов и напряжений в местах несимметрии сводится к решению системы из четырех уравнений [т. е. (18-1), (18-2), (18-7) и (18-8)], что, конечно, значительно проще.

По структуре (18-7) и (18-8) видно, что m и n можно рассматривать как взаимные сопротивления между точками M_1 и N_1 . Однако при этом принцип взаимности в общем случае не соблюдается, т. е. $m \neq n$. Это исключает возможность составления по (18-7) и (18-8) эквивалентной схемы без включения в нее дополнительного источника.

В самом деле, если в соответствии с предложением Э. Кларк [Л. 117] уравнения (18-7) и (18-8) переписать в ином виде:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{MA1} = & (k - n) \dot{I}_{MA1} + \left(\frac{m + n}{2} \right) (\dot{I}_{MA1} + \dot{I}_{NA1}) + \\ & + \left(\frac{m - n}{2} \right) (\dot{I}_{NA1} - \dot{I}_{MA1}); \end{aligned} \quad (18-9)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{NA1} = & (l - m) \dot{I}_{NA1} + \left(\frac{m + n}{2} \right) (\dot{I}_{MA1} + \dot{I}_{NA1}) + \\ & + \left(\frac{m - n}{2} \right) (\dot{I}_{NA1} - \dot{I}_{MA1}), \end{aligned} \quad (18-10)$$

то нетрудно убедиться, что им удовлетворяет эквивалентная схема, присоединенная к схеме прямой последовательности на рис. 18-2. В ней параллельно с сопротивлением $\frac{m-n}{2}$ включен такой дополнительный источник,

чтобы проходящий через него ток был равен $2I_{MA1}$. Эту схему назовем производной схемой прямой последовательности. Присоединение ее к точкам M_1 и N_1 основной схемы прямой последовательности исключает из последней приложенные напряжения U_{MA1} и U_{NA1} .

В частных случаях при $m=n$ в приближенных решениях, когда практически принимают $m \approx n$, эквивалентная схема рис. 18-2 значительно упрощается. При этом, как видно, отпадает дополнительный источник и определение тока прямой последовательности при двукратной несимметрии сводится к определению тока при трехфазном коротком замыкании в точке G , связанной с точками M_1 и N_1 трехлучевой схемой.

Таким образом, использование производной схемы прямой последовательности позволяет распространить известное правило эквивалентности прямой последовательности (§ 15-5, 17-5) на случаи одновременной несимметрии в двух точках¹. Соответственно этому для их расчета могут применяться все изложенные ранее практические методы.

По найденным величинам токов и напряжений прямой последовательности уже не представляет труда определить значения токов и напряжений других последовательностей, используя граничные условия и уравнения (18-3) — (18-6).

Дальнейшее нахождение распределения токов и напряжений в схемах отдельных последовательностей выполняют обычными приемами. Для этой цели часто бы-

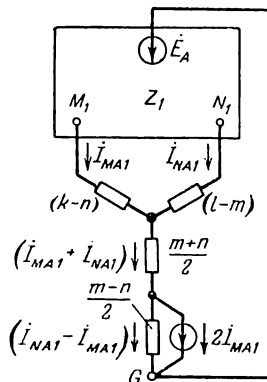


Рис. 18-2. Эквивалентная схема прямой последовательности при поперечной несимметрии одновременно в двух точках.

¹ Ограничиваясь учетом лишь основных гармоник токов и напряжений.

вадет полезным применение принципа наложения, в соответствии с которым токи и напряжения каждой последовательности могут быть получены суммированием токов и напряжений той же последовательности, определяемых из нескольких элементарных режимов схем соответствующей последовательности.

Так, для произвольного участка α ток прямой последовательности можно выразить суммой

$$I_{\alpha 1} = I_{\alpha}^{(H)} + I_{\alpha 1}^{(M_1)} + I_{\alpha 1}^{(N_1)}, \quad (18-11)$$

где $I_{\alpha}^{(H)}$ — ток, проходящий по данному участку при отсутствии обеих несимметрий;

$I_{\alpha 1}^{(M_1)}$ — ток на том же участке при условном режиме „ M_1 “, т. е. когда отсутствуют э. д. с. источников и несимметрия в точке N , а в точке M_1 приложен источник уже известного тока I_{M1} ;

$I_{\alpha 1}^{(N_1)}$ — то же при аналогичном условном режиме „ N_1 “.

Аналогичным образом можно представить напряжение прямой последовательности в произвольной точке β , т. е.

$$\dot{U}_{\beta 1} = \dot{U}_{\beta}^{(H)} + \dot{U}_{\beta 1}^{(M_1)} + \dot{U}_{\beta 1}^{(N_1)}, \quad (18-12)$$

где отдельные слагаемые представляют значения напряжения в этой точке при указанных выше режимах.

Для токов и напряжений обратной и нулевой последовательностей выражения подобны (18-11) и (18-12), если в них исключить первые слагаемые.

Следует отметить, что при суммировании составляющих токов отдельных последовательностей должны быть учтены их направления в соответствии с принятым положительным направлением тока в каждой ветви схемы.

Значительные упрощения в нахождении токораспределения получаются в тех случаях, когда параметры схем прямой и обратной последовательностей полностью одинаковы, что часто принимают в практических расчетах.

18-3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ

Ранее было показано (§ 15-6, 17-2—17-4), что при однократной несимметрии схемы отдельных последовательностей могут быть в соответствии с граничными

условиями соединены по месту несимметрии в комплексную схему замещения. При многократной несимметрии такое объединение схем отдельных последовательностей по каждому месту несимметрии, как правило, уже недопустимо, так как при этом возникают электрические связи, нарушающие истинное токораспределение в схе-

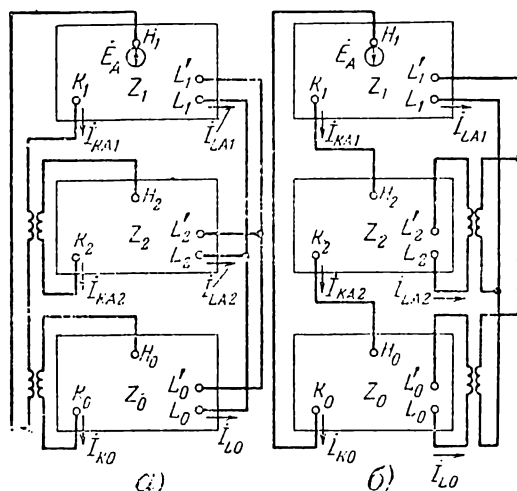


Рис. 18-3. Комплексная схема для однофазного короткого замыкания с одновременным обрывом одной фазы.

а — непосредственное соединение по месту обрыва; *б* — то же по месту короткого замыкания.

ме. Чтобы исключить последние, нужно схемы отдельных последовательностей соединить непосредственно (электрически) лишь по какой-либо одной точке несимметрии, а по остальным точкам несимметрии соединение выполнить через промежуточные трансформаторы.

В качестве примера на рис. 18-3 показана такая комплексная схема, выполненная в двух вариантах для случая однофазного короткого замыкания в точке *K* с одновременным обрывом одной фазы в точке *L*. Варианты, как правило, отличаются переменной характера соединений в точках несимметрии.

Такого типа комплексные схемы могут быть использованы на расчетных моделях (столах) переменного тока, причем условием применения для связей обычных

трансформаторов является очевидное требование, чтобы особые фазы в каждом месте несимметрии в приведенной (к одной ступени напряжения) схеме были одинаковы, так как в противном случае для соблюдения граничных условий нужно еще обеспечить соответствующие угловые сдвиги токов и напряжений отдельных последовательностей. С другой стороны для уменьшения погрешностей от введения промежуточных трансформаторов последние должны обладать ничтожным рассеянием, и напротив, очень большим сопротивлением намагничивания. В силу указанных ограничений комплексные схемы с промежуточными трансформаторами на практике почти не применяют.

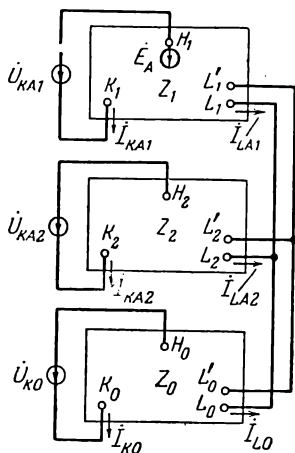


Рис. 18-4. Комплексная схема для однофазного короткого замыкания с одновременным обрывом одной фазы (в месте короткого приложены напряжения отдельных последовательностей).

Здесь уместно отметить, что весьма эффективным и перспективным является использование элементов математических машин, которые позволяют практически создать комплексную схему для любой многократной несимметрии; при этом обеспечивается строгое соблюдение всех граничных условий.

Для образования комплексной схемы замещения, вообще говоря, достаточно непосредственно

соединить схемы отдельных последовательностей по одной из точек несимметрии, а во всех остальных точках несимметрии вместо трансформаторных связей ввести напряжения соответствующих последовательностей, значения которых подлежат определению. Практический смысл такого соединения по существу заключается в исключении соответствующих граничных условий и тем самым сокращении числа неизвестных, что в известной мере упрощает дальнейшее решение.

Пример подобной комплексной схемы замещения для тех же условий, что и схема рис. 18-3, приведен на рис. 18-4, где соединение выполнено по месту обрыва. Число

Неизвестных от такого соединения сократилось вдвое. Для их нахождения следует использовать граничные условия для места короткого замыкания и уравнения связи между токами и напряжениями каждой последовательности в месте короткого, причем эти уравнения теперь должны быть составлены уже на основе комплексной схемы замещения рис. 18-4.

Выполнение расчета с использованием комплексной схемы замещения, составленной по одной из точек несимметрии, можно существенно упростить, применяя в различных модификациях принцип наложения. Подробные указания по этому вопросу изложены в специальной литературе [Л. 126, 127, 109, 29].

18-4. ДВОЙНОЕ ЗАМЫКАНИЕ НА ЗЕМЛЮ

Рассмотрим случай двойного замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью или с нейтралью, заземленной через дугогасящие устройства (т. е. в компенсированной сети).

Пусть в произвольной точке M сети произошло замыкание на землю фазы B и одновременно в другой точке N — замыкание на землю фазы C (рис. 18-5). Как общий случай примем, что замыкания произошли через сопротивления дуг соответственно $r_{дМ}$ и $r_{дN}$.

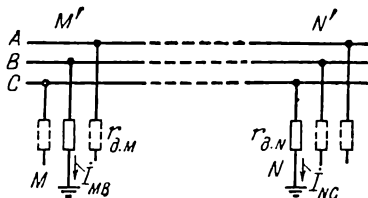


Рис. 18-5. Двойное замыкание на землю.

Аналогично тому, как и в § 15-3, для граничных условий в обеих точках замыкания имеем:

$$I_{MA} = 0; \quad (18-13)$$

$$I_{MC} = 0; \quad (18-14)$$

$$\dot{U}_{MB} = 0; \quad (18-15)$$

$$\dot{U}_{M'B} = r_{дМ} I_{MB}; \quad (18-15a)$$

$$I_{NA} = 0; \quad (18-16)$$

$$I_{NB} = 0; \quad (18-17)$$

$$\dot{U}_{NC} = 0; \quad (18-18)$$

$$\dot{U}_{N'C} = r_{дN} I_{NC}. \quad (18-18a)$$

Дополнительным условием данного вида повреждения, очевидно, является равенство

$$\dot{I}_{MB} = -\dot{I}_{NC} \quad (18-19)$$

Приняв неповрежденную (особую) фазу A за основную, запишем через симметричные составляющие

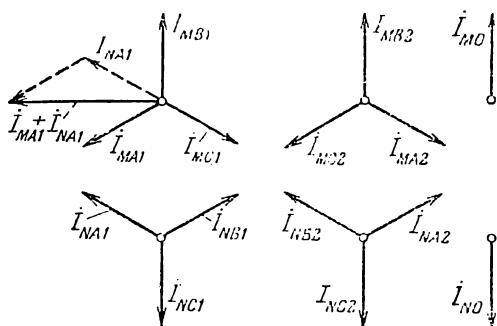


Рис. 18-6. Симметричные составляющие токов в ответвлениях двойного замыкания на землю.

следствия, которые вытекают из этих граничных условий (§ 15-3):

$$\dot{I}_{MB2} = \dot{I}_{MB1} \quad \text{или} \quad \dot{I}_{MA2} = a \dot{I}_{MA1}; \quad (18-20)$$

$$\dot{I}_{M0} = \dot{I}_{MB1} \quad \text{или} \quad \dot{I}_{M0} = a^2 \dot{I}_{MA1}; \quad (18-21)$$

$$\dot{U}_{M'B1} + \dot{U}_{M'B2} + \dot{U}_{M'0} = 3r_{\lambda M} \dot{I}_{MB1}$$

или

$$a^2 \dot{U}_{M'A1} + a \dot{U}_{M'A2} + \dot{U}_{M'0} = 3r_{\lambda M} a^2 \dot{I}_{MA1}; \quad (18-22)$$

$$\dot{I}_{NC2} = \dot{I}_{NC1} \quad \text{или} \quad \dot{I}_{NA2} = a^2 \dot{I}_{NA1}; \quad (18-23)$$

$$\dot{I}_{N0} = \dot{I}_{NC1} \quad \text{или} \quad \dot{I}_{N0} = a \dot{I}_{NA1}; \quad (18-24)$$

$$\dot{U}_{N'C1} + \dot{U}_{N'C2} + \dot{U}_{N'0} = 3r_{\lambda N} \dot{I}_{NC1}$$

или

$$a \dot{U}_{N'A1} + a^2 \dot{U}_{N'A2} + \dot{U}_{N'0} = 3r_{\lambda N} a \dot{I}_{NA1} \quad (18-25)$$

и, наконец, из (18-19) в соответствии с (18-20), (18-21), (18-23) и (18-24)

$$\dot{I}_{NA1} = -a \dot{I}_{MA1}. \quad (18-26)$$

Последнее равенство показывает, что симметричные составляющие токов в обоих местах замыкания не являются независимыми переменными, а, напротив, находятся в жесткой связи между собой. Она наглядно иллюстрируется векторными диаграммами рис. 18-6.

Элементарные схемы отдельных последовательностей для рассматриваемого случая приведены на рис. 18-7.

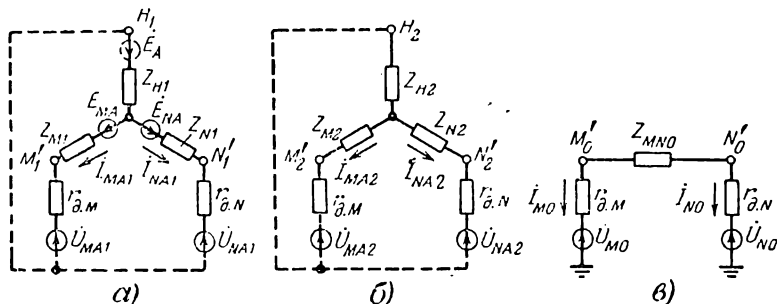


Рис. 18-7. Элементарные схемы прямой (а), обратной (б) и нулевой (в) последовательностей при двойном замыкании на землю.

Уравнения связи между токами и напряжениями прямой и обратной последовательностей в точках M' и N' (рис. 18-5) сохраняют тот же вид, что и уравнения (18-1) — (18-4). Для схемы нулевой последовательности (рис. 18-7, в), очевидно, имеем лишь одно уравнение:

$$\dot{U}_{N'0} - \dot{U}_{M'0} = \dot{I}_{M0} Z_{MN0}. \quad (18-27)$$

Благодаря простоте соотношений, вытекающих из граничных условий, решение полученной системы 12 уравнений не представляет труда. После замены всех неизвестных, например, через ток $\dot{I}_{MA1}$ для определения последнего получаем следующее выражение:

$$\dot{I}_{MA1} = \frac{\dot{E}_{MA} - a^2 \dot{E}_{NA}}{3Z_{H1} + Z_{M1} + Z_{N1} + Z_D}; \quad (18-28)$$

где

$$Z_D = 3Z_{H2} + Z_{M2} + Z_{N2} + Z_{MN0} + 3r_{dM} + 3r_{dN}. \quad (18-29)$$

Для тока в поврежденных фазах и точках замыкания, очевидно, имеем:

$$\dot{I}_{MB} = 3a^2 \dot{I}_{MA1} = -\dot{I}_{NC}. \quad (18-30)$$

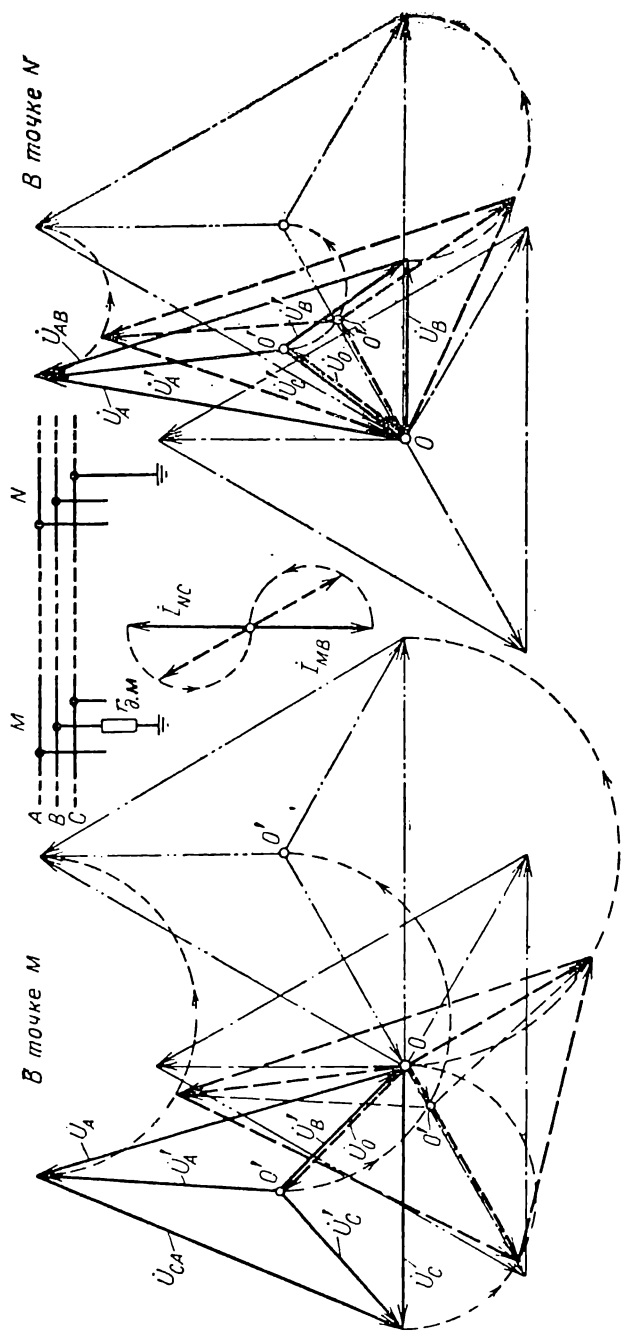


Рис. 18-8. Векторные диаграммы токов и напряжений в местах двойного замыкания на землю.

Выражения для симметричных составляющих напряжений в точках M' и N' обычно удобнее представить через ток $\dot{I}_{M0}$ (или $\dot{I}_{N0} = -\dot{I}_{M0}$). При этом они приобретают следующий вид:

$$\dot{U}_{M'A1} = \dot{E}_{MA} - \dot{I}_{M0} [(a - a^2) Z_{H1} + a Z_{M1}]; \quad (18-31)$$

$$\dot{U}_{M'A2} = -\dot{I}_{M0} [(a^2 - a) Z_{H2} + a^2 Z_{M2}]; \quad (18-32)$$

$$\dot{U}_{M'0} = 3\dot{I}_{M0} r_{DM} - (a^2 \dot{U}_{M'A1} + a \dot{U}_{M'A2}); \quad (18-33)$$

$$\dot{U}_{N'A1} = \dot{E}_{NA} - \dot{I}_{M0} [(a - a^2) Z_{H1} - a^2 Z_{N1}]; \quad (18-34)$$

$$\dot{U}_{N'A2} = -\dot{I}_{M0} [(a^2 - a) Z_{H2} - a Z_{N2}]; \quad (18-35)$$

$$\dot{U}_{N'0} = -3\dot{I}_{M0} r_{DN} - (a \dot{U}_{N'A1} + a^2 \dot{U}_{N'A2}). \quad (18-36)$$

На рис. 18-8 приведены векторные диаграммы токов и напряжений в местах двойного замыкания на землю. Они построены при условии, что фаза B в точке M замкнута через активное сопротивление r_{DM} , а фаза C в точке N — наглухо, при этом все остальные элементы схемы чисто индуктивные. При изменении r_{DM} концы векторов скользят по дугам соответствующих окружностей. Стрелки показывают направление их перемещения с ростом r_{DM} от нуля до бесконечности. В последнем слу-

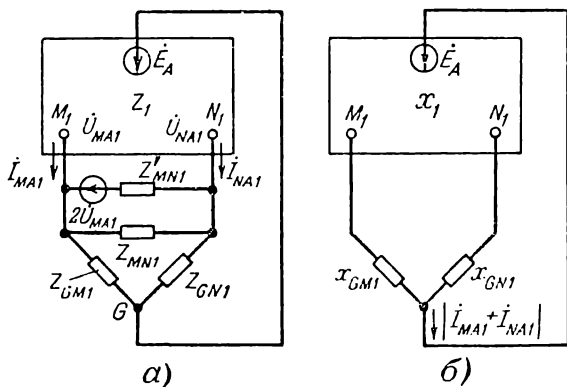


Рис. 18-9. Производная схема прямой последовательности для двойного замыкания на землю.

a — точная; b — приближенная.

чае данный вид повреждения очевидно переходит в простое замыкание одной фазы на землю (§ 15-11).

Для рассматриваемой двухкратной несимметрии можно составить производную схему прямой последовательности [Л. 122]. В строгом выполнении она показана на рис. 18-9,а*. Она содержит дополнительный источник, э. д. с. которого равна $2\dot{U}_{MA1}$ и ее элементы имеют следующие сопротивления:

$$\left. \begin{aligned} Z_{GM1} &= \frac{1}{1-a} Z_D; \\ Z_{GN1} &= \frac{1}{1-a^2} Z_D; \\ Z_{MN1} &= -\frac{1}{2} Z_D; \\ Z'_{MN1} &= j \frac{2}{\sqrt{3}} Z_D, \end{aligned} \right\} \quad (18-37)$$

где Z_D определяется по (18-29).

Выражения (18-37) показывают, что даже при чисто индуктивной исходной схеме производная схема прямой последовательности все равно содержит активные сопротивления. Это обусловлено тем, что согласно (18-26) в схеме должен быть создан постоянный угловой сдвиг между токами $\dot{I}_{MA1}$ и $\dot{I}_{NA1}$.

В таком виде производная схема практически не используется. При пренебрежении активными сопротивлениями в исходной схеме можно пойти на решительное упрощение производной схемы прямой последовательности. С этой целью исключают ее поперечные связи Z_{MN1} и Z'_{MN1} , а в сопротивлениях Z_{GM1} и Z_{GN1} сохраняют только их реактивную часть, которая получается равной

$$x_{GM1} = x_{GN1} = \frac{2}{3} (3x_{H2} + x_{M2} + x_{L2} + x_{MN0}). \quad (18-38)$$

Таким образом, приближенная производная схема прямой последовательности очень проста (рис. 18-9,б). При

* Она отличается от схемы рис. 18-2, так как последняя при отсутствии заземленной нейтрали ($Z_{H0} = \infty$) непригодна из-за того, что параметры ее элементов в этом случае становятся неопределенными.

этом следует иметь в виду, что поскольку в ней уже отсутствует сдвиг между токами I_{AI1} и I_{NI1} , она позволяет найти приближенное значение лишь модуля суммы этих токов. По нему затем легко определить модули токов в каждом месте двойного замыкания, так как в соответствии с рис. 18-6 имеем:

$$I_{M1} = I_{N1} = \frac{|I_{AI1} + I_{NI1}|}{\sqrt{3}}. \quad (18-39)$$

Чтобы иметь представление о порядке погрешности, которую вносит приближенная производная схема прямой последовательности, на рис. 18-10 приведены кривые изменения этой погрешности в определении величины тока двойного замыкания на землю. Кривые построены для разных соотношений параметров исходной принципиальной схемы с двухсторонним питанием.

Как видно, чем симметричнее расположены источники относительно точек M и N , тем меньше ошибка. Так, при полной симметрии ($a = \frac{x_{HN1}}{x_{HM1}} = 1$) она не превышает 3%. При максимальной асимметрии ($a = 0$ или $a = \infty$), т. е. когда имеет место одностороннее питание, эта ошибка стремится в пределе к 7,5%. Отметим, что с уменьшением отношения x_{MN0}/x_{MN1} рассматриваемая ошибка возрастает. Однако даже при $x_{MN0}/x_{MN1} = 1$ она в пределе достигает лишь 15%.

Следовательно, в реальных условиях воздушной или кабельной сети погрешность от применения приближенной производной схемы прямой последовательности для случая двойного замыкания на землю лежит в допустимых пределах, и если не требуется учет активных сопротивлений, то эта схема является вполне пригодной.

Когда схемы прямой и обратной последовательностей одинаковы, нахождение распределения токов и напряжений можно выполнить проще, чем указывалось в § 18-2. Поскольку при этом условия режимы « M_1 » и « M_2 », равно как и режимы « N_1 » и « N_2 », совершенно одинаковы, то целесообразно находить сразу сумму токов прямой и обратной последовательностей. Учитывая соотношения между симметричными составляющими в местах замыкания (рис. 18-6), для суммы этих токов в каждой фазе произвольного участка α легко получить следующие выражения:

$$I_{\alpha A12} = I_{\alpha A}^{(II)} - (C_{\alpha}^{(M)} - C_{\alpha}^{(N)}) I_{M0}; \quad (18-40)$$

$$I_{\alpha B12} = I_{\alpha B}^{(II)} + (2C_{\alpha}^{(M)} + C_{\alpha}^{(N)}) I_{M0}; \quad (18-41)$$

$$I_{\alpha C12} = I_{\alpha C}^{(II)} - (C_{\alpha}^{(M)} + 2C_{\alpha}^{(N)}) I_{M0}, \quad (18-42)$$

где $I_{\alpha}^{(II)}$ — ток на данном участке при отсутствии двойного замыкания;

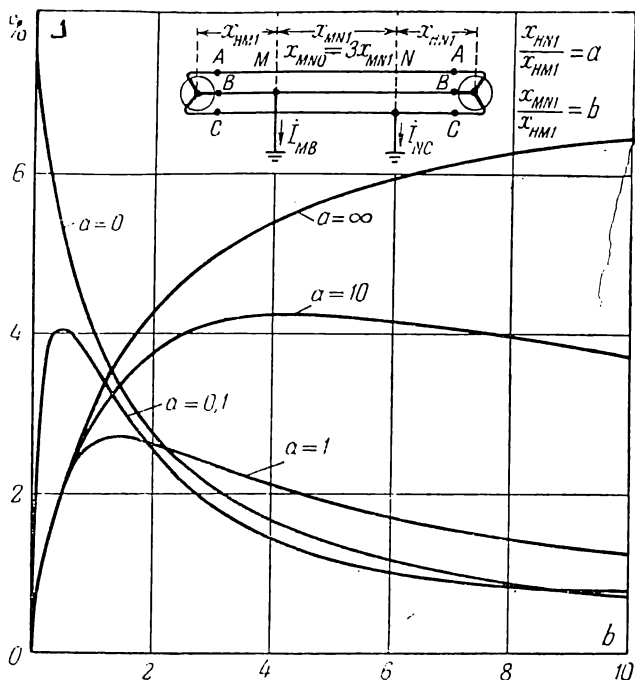


Рис. 18-10. Кривые изменения погрешностей в токе двойного замыкания на землю при расчете с помощью приближенной производной схемы прямой последовательности.

$C_{\alpha}^{(M)}$ — коэффициент распределения для участка α , найденный при отсутствии э. д. с. источников и замыкания в N и прохождении единичного тока в месте замыкания M ;
 $C_{\alpha}^{(N)}$ — то же, но при отсутствии замыкания в точке M .

Соответственно сумма напряжений прямой и обратной последовательностей в каждой фазе любой точки β определяется как

$$\dot{U}_{\beta 12} = \dot{U}_{\beta}^{(H)} + 2(\dot{U}_{\beta}^{(M)} + \dot{U}_{\beta}^{(N)}), \quad (18-43)$$

где $\dot{U}_{\beta}^{(H)}$ — напряжение данной точки при отсутствии двойного замыкания;
 $\dot{U}_{\beta}^{(M)}$ и $\dot{U}_{\beta}^{(N)}$ — напряжения точки β , найденные в режимах „ M^a “ и „ N^a “.

Дальнейшее суммирование с составляющими нулевой последовательности дает значения искоемых фазных величин.

Пример 18-1. Для элементарной схемы рис. 18-11,а провести сравнение токов и напряжений генератора при двойном замыкании

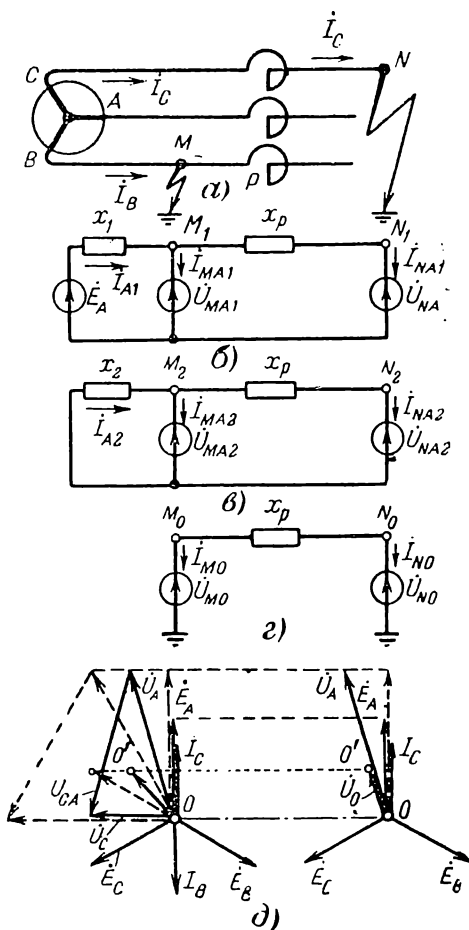


Рис. 18-11. К примеру 18-1.

а — исходная схема; б, в и г — соответственно схемы прямой, обратной и нулевой последовательностей; д — векторные диаграммы токов и напряжений.

на землю в точках M и N с соответствующими величинами при трехфазном коротком замыкании в точке N . В выкладках принять для генератора $x_2 = x_1$ и э. д. с. $\dot{E}_A = jE$, для реактора $x_{P1} = x_{P2} = x_{P0} = x_P$.

В данном случае реактивности схем рис. 118-11,б — будут: $x_{L1} = x_{L2} = x_1$, $x_{M1} = x_{M2} = 0$, $x_{N1} = x_{N2} = x_{MN0} = x_P$, и в соответствии с (18-28) для тока прямой последовательности генератора имеем:

$$I_{A1} = \frac{\dot{E}_A}{j(2x_1 + x_P)} = -I_{A2}$$

и для модуля тока в поврежденной фазе генератора

$$I^{(1-1)} = \frac{\sqrt{3} E}{2x_1 + x_P}.$$

При трехфазном коротком замыкании в точке N

$$I^{(3)} = \frac{E}{x_1 + x_P}.$$

Отношение токов сравниваемых видов короткого замыкания

$$\frac{I^{(1-1)}}{I^{(3)}} = \frac{\sqrt{3}(x_1 + x_P)}{2x_1 + x_P} = \frac{\sqrt{3}(1+n)}{2+n},$$

где $n = \frac{x_P}{x_1}$.

Легко установить, что при $n = 0,37$ токи $I^{(1-1)} = I^{(3)}$, при $n > 0,37$ ток $I^{(1-1)} > I^{(3)}$ и при $n < 0,37$ ток $I^{(1-1)} < I^{(3)}$.

Следует отметить, что при рассматриваемых условиях вычисление тока при двойном замыкании на землю аналогично двухфазному короткому замыканию через реактивность одной фазы реактора.

Согласно схеме рис. 118-11,б напряжение прямой последовательности в точке N будет:

$$\dot{U}_{NA1} = \dot{E}_A - I_{A1} j x_1 - I_{NA1} j x_P,$$

или, имея в виду, что $I_{NA1} = \frac{I_{A1}}{(1-a^2)}$, после преобразований получим:

$$\dot{U}_{NA1} = \frac{\dot{E}_A}{2+n} \left(1 + \frac{n}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{6} n \right).$$

По условию $\dot{U}_{NC} = 0$. С другой стороны, поскольку взаимной индукции между фазами реактора нет, то $\dot{U}_{NB} = 0$. Следовательно,

$$\dot{U}_{NA2} = \dot{U}_{N0} = \dot{U}_{NA1}$$

и

$$\dot{U}_{NA} = 3\dot{U}_{NA1};$$

скалярная величина этого напряжения будет:

$$U_{NA} = \frac{3E}{2+n} \sqrt{1+n+\frac{n^2}{3}}.$$

Аналогично находим симметричные составляющие напряжений в точке M :

$$\dot{U}_{MA1} = \frac{\dot{E}_A(1+n)}{2+n};$$

$$\dot{U}_{MA2} = \frac{\dot{E}_A}{2+n};$$

$$\dot{U}_{M0} = \frac{\dot{E}_A}{2+n} \left(1 + \frac{n}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} n \right)$$

и по ним величины фазных напряжений:

$$\dot{U}_{MA} = \frac{3\dot{E}_A}{2+n} \left(1 + \frac{n}{2} + j \frac{n}{2\sqrt{3}} \right); \quad U_{MA} = \frac{3E}{2+n} \sqrt{1+n+\frac{n^2}{3}} = U_{NA};$$

$$\dot{U}_{MB} = 0 \quad \text{и} \quad \dot{U}_{MC} = j \frac{\sqrt{3}\dot{E}_A n}{2+n}.$$

Отношение напряжений прямой последовательности генератора (т. е. в точке M) при сравниваемых видах короткого замыкания будет:

$$\frac{U_{M1}^{(1-1)}}{U_{M1}^{(3)}} = \frac{n}{2+n},$$

откуда следует, что остаточное напряжение прямой последовательности на шинах при трехфазном коротком замыкании за реактором всегда больше, чем при двойном замыкании на землю (рис. 18-11, а).

На рис. 18-11, б приведены векторные диаграммы токов и напряжений при двойном замыкании на землю в рассматриваемых условиях. Сплошные векторы построены при $n=2$. Пунктиром показаны векторы напряжений при $n=0$ и $n=\infty$. Наименьшая величина напряжения имеет место, естественно, при $n=0$ (т. е. $x_P=0$), а наибольшая — при $n=\infty$ ($x_P=\infty$), когда двойное короткое замыкание переходит в простое замыкание одной фазы в точке M . Геометрическими местами концов векторов напряжений $\dot{U}_A$, $\dot{U}_B$ и $\dot{U}_C$ являются, как видно, соответствующие прямые (при чисто индуктивной цепи).

Пример 18-2. При металлическом двойном замыкании на землю в точках M и N схемы рис. 18-12, а построить векторные диаграммы токов в линиях и напряжений в точках M , P и N . Построение произвести для начального момента замыкания, считая, что генератор работал на холостом ходу при $U=10,5$ кВ и напряжение системы рав-

но 115 кв. Исходные данные приведены на рис. 18-12,а. Для линий принять $x_1=0,4$ ом/км и реактивности нулевой последовательности: для Л-1 и Л-3 $x_0=2x_1$, для Л-2 $x_0=2,6 x_1$.

Расчет проведем в относительных единицах при $S_6=100$ Мва и $U_6=U_{ср.}$

Схемы замещения прямой и нулевой последовательностей, где сопротивления всех элементов выражены в относительных единицах при базисных условиях, показаны на рис. 18-12,б и г. Для приведе-

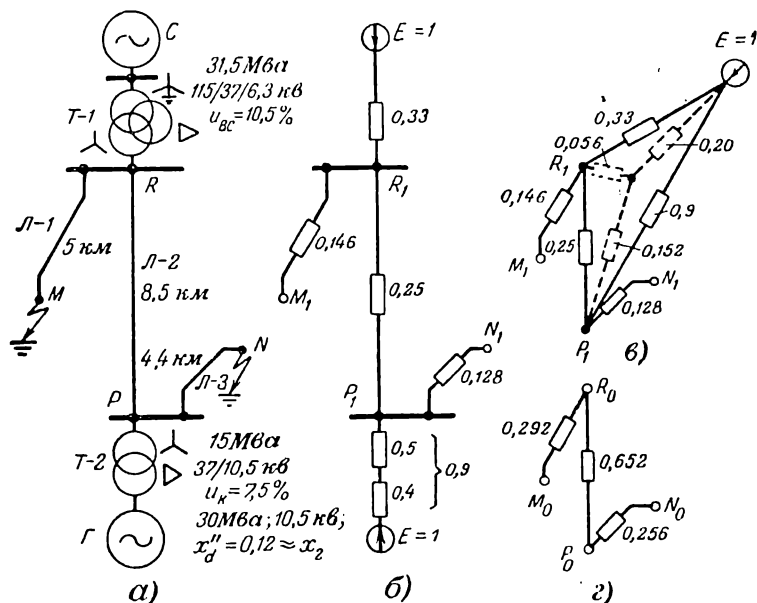


Рис. 18-12. К примеру 18-2.

а — исходная схема; б и в — схемы прямой (обратной) последовательности; г — схема нулевой последовательности.

ния схемы прямой последовательности к виду трехлучевой звезды достаточно один треугольник заменить эквивалентной звездой (рис. 18-12,в), после чего найдем: $x_{N1}=0,20$, $x_{M1}=0,146+0,056=0,202$ и $x_{N1}=0,152+0,128=0,28$. При заданных условиях такие же реактивности будут и в схеме обратной последовательности. Из схемы нулевой последовательности (рис. 18-12,г) имеем $x_{MN0}=0,292+0,652+0,256=1,2$.

По (18-29) находим:

$$x_D = 3 \cdot 0,20 + 0,202 + 0,28 + 1,2 \approx 2,28.$$

Приняв $E_A = j1$, по (18-28) имеем:

$$I_{MA1} = \frac{(1 - a^2) j1}{j(3 \cdot 0,2 + 0,202 + 0,28 + 2,28)} = 0,516 \angle 30^\circ$$

и согласно (18-21)

$$I_{M0} = a^2 \cdot 0,516 \angle 30^\circ = 0,516 \angle -90^\circ.$$

Ток в месте замыкания

$$I_{MB} = 3 \cdot 0,516 \angle -90^\circ = 1,548 \angle -90^\circ = -I_{NC},$$

или, поскольку $I_0 = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 37} = 1,56 \text{ кА},$

$$I_{MB} = -I_{NC} = 1,56 \cdot 1,548 \angle -90^\circ = -j2,42 \text{ кА}.$$

Для точки N найдем симметричные составляющие напряжений:

$$\dot{U}_{A1} = j1 - (-j0,516)j[(a - a^2) \cdot 0,2 - a^2 \cdot 0,28] = -0,07 + j0,70;$$

$$\dot{U}_{A2} = -(-j0,516)j[(a^2 - a) \cdot 0,2 - a \cdot 0,28] = -0,07 + j0,30;$$

$$\dot{U}_0 = -aj1 - (-j0,516)j(3 \cdot 0,2 + 2 \cdot 0,28) = 0,27 + j0,50$$

и по ним фазные величины:

$$\dot{U}_A = 0,13 + j1,5; \quad \dot{U}_B = 0,68 \text{ и } \dot{U}_C = 0.$$

Аналогично находим фазные напряжения точки M :

$$\dot{U}_A = -0,25 + j1,5$$

$$\dot{U}_B = 0;$$

$$\dot{U}_C = -0,80.$$

Симметричные составляющие напряжений в точке P будут:

$$\dot{U}_{A1} = -0,07 + j0,70 - a^2(-j0,516)j0,128 = -0,04 + j0,75;$$

$$\dot{U}_{A2} = -0,07 + j0,30 - a(-j0,516)j0,128 = -0,04 + j0,25;$$

$$\dot{U}_0 = 0,27 + j0,50 - (-j0,516)j0,256 = 0,14 + j0,50$$

и фазные величины:

$$\dot{U}_A = 0,06 + j1,5; \quad \dot{U}_B = 0,61 \text{ и } \dot{U}_C = -0,25.$$

Для перевода в именованные единицы все найденные значения напряжений должны быть умножены на базисное фазное напряжение, т. е. $U_{ф.б} = 37/\sqrt{3} = 21,4 \text{ кВ}.$

Для определения токов в фазах линии Л-2 предварительно находим для этой линии значения коэффициентов распределения:

в режиме „М“

$$C^{(M)} = 1 \cdot \frac{0,33}{0,33 + 0,25 + 0,9} = 0,22;$$

в режиме „N“

$$C^{(N)} = -1 \cdot \frac{0,90}{0,33 + 0,25 + 0,9} = -0,61;$$

в нулевой последовательности $C_0 = 1$.

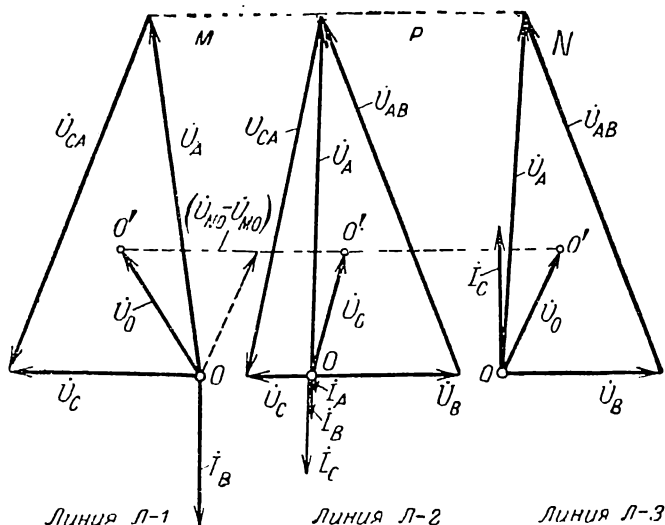


Рис. 18-13. Векторные диаграммы токов и напряжений (к примеру 18-2).

Искомые токи (в относительных единицах) будут:

$$I_A = (1 - 0,22 - 0,61)(-j0,516) = -j0,09;$$

$$I_B = (1 + 0,44 - 0,61)(-j0,516) = -j0,43;$$

$$I_C = (1 - 0,22 + 1,22)(-j0,516) = -j1,04.$$

По вычисленным значениям токов и напряжений построены требуемые векторные диаграммы, которые представлены на рис. 18-13.

Нетрудно убедиться, что $\dot{U}_{N0} - \dot{U}_{M0} = (-j0,516 \cdot j1,2) = 0,62$.

Пример 18-3. Для условий предыдущего примера определить методом расчетных кривых ток в месте короткого замыкания для $t = 2$ сек. Генераторы снабжены АРВ.

Используем для решения приближенную схему замещения (рис. 18-9,б). По (18-38) имеем:

$$x_{GM1} = x_{GN1} = \frac{2}{3} \cdot 2,28 = 1,52.$$

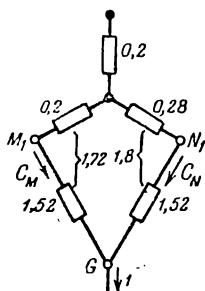
Введя их в упрощенную схему рис. 18-12,в, получим схему, представленную на рис. 18-14. Ее результирующая реактивность

$$x_{\Sigma} = 0,2 + (1,72 // 1,8) = 1,08.$$

Для сравнения с результатом предыдущего расчета найдем ток прямой последовательности в начальный момент короткого:

$$I_{M1} = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot 1,08} = 0,535 \text{ (вместо } 0,516, \text{ т. е. больше на } \sim 4\%).$$

Рис. 18-14. К примеру 18-3. Использование приближенной схемы замещения прямой последовательности.



Коэффициенты распределения в ветвях M и N будут:

$$C_M = \frac{1,8}{1,72 + 1,8} = 0,51 \text{ и } C_N = 1 - 0,51 = 0,49.$$

В соответствии со схемой рис. 18-12,в коэффициент распределения для генераторной ветви будет:

$$C_G = \frac{0,2 \cdot 1 + 0,152 \cdot 0,49}{0,9} = 0,31$$

и для системы

$$C_C = 1 - 0,31 = 0,69.$$

Расчетное сопротивление для генератора

$$x_{\text{расч}} = \frac{1,08}{0,31} \cdot \frac{30}{100} = 1,05;$$

реактивность системы относительно места короткого

$$x_{CK} = \frac{1,08}{0,69} = 1,57.$$

По расчетным кривым рис. 11-10 для $x_{\text{расч}} = 1,05$ и $t = 2 \text{ сек}$ имеем $I_1^* = 0,97$.

Следовательно, ток прямой последовательности в общей ветви будет

$$I_1 = \frac{1}{1,57} \cdot 1,56 + 0,97 \cdot \frac{30}{\sqrt{3} \cdot 37} = 1,45 \text{ ка}$$

и искомый ток

$$I_M = I_N = \sqrt{3} \cdot 1,45 = 2,52 \text{ ка.}$$

Пример 18-4. Считая, что замыкания на землю в точках M и N схемы рис. 18-12,а произошли через активные сопротивления $r_{дМ} = r_{дN} = 7,65 \text{ ом}$, определить начальные значения токов в фазах линий и фазные напряжения в точках M , N и P .

При принятых в примере 18-2 базисных условиях ($S_6 = 100 \text{ Мва}$ и $U_6 = U_{св}$) относительная величина активного сопротивления составляет:

$$r_{дМ}^* = r_{дN}^* = 7,65 \cdot \frac{100}{37^2} = 0,56.$$

При $\dot{E} = j1$ по (18-28) находим:

$$\dot{I}_{MA1} = \frac{(1 - a^2)j1}{2 \cdot 3 \cdot 0,56 + j(3 \cdot 0,2 + 0,202 + 0,28 + 2,28)} = 0,365 \angle 75^\circ,$$

и по (18-21)

$$\dot{I}_{M0} = a^2 \cdot 0,365 \angle 75^\circ = 0,365 \angle -45^\circ.$$

Ток в месте замыкания

$$\dot{I}_{MB} = 3 \cdot 0,365 \angle -45^\circ = 1,1 \angle -45^\circ = -\dot{I}_{NC}.$$

Токи в фазах линии Л-2 пропорциональны току $\dot{I}_{M0}$, поэтому для получения их новых значений достаточно ранее найденные величины (при $r_M = r_N = 0$) умножить на $\frac{0,365 \angle -45^\circ}{0,516 \angle -90^\circ} = 0,707 \angle 45^\circ$, что дает

$$\dot{I}_A = 0,064 \angle -45^\circ, \quad \dot{I}_B = 0,304 \angle -45^\circ, \quad \dot{I}_C = 0,736 \angle -45^\circ.$$

Напряжения нулевой последовательности в точках M' и N' :

$$\dot{U}_{M0} = -a^2 j1 + 0,365 \angle -45^\circ \cdot [3 \cdot 0,56 + j(3 \cdot 0,2 + 2 \cdot 0,2)] = 0,37 \angle 118^\circ;$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{N0} &= -aj1 - 0,365 \angle -45^\circ \cdot [3 \cdot 0,56 + j(3 \cdot 0,2 + 2 \cdot 0,28)] = \\ &= 0,65 \angle 78^\circ; \end{aligned}$$

их разность

$$\begin{aligned} \dot{U}_{N0} - \dot{U}_{M0} &= 0,65 \angle 78^\circ - 0,37 \angle 118^\circ = 0,44 \angle 45^\circ = \\ &= 0,365 \angle -45^\circ \cdot 1,2 \angle 90^\circ. \end{aligned}$$

Фазные напряжения в точке M' :

$$\dot{U}_A = (1 - a^2) j1 + 0,365 \angle -45^\circ \cdot [3 \cdot 0,56 + j3 \cdot (0,2 + 0,2)] = 1,38 \angle 95,5^\circ,$$

$$\dot{U}_B = 3 \cdot 0,56 \cdot 0,365 \angle -45^\circ = 0,61 \angle -45^\circ;$$

$$\dot{U}_C = (a - a^2) j1 + 0,356 \angle -45^\circ \cdot [3 \cdot 0,56 + j3 \cdot (2 \cdot 0,2 + 0,2)] = 0,82 \angle 117^\circ;$$

аналогично определяются фазные напряжения в точке N' :

$$\dot{U}_A = 1,60 \angle 85^\circ, \quad \dot{U}_B = 0,75 \angle -10^\circ, \quad \dot{U}_C = 0,61 \angle 135^\circ.$$

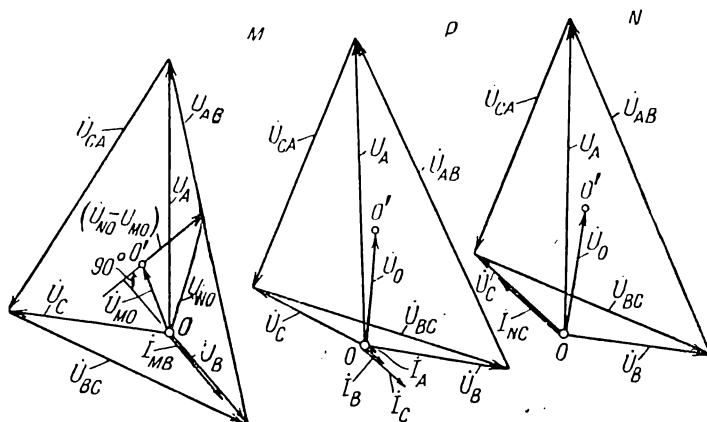


Рис. 18-15. Векторные диаграммы токов и напряжений (к примеру 18-4).

Векторные диаграммы токов и напряжений для рассматриваемых условий представлены на рис. 18-15.

Пример 18-5. Используя метод спрямленных характеристик, найти токи в сети 110 кВ схемы рис. 18-16 при двойном металлическом замыкании на землю в точках M и N^* . Решение провести для $t = 0,3$ сек. Исходные данные:

Генератор $G-1$: 125 Мва; 15,75 кВ; $E = 1,3$; $x_1 = 0,41$; $x_2 = 0,45$.

Генератор $G-2$: 60 Мва; 6,3 кВ; $E = 1,33$; $x_1 = 0,39$; $x_2 = 0,14$.

Трансформатор $T-1$: 120 Мва; 121/15,75 кВ; $u_k = 10,5\%$.

Трансформатор $T-2$: 60 Мва; 115/38,5/6,3 кВ; $u_{кв} = 17\%$; $u_{вн} = 10,5\%$; $u_{сн} = 6\%$.

Трансформатор $T-3$: 120 Мва; 110/11 кВ; $u_k = 10,5\%$.

Нагрузки $H-1$ и $H-2$ по 30 Мва; нагрузка $H-3$ 120 Мва.

Линии: $L-1$ 70 км; $x_0 = 3,5x_1$;

$L-2$ 40 км; $x_0 = 3,5x_1$;

$L-3$ 100 км; $x_0 = 5,5x_1$.

* Предполагается, что данная сеть работает с заземлением нейтралей через дугогасящее устройство.

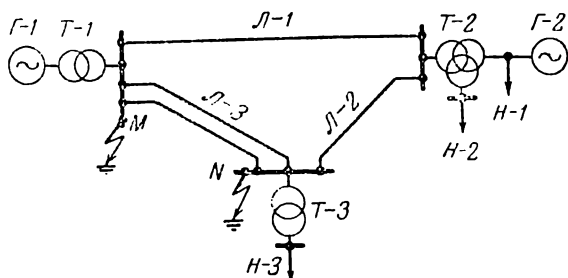


Рис. 18-16. Исходная схема к примеру 18-5.

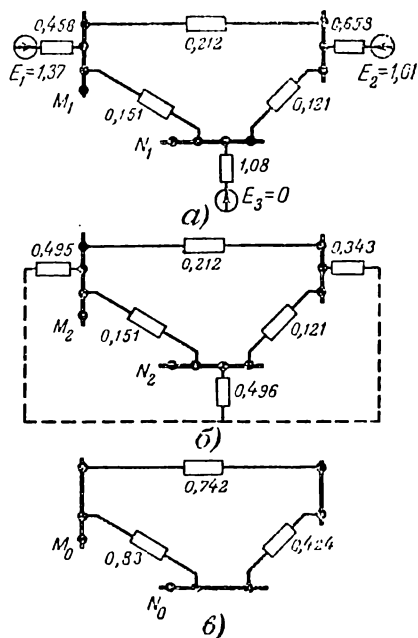


Рис. 18-17. К примеру 18-5.
а, б, в — схемы прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Для всех линий принять $x_1=0,4$ ом/км. Относительные величины э. д. с. и реактивностей прямой последовательности генераторов соответствуют моменту $t=0,3$ сек при наличии АРВ.

Расчет проводим в относительных единицах при $S_6=100$ Мва и на стороне высшего напряжения $U_6=115$ кВ.

После приведения всех элементов к базисным условиям (с учетом заданных коэффициентов трансформации) и простейших преоб-

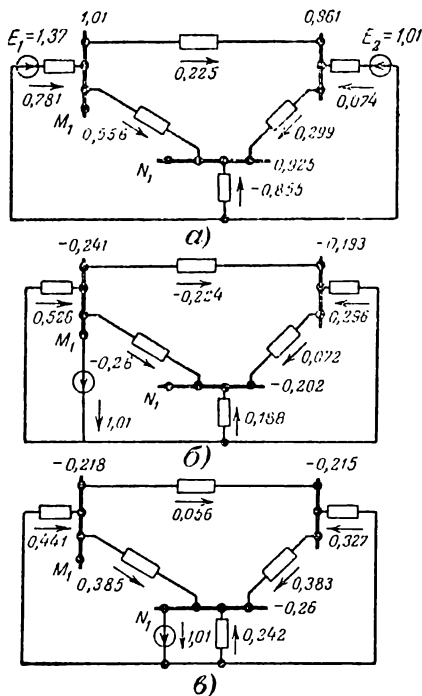


Рис. 18-18. К примеру 18-5; токораспределение в схеме прямой последовательности.

а — режим при отсутствии замыканий; б — режим « M_1 »; в — режим « N_1 ».

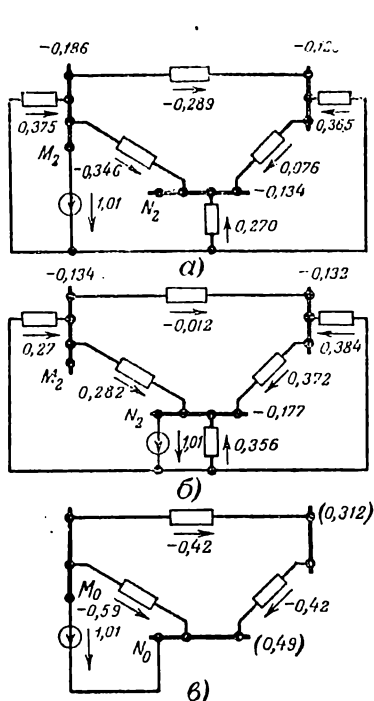


Рис. 18-19. К примеру 18-5; токораспределение в схеме обратной (а — режим « M_2 », б — режим « N_2 ») и нулевой (в) последовательностей.

разований схемы отдельных последовательностей приобретают вид, как это показано на рис. 18-17. Их дальнейшее преобразование к элементарному виду также не представляет труда. Значения их параметров получаются следующие: $E_{M\Lambda}=1,009$, $E_{N\Lambda}=0,925$, $x_{N1}=0,20$, $x_{M1}=0,0386$, $x_{N1}=0,0574$, $x_{N2}=0,133$, $x_{M2}=0,0516$, $x_{N2}=0,042$ и $x_{MN0}=0,485$.

При этом модуль тока всех последовательностей в точках замыкания в относительных единицах составляет $I=1,01$. Найдем теперь распределение токов в сети. На рис. 18-18 показано распределение токов прямой последовательности для трех режимов: при отсутствии

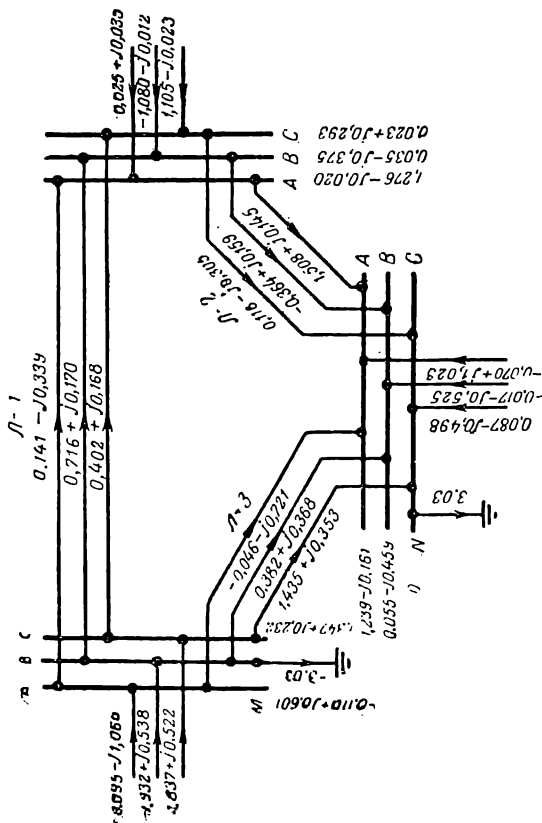


Рис. 18-20. К примеру 18-5; фазные токи и напряжения в сети 110 кВ при двойном замыкании на землю в точках М и N.

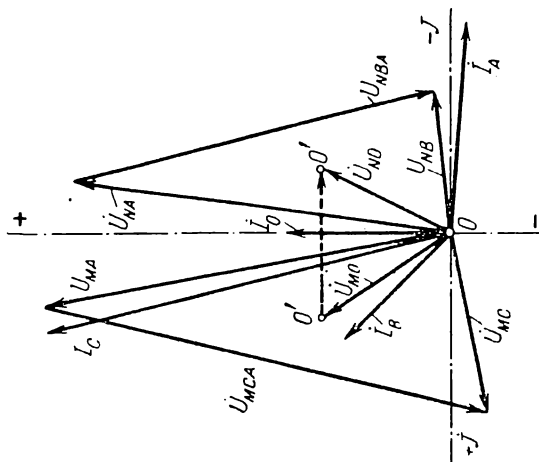


Рис. 18-21. Векторные диаграммы токов в линии Л-3 и напряжений в точках М и N при двойном замыкании на землю (к примеру 18-5).

закрываний (рис. 18-18,а), при условном режиме « M_1 » (рис. 18-18,б) и при условном режиме « N_1 » (рис. 18-18,в). Стрелками указаны принятые положительные направления для каждого участка. Числа у шин показывают значения напряжений прямой последовательности в этих режимах.

Аналогичные режимы для схемы обратной последовательности показаны на рис. 18-19,а и б. Распределение токов нулевой последовательности приведено на рис. 18-19,в. Здесь у шин в скобках даны значения напряжений нулевой последовательности относительно точки M_0 .

После суммирования всех составляющих данной величины для каждой фазы найдем ее истинное значение. Результаты такого подсчета представлены на трехлинейной схеме рис. 18-20. Для большей наглядности построены векторные диаграммы токов в линии L -3 и напряжений по ее концам (точки M и N), которые показаны на рис. 18-21.

18-5. ОДНОФАЗНОЕ КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ С ОБРЫВОМ ФАЗЫ

Остановимся теперь на случае, когда одновременно возникает как поперечная, так и продольная несимметрия.

Пусть на каком-либо участке сети произошел обрыв одного провода, причем один конец провода заземлился, а другой остался изолированным (рис. 18-22). Подобный случай может иметь место, например, при наличии выключателей с пофазным управлением; при однофазном коротком замыкании на линии с двухсторонним питанием каскадное действие выключателей поврежденной фазы создает подобные условия.

Расчет рассматриваемой двухкратной несимметрии достаточно просто и удобно можно произвести с помощью производной схемы прямой последовательности, которая в данном случае и в строгом выполнении не содержит дополнительных источников. Последнее, как отмечалось выше, является следствием того, что при рассматриваемой комбинации несимметрий и их взаимного расположения в уравнениях вида (18-7) и (18-8) соблюдается принцип взаимности (т. е. $m=n$).

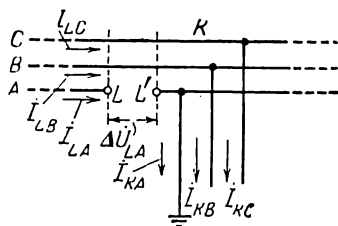


Рис. 18-22. Однофазное короткое замыкание с одновременным обрывом той же фазы.

Такая схема представлена на рис. 18-23. Сопротивления ее ветвей определяются из следующих выражений:

$$Z_K = Z_{K2} + Z_{K0} - \frac{(Z_{KL2} - Z_{KL0})^2}{Z_{L2} + Z_{L0}}; \quad (18-44)$$

$$Z_L = \frac{Z_{L2}Z_{L0}}{Z_{L2} + Z_{L0}}; \quad (18-45)$$

$$Z_{KL} = - \frac{Z_{KL2}Z_{L0} + Z_{KL0}Z_{L2}}{Z_{L2} + Z_{L0}}, \quad (18-46)$$

где Z_{K2} и Z_{K0} — сопротивления схемы соответствующей последовательности относительно точки короткого замыкания при полном разрыве схемы в точке L ;

Z_{L2} и Z_{L0} — то же относительно точки обрыва при отсутствии короткого замыкания;

Z_{KL2} и Z_{KL0} — взаимные сопротивления между точкой короткого и точкой обрыва в схемах соответствующих последовательностей.

Следует отметить, что присоединение производной схемы прямой последовательности к исходной схеме прямой последовательности должно быть сделано так, как это показано на рис. 18-23. Это обусловлено тем, что ее параметры определены при указанных стрелками положительных направлениях токов, в то время как через ветвь с сопротивлением Z_{KL} должна проходить сумма токов ($I_{KA1} + I_{LA1}$). Однако, чтобы эта условность была увязана с обычным для короткого замыкания условием, что токи имеют положительное направление к точке короткого, необходимо у найденного тока I_{LA1} изменить знак.

Напряжения прямой последовательности в месте короткого замыкания относительно нулевого провода и относительно оборванного конца фазы определяются суммой соответствующих падений напряжений в производной схеме (рис. 18-23).

Остальные симметричные составляющие токов и напряжений в обоих местах несимметрии определяются затем из соотношений, вытекающих из граничных условий, и двух уравнений связи вида (18-3) — (18-6).

Распределение токов и напряжений находят обычными приемами или с использованием различных модификаций принципа наложения.

Если все приведенные э. д. с. источников равны между собой и параметры схем прямой и обратной последовательностей принять одинаковыми, то для определения тока прямой последовательности в месте короткого при одновременном обрыве той же фазы с одной стороны можно получить простое расчетное выражение [Л. 29]:

$$i_{KA1} = \frac{\dot{E}_A}{Z^{(1)} + \alpha Z_{(L)}}, \quad (18-47)$$

где $Z^{(1)}$ — результирующее сопротивление комплексной схемы при однофазном коротком замыкании в заданной точке и отсутствии обрыва;

$$\alpha = \left(\frac{Z_{KL0}}{Z_{L0}} + 2 \frac{Z_{KL1}}{Z_{L1}} \right)^2 \quad (18-48)$$

и

$$Z_{(L)} = \frac{Z_{L1} Z_{L0}}{Z_{L1} + 2Z_{L0}}; \quad (18-49)$$

здесь Z_{L1} и Z_{KL1} — то же, что ранее Z_{L2} и Z_{KL2} .

По выражению наглядно видно уменьшение тока короткого замыкания, вызванное одновременным обрывом поврежденной фазы.

Пример 18-6. При однофазном коротком замыкании в точке К схемы рис. 18-24,а и одновременном обрыве той же фазы линии определить величину начального тока в месте короткого замыкания.

Генератор Г-1: 30 Мва; 6,3 кВ; $x''_d = x_2 = 0,125$.

Генератор Г-2: 90 Мва; 10,5 кВ; $x''_d = x_2 = 0,125$.

Трансформатор Т-1: 31,5 Мва; 6,3/121 кВ; $u_k = 10,5\%$.

Трансформатор Т-2: 81 Мва; 10,5/121 кВ; $u_k = 10,5\%$;

Для линии $x_1 = 0,108$ и $x_0 = 0,213$; эти реактивности заданы на всю длину линии, при этом они выражены в относительных единицах при $S_6 = 90$ Мва и $U_6 = 121$ кВ.

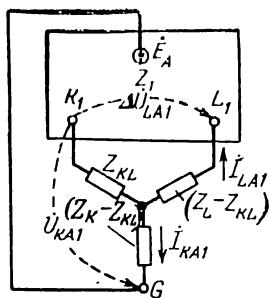


Рис. 18-23. Основная и производная схемы прямой последовательности для случая однофазного короткого замыкания с одновременным обрывом той же фазы.

После сложения последовательно включенных элементов схемы обратной и нулевой последовательностей приобретают элементарный вид рис. 18-24, б и в, где реактивности выражены в относительных единицах при указанных выше базисных условиях. Из них получаем значения реактивностей:

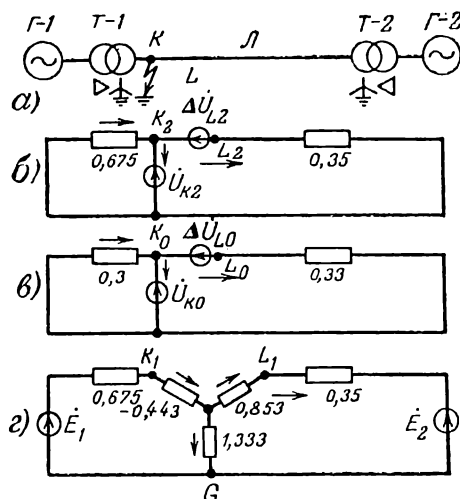


Рис. 18-24. К примерам 18-6, 18-7.

а — исходная схема; б — схема обратной последовательности; в — схема нулевой последовательности; г — схема прямой последовательности с введенной в нее производной схемой.

$x_{K2} = x_{KL2} = 0,675$; $x_{L2} = 0,675 + 0,35 = 1,025$; $x_{K0} = x_{KL0} = 0,3$; $x_{L0} = 0,3 + 0,33 = 0,63$ и при отсутствии обрыва

$$x_{1\Sigma} = 0,675 \parallel 0,35 = 0,23 = x_{2\Sigma}; \quad x_{0\Sigma} = 0,3 \parallel 0,33 = 0,157;$$

следовательно $x^{(1)} = 2 \cdot 0,23 + 0,157 = 0,617$.

По (18-48) и (18-49) находим:

$$\alpha = \left(\frac{0,30}{0,63} + 2 \frac{0,675}{1,025} \right)^2 = 3,22;$$

$$x_{(L)} = \frac{1,025 \cdot 0,63}{1,025 + 2 \cdot 0,63} = 0,281.$$

Искомый ток прямой последовательности по (18-47) будет:

$$I_{K1} = \frac{1}{0,617 + 3,22 \cdot 0,281} = 0,656.$$

Полный ток в месте короткого

$$I_K = 3 \cdot 0,656 = 1,968 \text{ или } I_K = 1,968 \cdot \frac{90}{\sqrt{3 \cdot 121}} = 0,845 \text{ ка.}$$

Пример 18-7. Для условий предыдущего примера определить ток в фазах линии для $t=2 \text{ сек.}$

Решение проведем методом расчетных кривых, используя производную схему прямой последовательности.

Зная значения x_{K2} , x_{L2} , x_{KL2} , x_{K0} , x_{L0} и x_{KL0} , найдем по (18-44) — (18-46) реактивности

$$x_K = 0,675 + 0,3 - \frac{(0,675 - 0,3)^2}{1,025 + 0,63} = 0,89;$$

$$x_L = \frac{1,025 \cdot 0,63}{1,025 + 0,63} = 0,39;$$

$$x_{KL} = - \frac{0,675 \cdot 0,63 + 0,3 \cdot 1,025}{1,025 + 0,63} = -0,443.$$

Параметры производной схемы будут:

$$x_K - x_{KL} = 0,89 - (-0,443) = 1,333;$$

$$x_L - x_{KL} = 0,39 - (-0,443) = 0,833.$$

Введя производную схему в исходную схему прямой последовательности, получим схему рис. 18-24,2. Ее результирующая реактивность $x_\Sigma = 1,527$ и коэффициенты распределения для генераторов $C_1 = 0,836$ и $C_2 = 0,164$.

Расчетные реактивности будут:
генератора Г-1

$$x_{\text{расч}} = \frac{1,527 \cdot 30}{0,836 \cdot 90} = 0,61;$$

генератора Г-2

$$x_{\text{расч}} = \frac{1,527}{0,164} = 9,31.$$

По расчетным кривым находим для $t=2 \text{ сек}$ ток прямой последовательности генератора Г-1 $I_1 = 1,46$. Пересчитывая его к $S_6 = 90 \text{ Мва}$ и принимая, что э. д. с. генератора направлена по положительной действительной оси, для этого тока получим:

$$I_{A1} = -j0,486.$$

Ток прямой последовательности генератора Г-2:

$$I_{A1} = I_{LA1} = - \left(-j \frac{1}{9,31 - 0,125} \right) = j0,109$$

(здесь знак у тока изменен на обратный в соответствии с указанным ранее замечанием).

Ток прямой последовательности в месте короткого

$$I_{KA1} = -j0,486 - j0,109 = -j0,595.$$

Согласно схеме рис. 18-24,2 находим напряжения прямой последовательности:

$$\dot{U}_{KA1} = j1,333(-j0,595) + (-j0,443)(-j0,486) = 0,577;$$

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = j0,833 \cdot j0,109 + (-j0,443)(-j0,486) = -0,307$$

(отрицательный знак указывает, что потенциал точки L_1 в схеме рис. 18-24,2 больше потенциала точки K_1).

Из граничных условий следует:

$$I_{KA2} = I_{K0} = I_{KA1} = -j0,595 \quad \text{и} \quad \Delta \dot{U}_{LA1} = \Delta \dot{U}_{LA2} = \Delta \dot{U}_{L0} = -0,307$$

Из уравнений связи схемы обратной последовательности

$$\Delta \dot{U}_{LA2} = -0,307 = -j0,675(-j0,595) - j1,025 I_{LA2},$$

откуда

$$I_{LA2} = j0,093;$$

$$\dot{U}_{KA2} = -j0,675(-j0,595) - j0,675 \cdot j0,093 = 0,34.$$

Из уравнений связи схемы нулевой последовательности

$$\Delta \dot{U}_{L0} = -0,307 = -j0,3(-j0,595) - j0,63 I_{L0},$$

откуда

$$I_{L0} = -j0,204.$$

Проверка:

$$I_{LA} = j0,109 + j0,093 - j0,204 = -0,002 \quad (\text{вместо } 0);$$

примем для баланса $I_{L0} = -j0,202$.

Находим напряжение нулевой последовательности:

$$\dot{U}_{K0} = -j0,3(-j0,595) - j0,3(-j0,202) = -0,239.$$

Проверка:

$$\dot{U}_{KA} = 0,577 - 0,34 - 0,239 = -0,002 \quad (\text{вместо } 0), \quad \text{т. е.}$$

погрешность меньше 0,5%.

Искомые токи в фазах линии:

$$I_A = 0;$$

$$I_B = a^2 j0,109 + a j0,093 - j0,202 = 0,014 - j0,303;$$

$$I_C = a j0,109 + a^2 j0,093 - j0,202 = -0,014 - j0,303,$$

или

$$I_B = 6 - j130 \text{ а и } I_C = -6 - j130 \text{ а.}$$

Пример 18-8. В схеме рис. 18-25,а при однофазном коротком замыкании в точке K и одновременном обрыве той же фазы в сторону выключателя $B-2$ построить векторные диаграммы токов в выключателе $B-1$ и напряжений у этого выключателя. Решение сделать для $t=0,5$ сек, используя метод спрямленных характеристик.

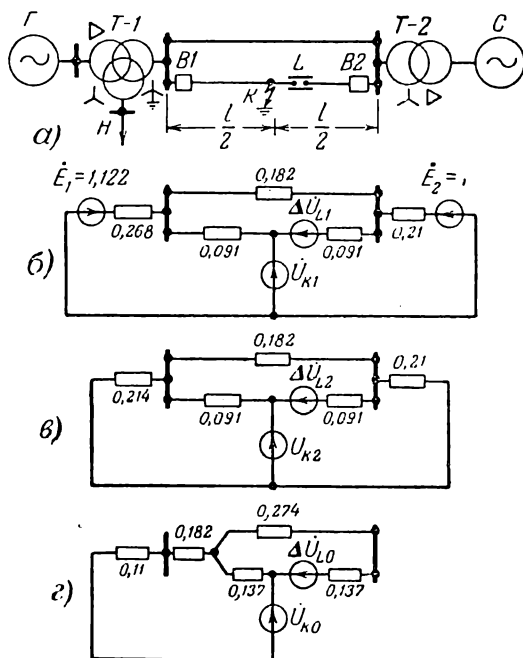


Рис. 18-25. К примеру 18-8.

а — исходная схема; б, в и г — схемы прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Система — источник бесконечной мощности с напряжением 10,5 кВ.

Генератор: 60 Мва; 10,5 кВ; $x_2=0,12$; $I_f=2,25$; $I_{fnp}=4$; АРВ есть.

Трансформатор $T-1$: 60 Мва; 115/37/10,5 кВ; $u_B=11\%$, $u_C=6\%$ и $u_H=0$.

Трансформатор $T-2$: 30 Мва; 115/10,5 кВ; $u_K=10,5\%$.

Нагрузка: 30 Мва; $x_1=1,2$; $x_2=0,35$.

Линия: 100 км; $x_1=0,4$ Ом/км одной цепи; $x_0=3,5 x_1$; $x_{01-11}=2x_1$.

По кривым для турбогенератора с АРВ для $t=0,5$ сек находим $E=1,26$ и $x_1=0,3$.

Расчет ведем в относительных единицах при $S_6=60$ Мва и $U_6=U_{ср}$.

После простейших преобразований схемы отдельных последовательностей принимают вид рис. 18-25, б, в и г.

Аналогично предыдущему примеру нетрудно найти параметры производной схемы прямой последовательности:

$$Z_K = j0,658; Z_L = j0,198 \text{ и } Z_{K,L} = -j0,148.$$

Дальнейший ход решения подобен тому, что и в предыдущем примере.

Симметричные составляющие искоемых токов и напряжений получаются следующими:

$$I_{A1} = -j1,206; I_{A2} = -j1,138; I_0 = -j1,196;$$

$$\dot{U}_{A1} = 0,88; \dot{U}_{A2} = -0,16; \dot{U}_0 = -0,13.$$

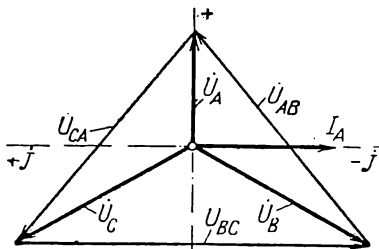


Рис. 18-26. К примеру 18-8. Векторные диаграммы токов и напряжений.

Построенные по ним векторные диаграммы представлены на рис. 18-26. Значения токов в фазах *B* и *C* ничтожны по сравнению с током фазы *A*, поэтому они не показаны.

18-6. ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. В чем заключается трудность расчета многократной несимметрии?

2. Какие дополнительные допущения обычно принимают при расчете многократной несимметрии?

3. В чем заключается общий путь решения многократной несимметрии?

4. Что называют производной схемой прямой последовательности и при каких условиях она в значительной мере упрощается?

5. В чем состоит удобство нахождения токораспределения путем наложения элементарных режимов?

6. Почему нельзя в общем случае сделать непосредственное соединение схем отдельных последовательностей по всем точкам несимметрии в соответствии с видами последних?

7. Какой смысл образования комплексной схемы по одному из мест несимметрии?

8. Вывести выражение для тока двойного замыкания на землю фаз *A* и *C*.

9. Почему приближенная производная схема прямой последовательности не позволяет получить непосредственно значение тока прямой последовательности в месте замыкания?

10. На каких допущениях основана приближенная производная схема прямой последовательности для двойного замыкания на землю?

11. Для условий примера 18-1 провести сравнение двойного замыкания на землю с двухфазным коротким замыканием в точке N .

12. Для условий примера 18-2 построить векторную диаграмму напряжений в точке R .

13. В схеме рис. 18-12,а определить ток в линии $L-3$ при двойном замыкании на землю в точках P и N . Решение выполнить для начального момента.

14. Провести расчет двойного замыкания на землю по концам линии $L-1$ схемы рис. 18-16. Определить токи в фазах линии $L-1$ и напряжения на ее концах для $t=0,3$ сек, используя метод спрямленных характеристик.

15. Оценить погрешность в токе, получаемую в примере 18-5, если расчет выполнить с применением приближенной производной схемы прямой последовательности.

16. Провести решение примера 18-6 для случая короткого замыкания на стороне высшего напряжения трансформатора $T-2$.

17. Провести решение примера 18-6 при обрыве фазы в сторону генератора $G-1$.

18. В чем трудность расчета короткого замыкания и обрыва, возникающих на разноименных фазах?

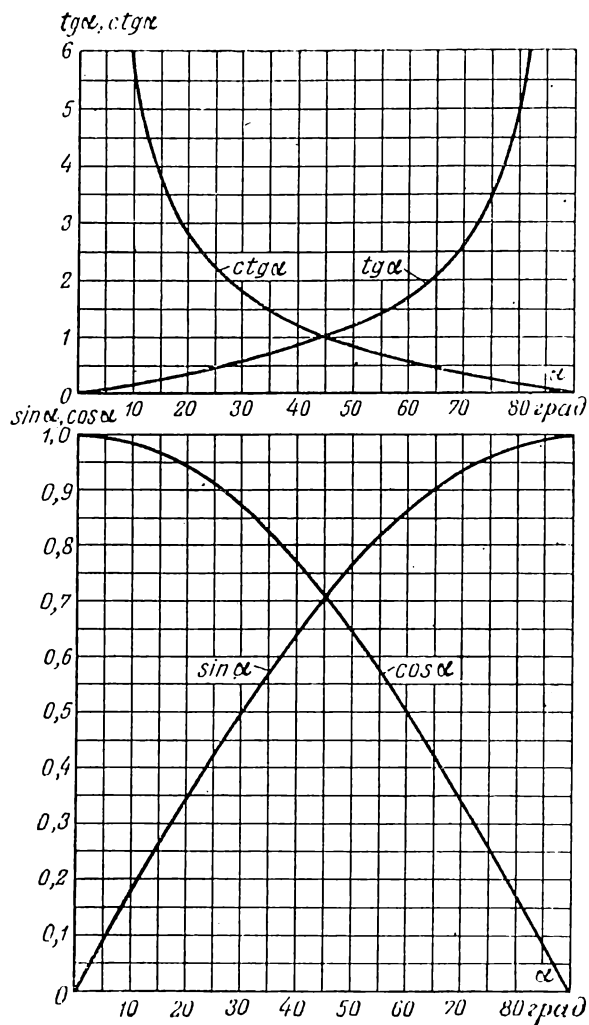
19. Провести решение примера 18-8 при обрыве линии в сторону выключателя $B-1$.

20. Для условий схемы рис. 18-25,а сравнить токи в выключателе $B-2$ при отсутствии обрыва и при обрыве в сторону выключателя $B-1$.

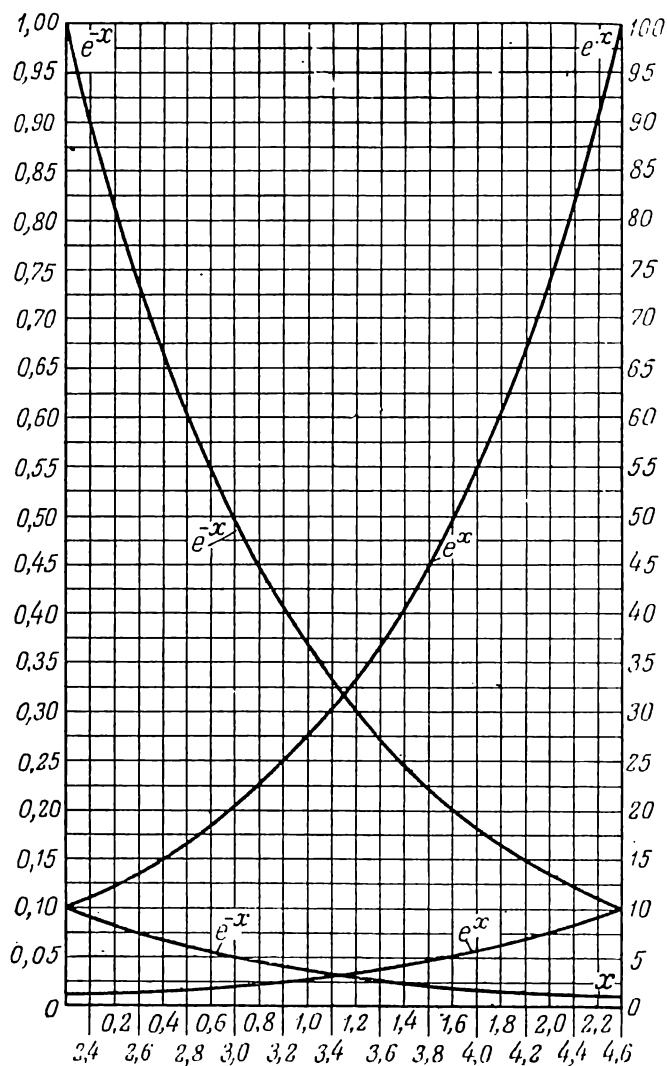
ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение П-1

Графики изменения тригонометрических функций



Графики изменения показательных функций

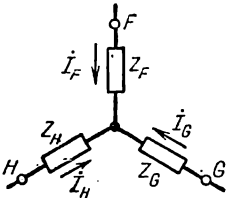
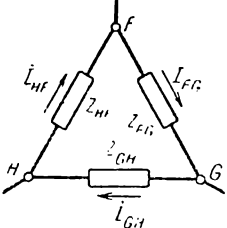
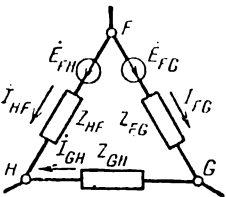
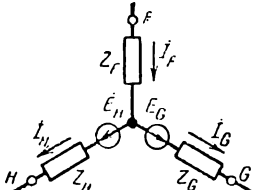
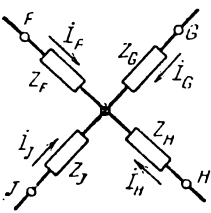
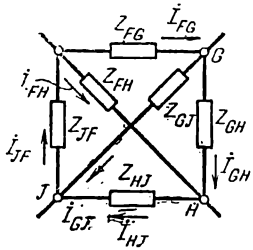


Основные формулы преобразования

№ п/п.	Преобразование	Схема до преобразования	Схема после преобразования	Обозначения
1	Последовательное соединение			+
2	Параллельное соединение			
3	Замена нескольких источников лентными			
4	Преобразование треугольника в звезду			

схем и нахождения токораспределения

Сопротивления элементов схемы после преобразования	Распределение токов в исходной схеме
$Z_0 = Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n$	$I_1 = I_2 = \dots = I_n$
$Z_0 = \frac{1}{Y_0},$ где $Y_0 = Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n$ $Y_1 = \frac{1}{Z_1}; Y_2 = \frac{1}{Z_2}, \dots, Y_n = \frac{1}{Z_n};$ при двух ветвях $Z_0 = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}$	$I_n = \frac{Z_0}{Z_n} I$
$\dot{E}_0 = Y_0 \sum_{k=1}^n Y_k \dot{E}_k$ $Y_1, Y_2, \dots, Y_n, Y_0$ — см. п. 2; при двух ветвях $\dot{E}_0 = \frac{\dot{E}_1 Z_2 + \dot{E}_2 Z_1}{Z_1 + Z_2}$	$I_n = \frac{\dot{E}_n - U_F}{Z_n}$
$Z_F = \frac{Z_{FG} Z_{HF}}{Z_{FG} + Z_{GH} + Z_{HF}}$ $Z_G = \frac{Z_{FG} Z_{GH}}{Z_{FG} + Z_{GH} + Z_{HF}}$ $Z_H = \frac{Z_{GH} Z_{HF}}{Z_{FG} + Z_{GH} + Z_{HF}}$	$I_{FG} = \frac{I_F Z_F - I_G Z_G}{Z_{FG}}$ $I_{GH} = \frac{I_G Z_G - I_H Z_H}{Z_{GH}}$ $I_{HF} = \frac{I_H Z_H - I_F Z_F}{Z_{HF}}$

№ п/п.	Преобразование	Схема до преобразования	Схема после преобразования	Обозначения
5	Преобразование трехлучевой звезды в треугольник			
6	Преобразование треугольника с двумя э. д. с. в звезду с двумя э. д. с.			
7	Преобразование многолучевой звезды в полный мост			

Сопrotивления элементов схемы после преобразования	Распределение токов в исходной схеме
$Z_{FG} = Z_F + Z_G + \frac{Z_F Z_G}{Z_H}$ $Z_{GH} = Z_G + Z_H + \frac{Z_G Z_H}{Z_F}$ $Z_{HF} = Z_H + Z_F + \frac{Z_H Z_F}{Z_G}$	$I_F = I_{FG} - I_{HF}$ $I_G = I_{GH} - I_{FG}$ $I_H = I_{HF} - I_{GH}$
$\dot{E}_G = \frac{\dot{E}_{FH} Z_{FG} + \dot{E}_{FG} (Z_{HF} + Z_{GH})}{Z_{FG} + Z_{GH} + Z_{HF}}$ $\dot{E}_H = \frac{\dot{E}_{FH} (Z_{FG} + Z_{GH}) + \dot{E}_{FG} Z_{HF}}{Z_{FG} + Z_{GH} + Z_{HF}}$ Сопrotивления те же, что в п. 4	$I_{FG} = \frac{\dot{E}_{FG} - \dot{E}_G + I_F Z_F + I_G Z_G}{Z_{FG}}$ $I_{GH} = \frac{I_H Z_H - \dot{E}_H + \dot{E}_G - I_G Z_G}{Z_{GH}}$ $I_{HF} = \frac{\dot{E}_{FH} - \dot{E}_H + I_F Z_F + I_H Z_H}{Z_{HF}}$
$Z_{FG} = Z_F Z_G \Sigma Y,$ $Z_{GH} = Z_G Z_H \Sigma Y,$ $\vdots$ $\vdots$ где $\Sigma Y = Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4$ Аналогично при большем числе ветвей	$I_F = I_{FG} + I_{FH} - I_{JF}$ $I_G = I_{GH} + I_{GJ} - I_{FG}$ $I_H = I_{HJ} - I_{FH} - I_{GH}$ $I_J = I_{JF} - I_{GJ} - I_{HJ}$

1. Основные параметры

Тип	S_n Мва	U_n кв	I_n ка	$\cos \varphi_n$	Активное сопротивление обмотки при 15° С, 10 ⁻³ ом	
					статора	возбуждения

А. Крупные

ТВ2-100-2	117,5	13,8	4,93	0,85	1,45	335
ТВФ-100-2	117,5	10,5	6,48	0,85	1,03	122
ТВ2-150-2	166,5	18,0	5,35	0,90	1,41	436
ТВВ-150-2	176,5	18,0	5,67	0,85	2,36	118
ТВФ-200-2	235,0	11,0	12,35	0,85	0,41	124
ТГВ-200-2	235,0	15,75	8,63	0,85	1,08	194
ТВВ-200-2	235,0	15,75	8,63	0,85	1,21	87
ТВВ-300-2	353,0	20,0	10,20	0,85	1,02	131
ТГВ-300-2	353,0	20,0	10,20	0,85	1,30	116
ТВВ-500-2	587,5	20,0	16,95	0,85	—	—

Б. Крупные

СВ 850/190-40	100,0	16,5	3,50	0,85		
СВ 1160/180-72	103,5	13,8	4,33	0,80		
СВ 835/180-36	111,0	13,8	4,65	0,90		
СВ 1500/170-96	117,7	13,8	4,92	0,85		
СВ 1500/200-88	127,8	13,8	5,16	0,85		
СВ 1190/250-48	264,7	15,75	9,68	0,85		
СВ 1500/130-88	160,0	13,8	6,70	0,80		
СВФ 830/225-28	353,0	17,75	11,48	0,85		
СВФ 1690/175-64	590,0	15,75	21,60	0,85		

В. Синхронные

КС 10000-6	10,0	6,6	0,87		18,0	91
КС 15000-6	15,0	6,6	1,31		11,8	124
КС 30000-11	30,0	10,5	1,65		10,7	196
КСВ 37500-11	37,5	10,5	2,06		10,7	163
КСВ 50000-11	50,0	11,0	2,62		4,35	97
КСВ 75000-11	75,0	11,0	3,94		4,35	97

Примечание. Постоянные инерции отнесены к полной мощности

синхронных машин

Реактивности в относительных единицах						Постоянные времени, сек		Постоянная инерции, сек
x''_d	x'_d	x_d	x_q	x_2	x_0	T_{f0}	$T_a^{(3)}$	T_J

турбогенераторы

0,14	0,20	1,80	1,80	0,17	0,08	13,00	0,38	4,42
0,18	0,28	1,80	1,80	0,22	0,10	6,20	0,42	2,74
0,12	0,18	1,49	1,49	0,15	0,07	11,90	0,42	4,97
0,21	0,31	1,71	1,71	0,26	0,11	5,10	0,41	2,49
0,17	0,25	1,95	1,95	0,20	0,10	7,12	0,52	2,78
0,19	0,27	1,85	1,85	0,23	0,08	6,53	0,47	2,79
0,19	0,28	1,90	1,90	0,23	0,10	6,00	0,42	2,36
0,17	0,26	1,70	1,70	0,26	0,09	6,00	0,37	2,10
0,20	0,28	1,92	1,92	0,24	0,09	6,65	0,42	2,18
0,23	0,36	—	—	0,28	0,14	8,77	—	—

гидрогенераторы

0,19	0,27	0,75	0,33	0,26	0,10	7,22		10,00
0,26	0,35	0,89						7,20
0,22	0,30	0,94						
0,21	0,29	0,65						7,30
0,15	0,20	0,52						10,00
0,24	0,35	1,07						8,43
0,40	0,57	1,75						
0,32	0,43	1,60						
0,30	0,42	1,58				5,00		7,66

компенсаторы

0,22	0,32	1,85	1,04		0,10	7,40	0,14	2,75
0,20	0,30	1,76	0,95		0,10	4,00	0,15	2,75
0,22	0,36	1,60	0,97		0,09	6,40	0,25	3,02
0,23	0,36	2,30	1,30		0,08	7,80	0,17	5,15
0,30	0,47	2,70	1,50		0,14	9,10	0,19	3,87
0,20	0,36	2,30	1,20		0,09	9,70	—	4,74

(Мва) машины и подсчитаны без учета турбины.

Продолжение приложения П-4

II. Примерные значения параметров синхронных машин

Наименование машин	Реактивности в относительных единицах						$T_{f0}, \text{сек}$	$T_J, \text{сек}$
	x''_d	x'_d	x_d	x_q	x_a	x_0		
Турбогенераторы (двухполюсные)	$\frac{0,15}{0,07-0,24}$	$\frac{0,25}{0,12-0,31}$	$\frac{1,70}{0,95-2,55}$	$\frac{1,70}{0,95-2,55}$	$\frac{0,18}{0,07-0,28}$	$0,01-0,10$	$\frac{8,0}{2,8-13,0}$	16
Генераторы и двигатели явнополюсные с демпферными обмотками	$\frac{0,24}{0,13-0,35}$	$\frac{0,37}{0,20-0,50}$	$\frac{1,15}{0,60-1,45}$	$\frac{0,75}{0,40-1,00}$	$\frac{0,24}{0,13-0,35}$	$0,02-0,20$	$\frac{5,0}{1,5-9,5}$	4,5; 6
То же, но без демпферных обмоток	$\frac{0,35}{0,20-0,45}$	$\frac{0,35}{0,20-0,45}$	$\frac{1,15}{0,60-1,45}$	$\frac{0,75}{0,40-1,00}$	$\frac{0,55}{0,30-0,70}$	$0,04-0,25$	$\frac{6,6}{3,0-10,5}$	4,5; 6
Синхронные конденсаторы	$\frac{0,25}{0,18-0,38}$	$\frac{0,40}{0,25-0,40}$	$\frac{1,80}{1,50-2,70}$	$\frac{1,15}{0,75-1,50}$	$\frac{0,24}{0,17-0,37}$	$0,02-0,15$	$\frac{9,0}{4,0-11,5}$	3

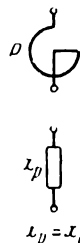
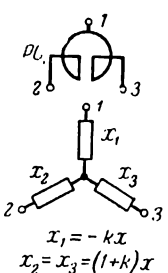
Примечания: 1. В числителе даны средние, а в знаменателе — предельные значения реактивностей и постоянной времени обмотки возбуждения T_{f0} .

2. Значение $T_J = 4,5 \text{ сек}$ относится к синхронным двигателям, $T_J = 6 \text{ сек}$ — к явнополюсным генераторам; они подсчитаны с учетом турбин.

Основные параметры асинхронных двигателей

Серия	Габарит	Синхронная скорость вращения, об/мин	Номинальное напряжение, кВ	Номинальная мощность, кВт	cos φ	Относительный пусковой ток
А	10 и 11	600—3 000	0,22/0,38—6	55—400	0,80—0,92	4,3—7,0
АО	10	600—1 500	0,22/0,38—3	55—200	0,74—0,90	4,4—7,4
АО	11	600—1 500	0,38—6	160—400	0,83—0,91	5,1—7,2
А, АЗ	12 и 13	500—1 500	3—6	160—1 250	0,79—0,90	4,1—6,2
АО (ДАЗО)	12 и 13	500—1 500	3—6	160—1 000	0,77—0,90	4,1—6,8
АН	14 и 16	375—1 000	6	200—2 000	0,69—0,89	3,9—6,5
ДАЗ		1 500	3—10	1 100—2 000	0,82—0,84	4,7—6,4
ДА		500—750	6	900—1 050	0,83—0,86	4,2—5,3
ДДП		600—1 500	6	800—1 250	0,86—0,90	4,0—4,5
АДТ			3—6	500—1 250	0,89—0,90	5,5—5,6

Основные параметры реакторов

Тип	Номинальное напряжение, кВ	Номинальный ток, кА	Реактивность x_L , %	Коэффициент связи k	Условное изображение, схема замещения и выражения для определения ее элементов
РБ и РБА	6	0,15—0,75	3—10		
		1,0	4—10		
		1,5	5—10		
		2,0	6—12		
		2,5	12		
		3,0; 4,0	8—12		
	10	0,15—0,50	3—8		
		0,6	3—10		
		0,75; 1,0	5—10		
		1,5	5—10		
		2,0	6—12		
		2,5	12		
		3,0; 4,0	8—12		
РБАС	6	0,6	4; 6	0,46	
		1,0	4—10	0,44—0,53	
		1,5	6—10	0,57—0,62	
		2,0	8—12	0,50—0,55	
		2,5	10—15	0,47—0,49	
		3,0	12; 15	0,41; 0,44	
	10	0,6	4; 6	0,48; 0,51	
		1,0	4—10	0,47—0,60	
		1,5	6—10	0,41—0,63	
		2,0	8—12	0,55—0,58	
		2,5	10—15	0,53—0,54	
		3,0	12; 15	0,47; 0,49	

Примечания: 1. Шкалы реактивностей (%) реакторов: типа РБ и РБА—3, 4, 5, 6, 8, 10, 12; типа РБАС—4, 6, 8, 10, 12, 15.

2. Для реакторов типа РБАС номинальный ток указан для каждой ветви реактора.

3. Предельные значения коэффициента связи k в большинстве случаев соответствуют не предельным, а промежуточным реактивностям реакторов типа РБАС.

Напряжения короткого замыкания ($u_{к\%}$) трансформаторов и автотрансформаторов

А. Двухобмоточные трансформаторы

Номинальная мощность, <i>Мва</i>	Высшее номинальное напряжение, <i>кв</i>	$u_{к}$
а) Трехфазные		
0,18—5,6	6; 10; 20;	5,5
0,18—1,8	35	6,5
3,2	35; 38,5	7,0
5,6—10	35; 38,5	7,5
15—31,5	35; 38,5	8,0
40,5	35; 38,5	8,5
3,2—250	110; 121	10—12,8
10—125	150; 169	12—14
63—630	230; 242	12—13
180—400	347	11,3—12,7

б) Трехфазные для собственных пуск станций

0,56—1,0	3,15; 6,3	8,0
1,8—5,6	10,5; 15,75	8,0
20	20	8,0*
10	10,5—36,75	14,0
25	15,75—36,75	9,5*
31,5	15,75—20	10,5*
32	20	11,5*

в) Однофазные

70	$121/\sqrt{3}$	10,7
66,7	$230/\sqrt{3}$	12,6
72	$242/\sqrt{3}$	13,9
135	$525/\sqrt{3}$	13,4
210; 417	$525/\sqrt{3}$	13,0

Продолжение приложения П-7

Б. Трехфазные трехобмоточные трансформаторы

Номинальная мощность, <i>Мва</i>	Высшее номинальное напряжение, <i>кв</i>	Напряжения к. з. между обмотками		
		BC	BH	CH
5,6—7,5	110; 121	10,5 17,0	17,0 10,5	6,0 6,0
15—60	150; 154	12,5 17,5	17,5 12,5	5,0 5,0
20	220	12,3	18,8	6,0
40	230	12,5	20,5	7,5

В. Автотрансформаторы

Номинальная мощность, <i>Мва</i>	Высшее номинальное напряжение, <i>кв</i>	Напряжения к. з. между обмотками		
		BC	BH	CH

а) Трехфазные

180	150	3,6	42,0	37,5
90	158	6,2	73,0	62,0
180	165	6,0	47,1	38,6
30—60	220; 230	9,5	34,0	23,0
120—240	220; 230	11,0	37,0	23,0
180—240	242	13,0	12,0	18,0
120—240	330	11,0	39,0	24,0
250	550	10,4	24,0	12,4

б) Однофазные

60	$220/\sqrt{3}$	8,4	27,9	17,8
80	$220/\sqrt{3}$	13,3	35,0	22,8
120	$242/\sqrt{3}$	13,5	17,7	17,7
138	$242/\sqrt{3}$	16,0	14,3	20,4

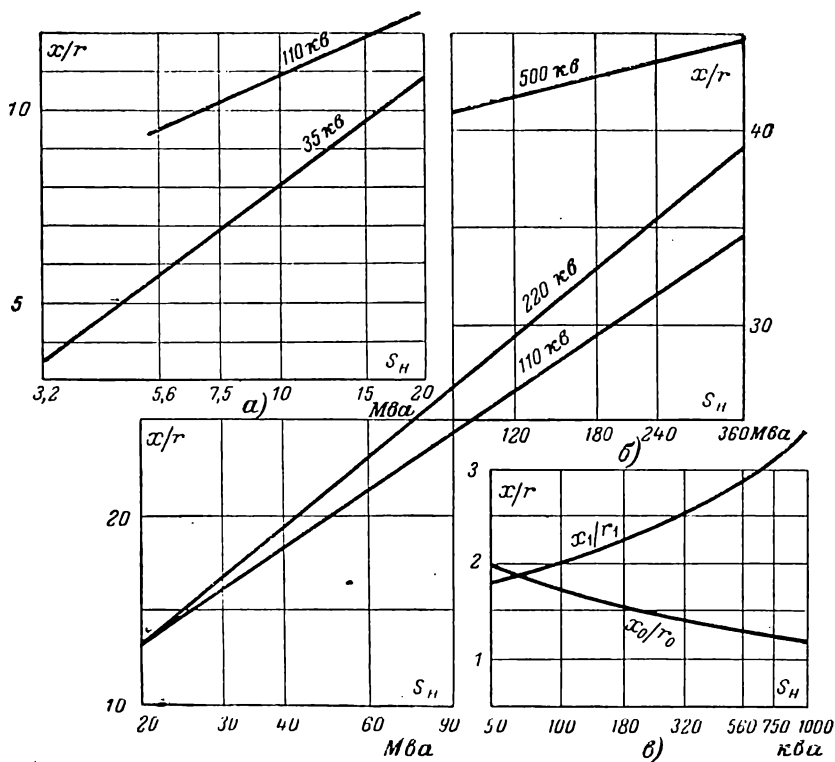
Продолжение приложения П-7

Номинальная мощность, Мва	Высшее номинальное напряжение, кВ	Напряжения к. з. между обмотками		
		BC	ВН	СН
90	$500/\sqrt{3}$	9,2	18,3	8,0
135	$500/\sqrt{3}$	9,2	30,2	20,0
250	$500/\sqrt{3}$	10,0	33,8	22,5

Примечания: 1. Составлено по данным Справочника на силовые трансформаторы Московского отделения ВГПИ Теплоэлектропроект, 1962 г.

2. Напряжения короткого замыкания отнесены к номинальной мощности трансформатора или автотрансформатора, за исключением отмеченных*, которые отнесены к половине номинальной мощности трансформатора.

3. Приведенные на рис. П-7 кривые дают примерные величины отношения сопротивлений прямой последовательности x_1/r_1 трансформатора (или автотрансформатора) в зависимости от номинальной мощности последнего; на рис. П-7,в помимо того приведена примерная кривая отношения сопротивлений нулевой последовательности x_0/r_0 трансформатора мощностью до 1000 кВа, при этом предполагается, что соединение обмоток трансформатора Y_0/Y_0 и его магнитопровод — трехстержневой.



А. Схемы замещения прямой последовательности трансформаторов и автотрансформаторов

Трансформатор, автотрансформатор	Схема замещения	Трансформатор, автотрансформатор	Схема замещения
а)	б)	в)	г)
д)	е)	ж)	з)
и)	к)	л)	м)
п)	о)	р)	с)
т)	у)	ф)	х)
ц)	ч)	ш)	щ)
ш)	щ)	щ)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)
х)	х)	х)	х)

Продолжение приложения П-8

Б. Формулы для определения реактивностей элементов схем замещения прямой последовательности трансформаторов и автотрансформаторов

Наименование трансформатора или автотрансформатора	Номера рисунков схем замещения и формулы для определения ее элементов
Двухобмоточный трансформатор с расщепленной на две цепи обмоткой низшего напряжения (рис. П-8,в)	(рис. П-8,з) $x_{H_1} = x_{H_2} = 2x_{ВН}$
Двухобмоточный трансформатор с расщепленной на три цепи обмоткой низшего напряжения (рис. П-8,д)	(рис. П-8,с) $x_{H_1} = x_{H_2} = x_{H_3} = 3x_{ВН}$
Трехобмоточный трансформатор (рис. П-8,ж)	(рис. П-8,и) $x_B = 0,5(x_{ВС} + x_{ВН} - x_{СН})$ $x_C = 0,5(x_{ВС} + x_{СН} - x_{ВН})$ $x_H = 0,5(x_{ВН} + x_{СН} - x_{ВС})$
Автотрансформатор с обмоткой низшего напряжения (рис. П-8,з)	(рис. П-8,м) $x_B = 0,5(x_{ВС} + x_{ВН} - x_{СН})$ $x_C = 0,5(x_{ВС} + x_{СН} - x_{ВН})$ $x'_H = 0,5(x_{ВН} + x_{СН} - x_{ВС} - x_p)$ $x_{H_1} = x_{H_2} = 0,5x_p$
Трехобмоточный трансформатор с расщепленной на две цепи обмоткой низшего напряжения (рис. П-8,к)	
Автотрансформатор с расщепленной на две цепи обмоткой низшего напряжения (рис. П-8,л)	

Наименование трансформатора или автотрансформатора	Номера рисунков схемы замещения и формулы для определения ее элементов
Автотрансформатор с расщепленной на две цепи обмоткой низшего напряжения (рис. П-8,л)	Для повышающих трансформаторов и автотрансформаторов $x_p = 4 (x_{ВН} // x_{СН})$ Для понижающих трансформаторов и автотрансформаторов (при $x_C \approx 0$) $x_p = 4x_{СН}$
Трехобмоточный трансформатор с расщепленной на три цепи обмоткой низшего напряжения (рис. П-8,н)	(рис. П-8,н) $x_B = 0,5 (x_{ВС} + x_{ВН} - x_{СН})$ $x_C = 0,5 (x_{ВС} + x_{СН} - x_{ВН})$ $x'_H = 0,5 \left(x_{ВН} + x_{СН} - x_{ВС} - \frac{x_p}{3} \right)$ $x_{H_1} = x_{H_2} = x_{H_3} = 0,5x_p$
Автотрансформатор с расщепленной на три цепи обмоткой низшего напряжения (рис. П-8,о)	Для повышающих трансформаторов и автотрансформаторов $x_p = 6 (x_{ВН} // x_{СН})$ Для понижающих трансформаторов и автотрансформаторов (при $x_C \approx 0$) $x_p = 6x_{СН}$

Наименование трансформатора или автотрансформатора	Номера рисунков, схемы замещения и формулы для определения ее элементов
Четырехобмоточный трансформатор (рис. П-8,р)	(рис. П-8,с) $x_B = 0,5 [(x_{BC_1} + x_{BC_2} - x_{C_1C_2}) - (x_{FJ} // x_{FG})]$ $x_{C_1} = 0,5 [(x_{BC_1} + x_{C_1H} - x_{BH}) - (x_{FG} // x_{GN})]$ $x_{C_2} = 0,5 [(x_{BC_2} + x_{C_2H} - x_{BH}) - (x_{FJ} // x_{JN})]$ $x_H = 0,5 [(x_{C_1H} + x_{C_2H} - x_{C_1C_2}) - (x_{JN} // x_{GN})]$ $x_{FG} = x_{JN} = \sqrt{x_1 x_2} + x_1$ $x_{FJ} = x_{GN} = \sqrt{x_1 x_2} + x_2$ где: $x_1 = x_{BH} + x_{C_1C_2} - x_{BC_2} - x_{C_1H}$ $x_2 = x_{BH} + x_{C_1C_2} - x_{BC_1} - x_{C_2H}$
Пятиобмоточный трансформатор (рис. П-8,т)	(рис. П-8,у) $x_B = 0,5 (x_{BC_1} + x_{BC_2} - x_{C_1C_2}) - \frac{x_{FG} x_{FJ}}{\Sigma x}$ $x_{C_1} = 0,5 (x_{BC_1} + x_{C_1H} - x_{BH}) - \frac{x_{FG} x_{GN}}{\Sigma x}$

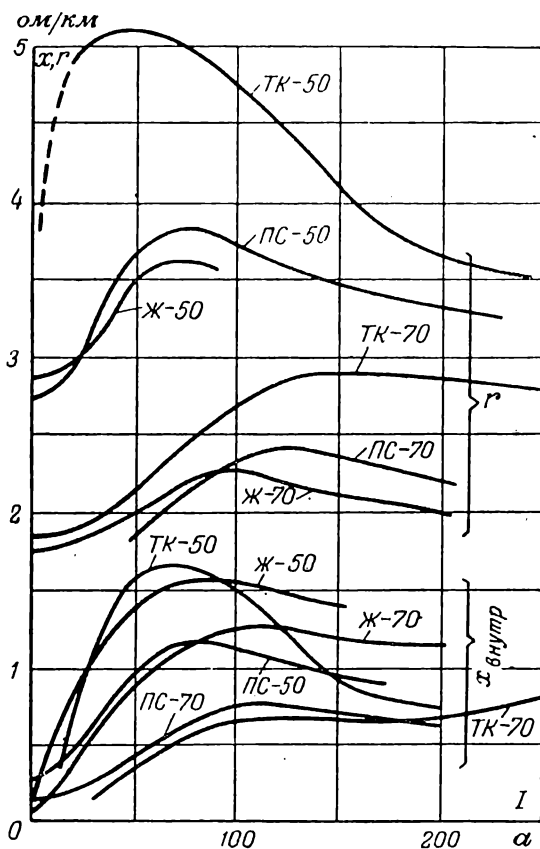
Наименование трансформатора или автотрансформатора	Номера рисунков схем замещения и формулы для определения ее элементов
Пятиобмоточный трансформатор (рис. П-8,м)	$x_{C_3} = 0,5 (x_{BC_3} + x_{C_3C_3} - x_{BC_3}) - \frac{x_{FJ}x_{JL}}{\Sigma x}$ $x_{C_3} = 0,5 (x_{C_2C_3} + x_{C_3H} - x_{C_3H}) - \frac{x_{JL}x_{LN}}{\Sigma x}$ $x_H = 0,5 (x_{C_3H} + x_{C_1H} - x_{C_1C_3}) - \frac{x_{GN}x_{LN}}{\Sigma x}$ $x_{FG} = \frac{x}{2x_4x_5}, \quad x_{FJ} = \frac{x}{2x_2x_5}, \quad x_{JL} = \frac{x}{2x_1x_2}$ $x_{GN} = \frac{x}{2x_3x_4}, \quad x_{LN} = \frac{x}{2x_1x_3}$ где: $x_1 = x_{BH} + x_{C_1C_2} - x_{BC_1} - x_{C_2H} = \frac{x_{BC_2}x_{C_1H}}{\Sigma x}$

Продолжение приложения П-8,Б

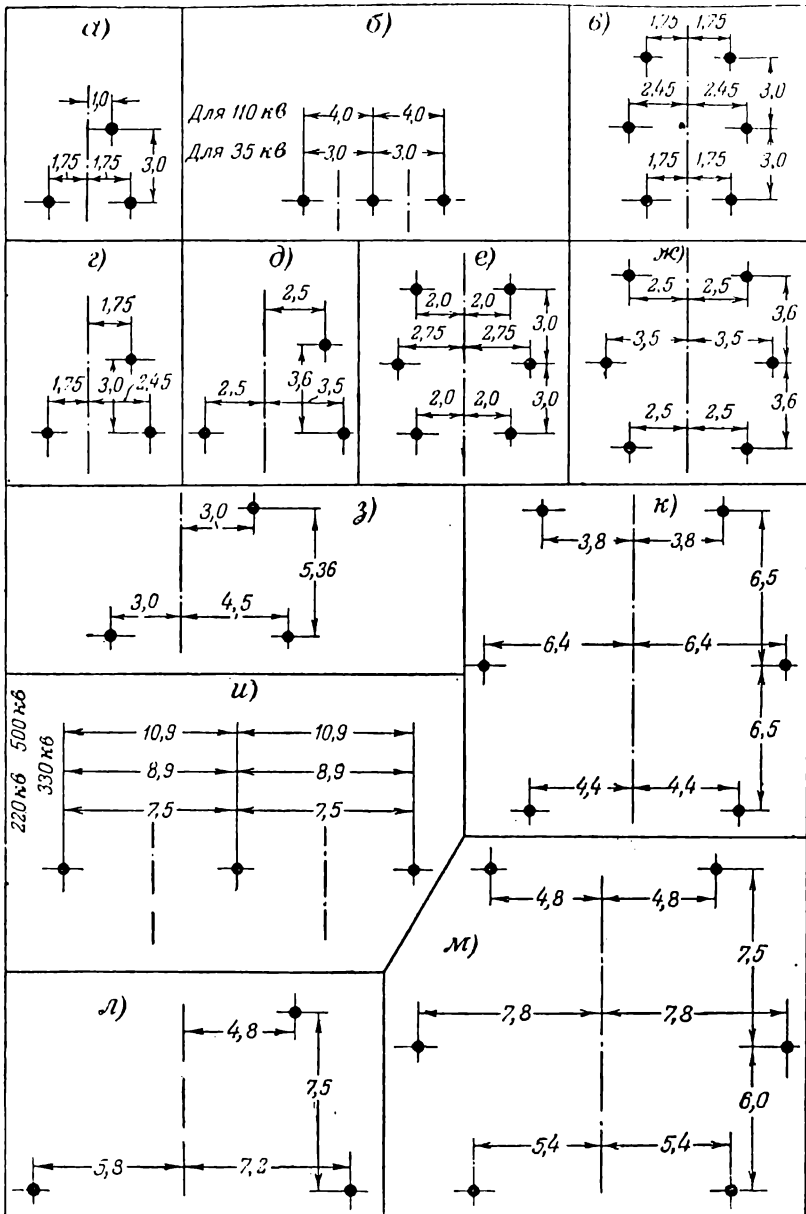
Наименование трансформатора или автотрансформатора	Номера рисунков схемы замещения и формулы для определения ее элементов
Пятиобмоточный трансформатор (рис. П-8,м)	$x_2 = x_{BH} + x_{C_1C_3} - x_{BC_3} - x_{C_1H} = \frac{x_{BC_1}x_{C_3H}}{\Sigma x}$ $x_3 = x_{BC_3} + x_{C_1C_2} - x_{BC_2} - x_{C_1C_3} = \frac{x_{BC_1}x_{C_2C_3}}{\Sigma x}$ $x_4 = x_{BC_3} + x_{C_2H} - x_{BH} - x_{C_2C_3} = \frac{x_{BC_2}x_{C_3H}}{\Sigma x}$ $x_5 = x_{C_1C_3} + x_{C_2H} - x_{C_1C_2} - x_{C_3H} = \frac{x_{C_1H}x_{C_2C_3}}{\Sigma x}$ $\Sigma x = x_{FG} + x_{FJ} + x_{JL} + x_{GN} + x_{LN}$ $x = x_1x_2x_3 + x_1x_2x_5 + x_1x_3x_4 + x_2x_4x_5 + x_3x_3x_5$

П р и м е ч а н и е. Приведенные схемы замещения двухобмоточных трансформаторов с расщепленной обмоткой низшего напряжения, а также формулы для определения x_p трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов с расщепленной обмоткой низшего напряжения соответствуют концентрическому расположению обмоток на магнитопроводе. Кроме того, предполагается, что при расщеплении обмотки низшего напряжения на три цепи магнитопровод трансформатора или автотрансформатора имеет четыре или пять сердечников, на трех из которых размещено по одной параллельной обмотке высшего и среднего (для трехобмоточных трансформаторов) напряжений и по одной цепи обмотки низшего напряжения.

Параметры стальных проводов



А. Расположение проводов типовых воздушных линий передачи (размеры в метрах)



Б. Индуктивные сопротивления воздушных линий передачи

Номинальное напряжение линии, кВ	Расположе- ние проводов по рисунку	Материал опор	Число и марка прово- дов в фазе одной цепи	Число цепей	Расстояние между цепя- ми, м	Индуктивное сопротивление		Отношение x_0/x_1
						x_1	x_0	
						ом/км одной цепи		
35	П-10, а	Жб	1×АС-95	1 2	— 14,50	0,398 0,398	1,465 2,265	3,68 5,69
	П-10, б	Др	1×АС-95	1 2	— 14,50	0,400 0,398	1,443 2,236	3,58 5,61
	П-10, в	Жб	1×АС-120	1 2	— 5,03	0,396 0,396	1,445 2,445	3,65 6,17
110	П-10, г	Жб	1×АС-150	1 2	— 30,00	0,389 0,389	1,435 2,100	3,69 5,40
	П-10, д	Мт	1×АС-150	1 2	— 30,00	0,408 0,408	1,400 2,064	3,43 5,05
	П-10, е	Др	1×АС-120	1 2	— 30,00	0,413 0,413	1,410 2,074	3,42 5,03
	П-10, ж	Жб	1×АС-185	1 2	— 5,53	0,382 0,382	1,430 2,414	3,75 6,31
	П-10, з	Мт	1×АС-185	1 2	— 6,80	0,394 0,394	1,410 2,353	3,58 5,97
220	П-10, и	Жб	1×АСО-300	1 2	— 40,00	0,407 0,407	1,340 1,949	3,30 4,79
	П-10, к	Жб, М	1×АСО-400	1 2	— 40,00	0,425 0,425	1,305 1,914	3,07 4,50
	П-10, л	Мт	1×АСО-400	1 2	— 11,50	0,418 0,418	1,320 2,165	3,15 5,18

Продолжение приложения П-10

Номинальное напряжение линии, кВ	Расположе- ние проводов по рисунку	Материал опор	Число и марка прово- дов в фазе одной цепи	Число цепей	Расстояние между цепями, м	Индуктивное сопротивление		Отношение x_0/x_1
						x_1	x_0	
						ом/км одной цепи		
330	П-10, и	Жб	2×АСО-400	1 2	— 50,00	0,318 0,318	1,320 1,887	4,15 5,93
	П-10, л	Мт	2×АСО-300	1 2	— 50,00	0,322 0,322	1,322 0,889	4,11 5,86
	П-10, м	Мт	2×АСО-300	1 2	— 14,04	0,308 0,308	1,340 2,145	4,35 6,96
500	П-10, и	Жб	3×АСО-400	1 2	— 50,00	0,295 0,295	1,270 1,837	4,30 6,22

Примечания: 1. Обозначения материала опор: Жб — железобетон, Мт — металл, Др — дерево.

2. Расстояние между цепями дано как среднее геометрическое, т. е. по (13-37).

3. Эквивалентная глубина возврата тока через землю принята 1 000 м.

Приложение П-11

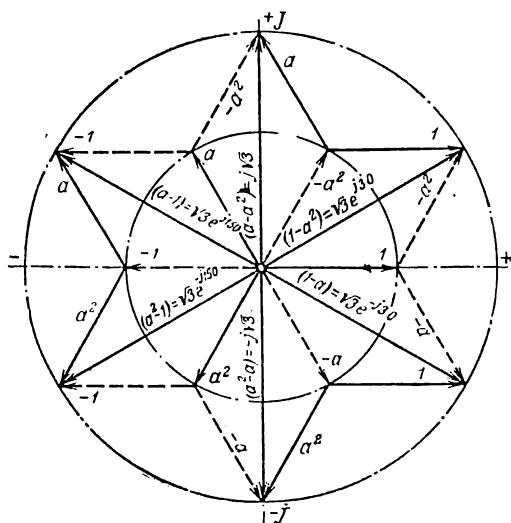
Сопротивления прямой последовательности кабелей

Сечение жилы, мм²	Активное сопротивление жилы¹, ом/км		Индуктивное сопротивление, ом/км				Емкостное сопротивление, 10³.ом на 1 км			
	Медь	Алюминий	Номинальное напряжение кабеля, кв							
			6	10	20	35	6	10	20	35
25	0,740	1,280	0,085	0,094	0,135	—	11,0	13,9	17,6	—
35	0,540	0,920	0,079	0,088	0,129	—	9,6	12,2	15,9	—
50	0,390	0,640	0,076	0,082	0,119	—	8,4	10,6	13,9	—
70	0,280	0,460	0,072	0,079	0,116	0,132	7,1	10,0	12,2	15,9
95	0,200	0,340	0,069	0,076	0,110	0,126	6,1	8,4	11,0	14,7
120	0,158	0,270	0,069	0,076	0,107	0,119	5,6	7,6	10,3	13,9
150	0,123	0,210	0,066	0,072	0,104	0,116	4,9	6,9	9,4	12,6
185	0,103	0,170	0,066	0,069	0,100	0,113	4,4	6,1	8,6	11,8

¹ При +20° С.

Основные соотношения метода симметричных составляющих

Основные свойства оператора



$$a = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} +$$

$$+ j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$a^2 = e^{j240^\circ} = e^{-j120^\circ} =$$

$$= -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$a^3 = e^{j360^\circ} = 1$$

$$a^{3n+q} = a^q$$

$$a^2 + a + 1 = 0$$

$$a^2 - a = \sqrt{3} e^{-j90^\circ} =$$

$$= -j \sqrt{3}$$

$$a - a^2 = \sqrt{3} e^{j90^\circ} = j \sqrt{3}$$

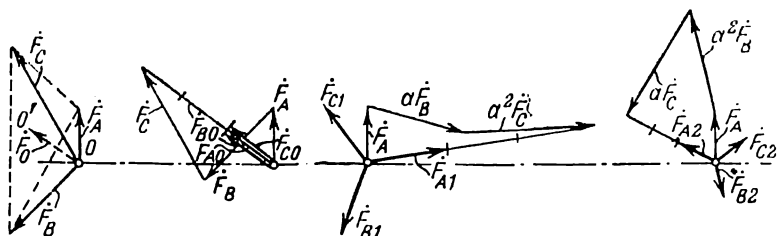
$$1 - a = \sqrt{3} e^{-j30^\circ} =$$

$$= \sqrt{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} - j \frac{1}{2} \right)$$

$$1 - a^2 = \sqrt{3} e^{j30^\circ} =$$

$$= \sqrt{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + j \frac{1}{2} \right)$$

Разложение фазных величин на симметричные составляющие



нулевой последовательности $\dot{F}_0 = \frac{1}{3} (\dot{F}_A + \dot{F}_B + \dot{F}_C)$

прямой „ $\dot{F}_{A1} = \frac{1}{3} (\dot{F}_A + a\dot{F}_B + a^2\dot{F}_C)$

обратной „ $\dot{F}_{A2} = \frac{1}{3} (\dot{F}_A + a^2\dot{F}_B + a\dot{F}_C)$

Определение фазных величин по симметричным составляющим:

для фазы A

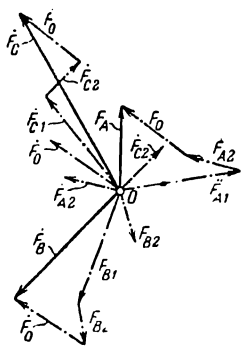
$$\dot{F}_A = \dot{F}_{A1} + \dot{F}_{A2} + \dot{F}_{A0}$$

для фазы B

$$\begin{aligned} \dot{F}_B &= \dot{F}_{B1} + \dot{F}_{B2} + \dot{F}_{B0} = a^2\dot{F}_{A1} + \\ &+ a\dot{F}_{A2} + \dot{F}_{A0} \end{aligned}$$

для фазы C

$$\begin{aligned} \dot{F}_C &= \dot{F}_{C1} + \dot{F}_{C2} + \dot{F}_{C0} = a\dot{F}_{A1} + \\ &+ a^2\dot{F}_{A2} + \dot{F}_{A0} \end{aligned}$$



№ приложения	Исходная схема	Схема замещения
П 13,7		
П-13,8		
П-13,9		
П-13,10		
П-13,11		

№ рисунка	Выражения для элементов схемы замещения
П-13,1-б	$a = \frac{x_1 x_2 - x_{12}^2}{x_2}; \quad b = \frac{x_1 x_2 - x_{12}^2}{x_1};$ $c = \frac{x_1 x_2 - x_{12}^2}{x_{12}} = -d$
П-13,1-в	$a = x_1; \quad b = x_2; \quad c = -x_{12}; \quad d = -c = x_{12}$
П-13,2-б	$a = x_1 - x_{12}; \quad b = x_2 - x_{12}; \quad c = x_{12}$
П-13,2-в	$a = \frac{x_1 x_2 - x_{12}^2}{x_2 - x_{12}}; \quad b = \frac{x_1 x_2 - x_{12}^2}{x_1 - x_{12}}; \quad c = \frac{x_1 x_2 - x_{12}^2}{x_{12}}$
П-13,3-б	$a = \frac{x_1 x_2 - x_{12}^2}{x_2 - x_{12}}; \quad b = \frac{x_1 x_2 - x_{12}^2}{x_1 - x_{12}};$ при $x_1 = x_2$ $a = x_1 + x_{12} = b$
П-13,3-в	$x_3 = \frac{x_1 x_2 - x_{12}^2}{x_1 + x_2 - 2x_{12}}; \quad \text{при } x_1 = x_2 \quad x_3 = \frac{x_1 + x_{12}}{2}$
П-13,4-б	$a = \frac{\Delta}{x_2 x_3 - x_{23}^2}; \quad b = \frac{\Delta}{x_1 x_3 - x_{13}^2}; \quad c = \frac{\Delta}{x_1 x_2 - x_{12}^2}$ $d = \frac{\Delta}{x_3 x_{12} - x_{13} x_{23}}; \quad e = \frac{\Delta}{x_1 x_{23} - x_{13} x_{12}};$ $f = \frac{\Delta}{x_2 x_{13} - x_{12} x_{23}}$ $m = -d; \quad p = -c; \quad s = -f,$ где $\Delta = x_1 x_2 x_3 - x_1 x_{23}^2 - x_2 x_{13}^2 - x_3 x_{12}^2 + 2x_{12} x_{13} x_{23}$

Продолжение приложения П-13

№ рисунка	Выражения для элементов схемы замещения
П-13,4-б	$a = -2 \frac{x_{12}x_{13}}{x_{23}}; \quad b = -2 \frac{x_{12}x_{23}}{x_{13}}; \quad c = -2 \frac{x_{13}x_{23}}{x_{12}}$ $d = -2x_{12}; \quad e = -2x_{23}; \quad f = -2x_{13}; \quad m = -d;$ $p = -e; \quad s = -f$
П-13,5-б	$a = \frac{\Delta}{x_2x_3 - x_{23}^2 + x_{13}x_{23} - x_3x_{12} + x_{12}x_{23} - x_2x_{13}}$ $b = \frac{\Delta}{x_{13}x_{23} - x_3x_{12} + x_1x_3 - x_{13}^2 + x_{12}x_{13} - x_1x_{23}}$ $c = \frac{\Delta}{x_{12}x_{23} - x_2x_{13} + x_{12}x_{13} - x_1x_{23} + x_1x_2 - x_{12}^2}$ $d = \frac{\Delta}{x_3x_{12} - x_{13}x_{23}}; \quad e = \frac{\Delta}{x_1x_{23} - x_{12}x_{13}};$ $f = \frac{\Delta}{x_2x_{13} - x_{12}x_{23}},$ где $\Delta = x_1x_2x_3 - x_1x_{23}^2 - x_2x_{13}^2 - x_3x_{12}^2 + 2x_{12}x_{13}x_{23}$
П-13,5-в	$a = x_1 - x_{12} - x_{23} + x_{13}; \quad b = x_2 - \frac{x_{12}x_{23}}{x_{13}}$ $c = x_3 - x_{12} - x_{23} + x_{13}; \quad f = x_{23} + x_{12}$ $d = \frac{(x_{23} + x_{12})(x_{23} - x_{13})}{x_{13}};$ $e = \frac{(x_{23} + x_{12})(x_{12} - x_{13})}{x_{13}}$

№ рисунка	Выражения для элементов схемы замещения
П-13,5-з	$a = x_1 - x_{12}; \quad b = x_2 - x_{12}; \quad c = x_3 - x_{13};$ $d = x_{12} - x_{13}; \quad e = x_{13}$
П-13,5-д	$a = x_1 - x_{12}; \quad b = x_2 - x_{12}; \quad c = x_3 - x_{12}; \quad d = x_{12}$
П-13,6-б	Для определения параметров элементов полного многоугольника необходимо: 1) для исходной схемы составить матрицу реактивностей $x = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & \dots & n \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ \dots \\ n \end{matrix} & \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \dots & x_{2n} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & \dots & x_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & x_{n3} & \dots & x_{nn} \end{bmatrix} \end{matrix},$ которая удовлетворяет условию $U = xI,$ где U — матрица падений напряжений по линиям; I — матрица токов линий; 2) найти транспонированную матрицу x_t путем замены строк соответствующими столбцами матрицы x; 3) найти союзную матрицу C_x, каждый элемент которой равен алгебраическому дополнению соответствующего элемента матрицы x_t; 4) найти обратную матрицу x^{-1} путем деления каждого элемента матрицы C_x на детерминант Δ матрицы x. Найденная обратная матрица равна матрице проводимостей исходной схемы

№ рисунка	Выражения для элементов схемы замещения																																				
П-13,6-б	$x^{-1} = y =$ <table><tr><td></td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>...</td><td>n</td></tr><tr><td>1</td><td>y_{11}</td><td>y_{12}</td><td>y_{13}</td><td>...</td><td>y_{1n}</td></tr><tr><td>2</td><td>y_{21}</td><td>y_{22}</td><td>y_{23}</td><td>...</td><td>y_{2n}</td></tr><tr><td>3</td><td>y_{31}</td><td>y_{32}</td><td>y_{33}</td><td>...</td><td>y_{3n}</td></tr><tr><td>...</td><td>...</td><td>...</td><td>...</td><td>...</td><td>...</td></tr><tr><td>n</td><td>y_{n1}</td><td>y_{n2}</td><td>y_{n3}</td><td>...</td><td>y_{nn}</td></tr></table>		1	2	3	...	n	1	y_{11}	y_{12}	y_{13}	...	y_{1n}	2	y_{21}	y_{22}	y_{23}	...	y_{2n}	3	y_{31}	y_{32}	y_{33}	...	y_{3n}	...	...	...	...	...	...	n	y_{n1}	y_{n2}	y_{n3}	...	y_{nn}
		1	2	3	...	n																															
1	y_{11}	y_{12}	y_{13}	...	y_{1n}																																
2	y_{21}	y_{22}	y_{23}	...	y_{2n}																																
3	y_{31}	y_{32}	y_{33}	...	y_{3n}																																
...	...	...	...	...	...																																
n	y_{n1}	y_{n2}	y_{n3}	...	y_{nn}																																
	Искомые реактивности элементов полного многоугольника определяют по найденным элементам матрицы y как $x_{jj'} = \frac{1}{y_{jj'}}; \quad x_{jk} = x_{j'k} = \frac{1}{-y_{jk}}; \quad x_{jk'} = x_{j'k} = \frac{1}{y_{jk}};$ где $j, k = 1, 2, 3, \dots, n$.																																				
П-13,7-б	$a = x_1 - x_{12}; \quad b = x_2 - x_{12}; \quad c = x_3 - x_{34};$ $d = x_4 - x_{34}; \quad e = x_7 + x_{34}; \quad f = x_5 - x_{56};$ $g = x_6 - x_{56}; \quad h = x_8 + x_{56}; \quad m = x_{12}$																																				
П-13,8-б	$a = x_1 - x_{13}; \quad b = x_2 - x_{12}; \quad c = x_3 - x_{34};$ $d = x_4 - x_{34}; \quad e = x_5 + x_{34}; \quad f = x_6; \quad g = x_{12}$																																				
П-13,9-б	$a = x_1 - x_{12}; \quad b = x_2 - x_{12}; \quad c = x_3 - x_{34};$ $d = x_4 - x_{34}; \quad e = x_7 + x_{34}; \quad f = x_5 + x_8 - x_{56};$ $g = x_6 + x_9 - x_{56}; \quad h = x_{56}; \quad m = x_{12}$																																				

№ рисунка	Выражения для элементов схемы замещения
П-13,10-б	$a = x_1 - x_{12}; \quad b = x_2 - x_{12}; \quad c = x_3 - x_{34};$ $d = x_4 - x_{34}; \quad e = x_5 - x_{56}; \quad f = x_6 - x_{56};$ $g = x_{11} + x_{56}; \quad m = x_8; \quad h = x_9; \quad l = x_{34}; \quad n = x_{12}$
П-13,11-б	$a = x_1 + x_4; \quad b = x_2 + x_5; \quad c = x_3 + x_5,$ где: x_4, x_5, x_6 — реактивности соответствующих лучей схемы замещения трехобмоточного трансформатора или автотрансформатора (см. П-8); дальнейшее преобразование схемы так же, как схемы рис. П-13,5-а; при этом реактивности взаимной индукции должны быть приведены к соответствующим условиям расчета, т. е. при выражении в наименованных единицах, приведенных к ступени напряжения U_{n1}, $x_{mn}^0 = x_{mn} (U_{n1}/U_{n2}),$ при выражении в относительных единицах при базисных условиях $x_{mn}^* = x_{mn} \frac{S_6}{U_{61} \cdot U_{62}},$ где S_6 — базисная мощность, Mva, U_{61}, U_{62} — базисные напряжения, kB, на ступени U_{n1} и U_{n2}.

Примечания.

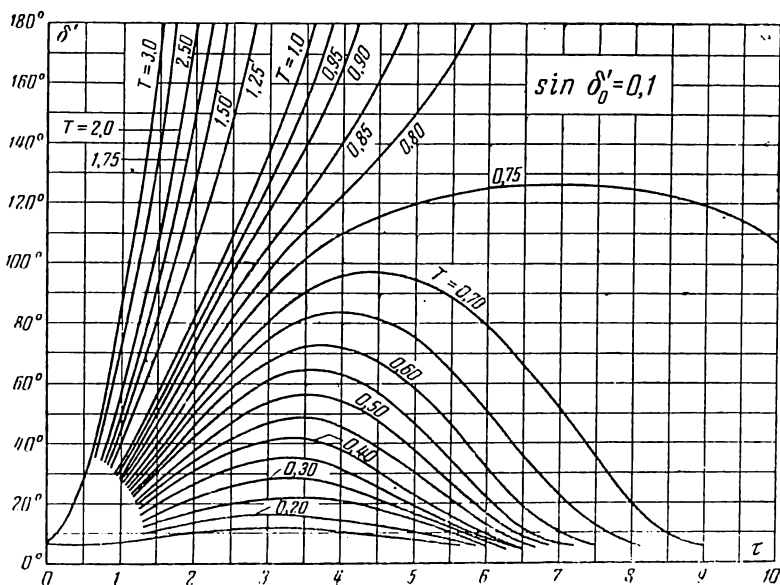
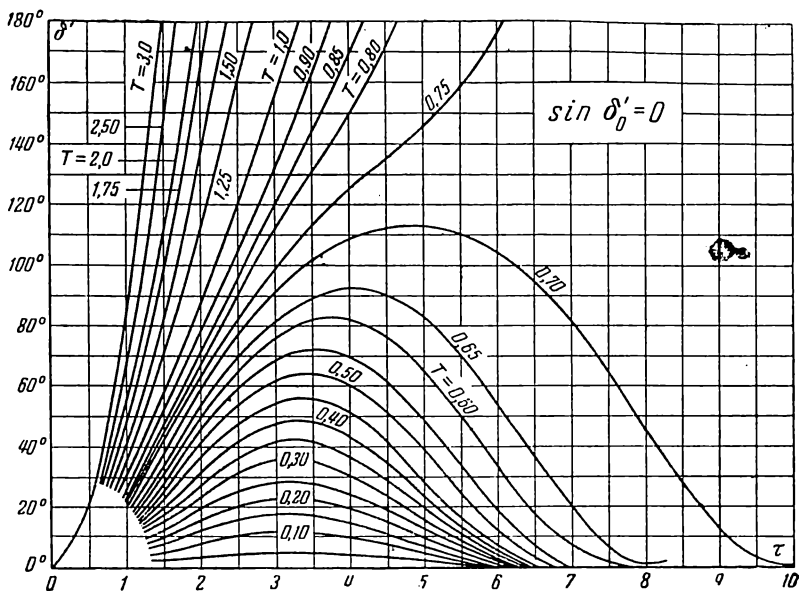
1. При учете активных сопротивлений необходимо сопротивления всех элементов рассматриваемой схемы выразить в комплексной форме.

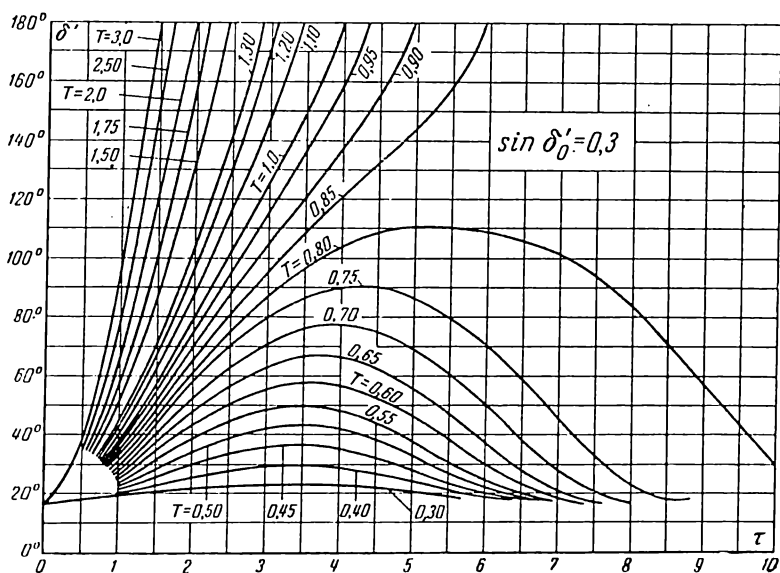
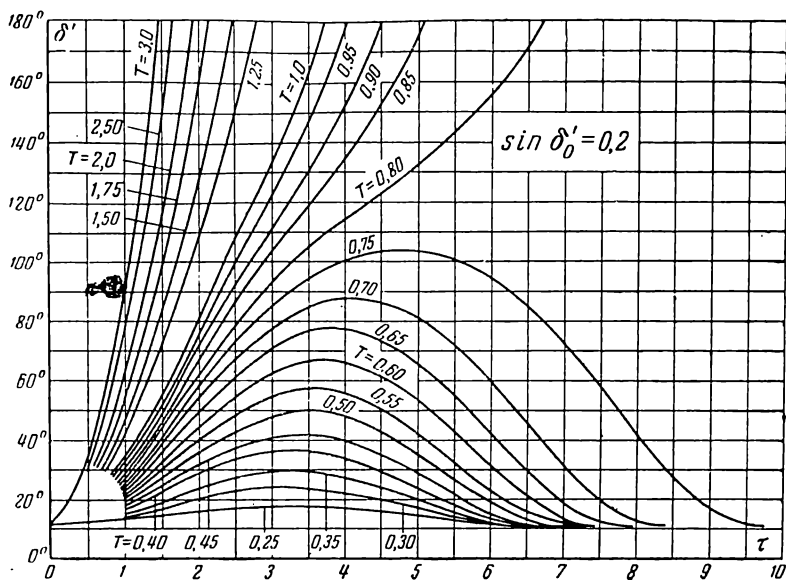
2. Построение схемы замещения рис. П-13,10-б может быть развито для случая, когда от линии имеется любое число ответвлений.

3. В схемах рис. П-13,7—П-13,11 приложенное напряжение нулевой последовательности показано для случая поперечной несимметрии в точке K ; при продольной несимметрии в той же точке напряжение нулевой последовательности должно быть введено в рассечку данной цепи; слева от сечения KK' условно предполагается, что цепи не связаны между собой взаимной индукцией; при наличии такой связи следует использовать соответствующую схему замещения.

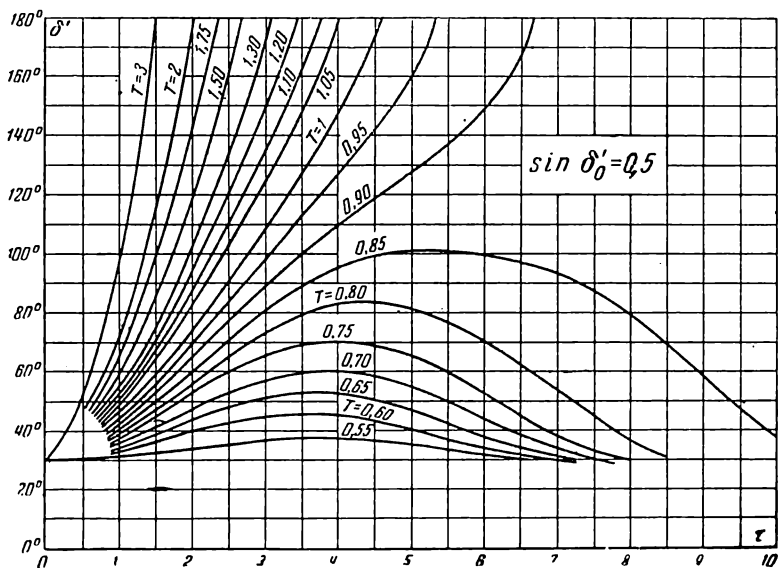
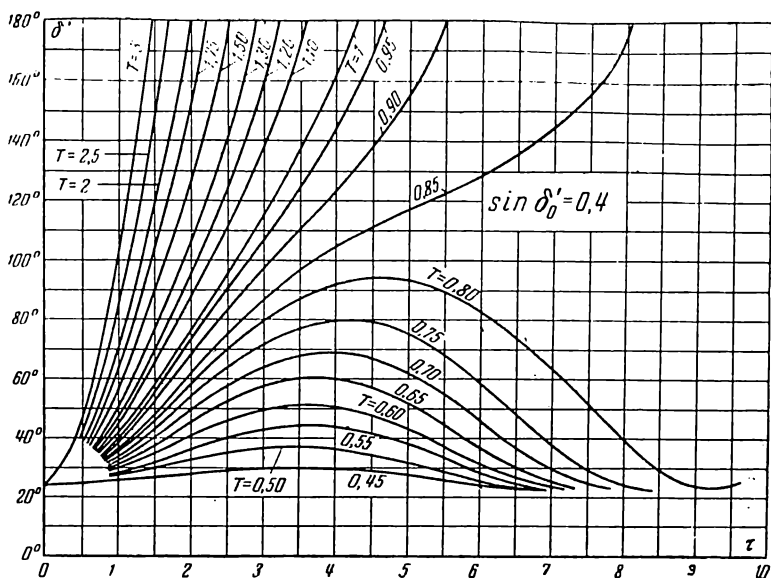
4. Приложение составлено канд. техн. наук доц. Б. Н. Неклепаевым.

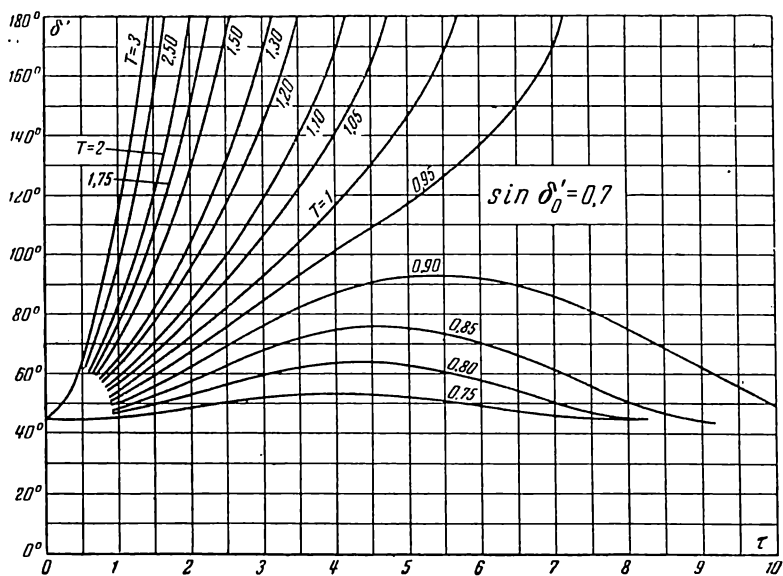
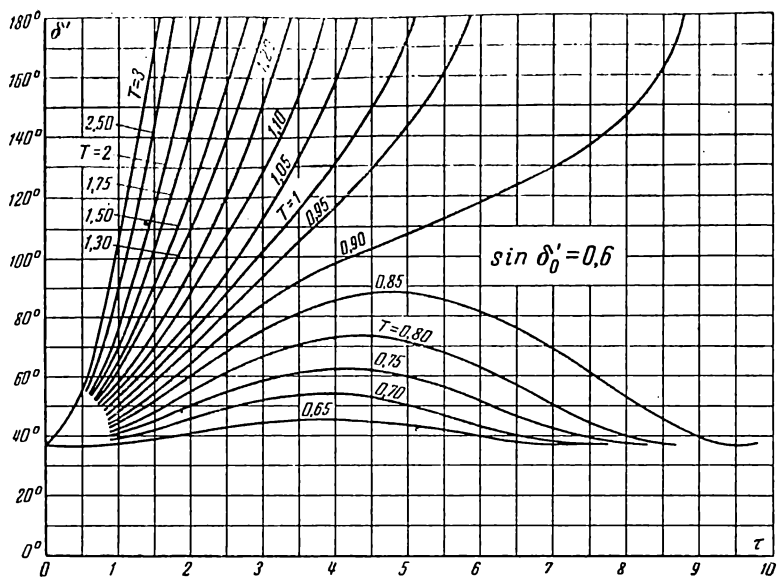
Типовые графики изменения угла δ' в функции от расчетного времени τ

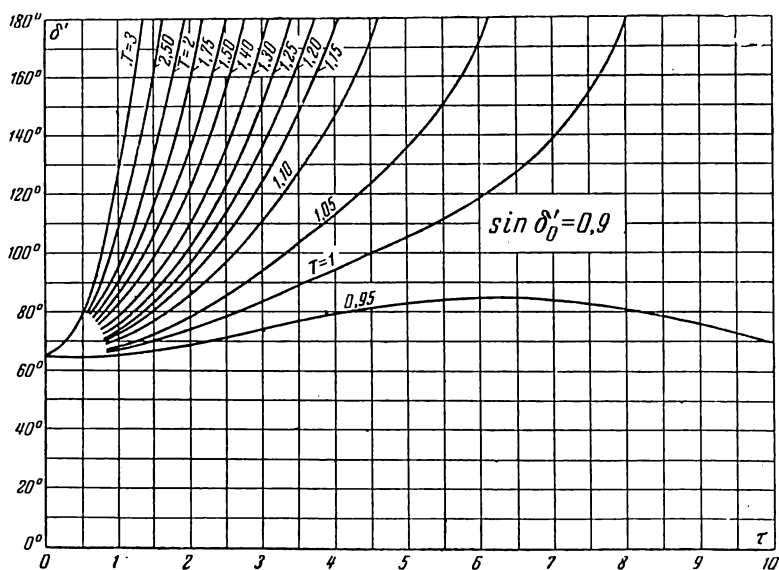
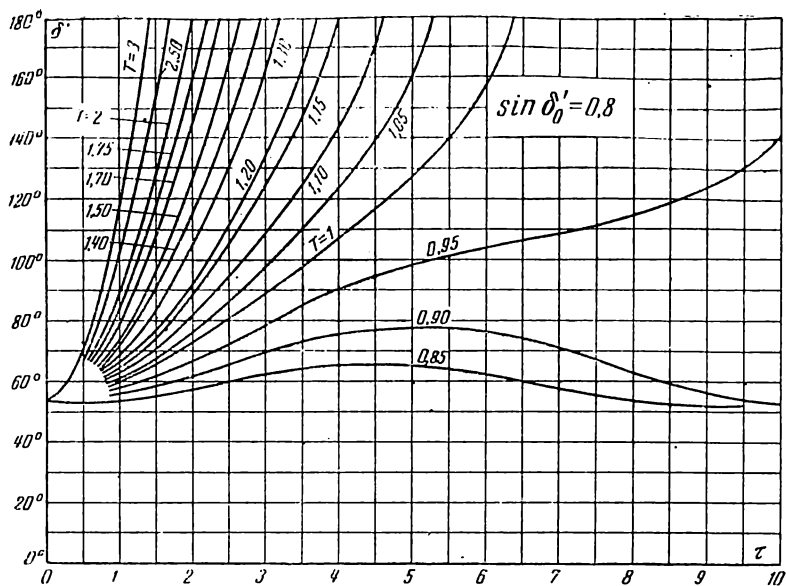




Продолжение приложения П-14







ЛИТЕРАТУРА

1. Общая

1. Зевеке Г. В., Ионкин П. А., Нетушил А. В., Страхов С. В., Теория электрических цепей, Госэнергоиздат, 1963.
2. Под общей редакцией Разевига Д. В., Техника высоких напряжений, Госэнергоиздат, 1963.
3. Нейман Л. Р., Калантаров П. Л., Теоретические основы электротехники, ч. 1 и 2, Госэнергоиздат, 1959.
4. Атабеков Г. И., Теория линейных электрических цепей, изд-во «Советское радио», 1960.
5. Максимович Н. Г., Линейные электрические цепи и их преобразования, Госэнергоиздат, 1961.
6. Карсон Д. Р., Нестационарные явления и операционное исчисление, ДНТВУ, 1934.
7. Круг К. А., Переходные процессы в линейных электрических цепях, Госэнергоиздат, 1948.
8. Гарднер М., Бэрнс Д., Переходные процессы в линейных системах, Гостехиздат, 1949.
9. Глазунов А. А., Глазунов А. А., Электрические сети и системы, Госэнергоиздат, 1960.
10. Маркович И. М., Режимы энергетических систем, Госэнергоиздат, 1963.
11. Мельников Н. А., Расчеты режимов работы сетей электрических систем, Госэнергоиздат, 1950.
12. Вагнер К. Ф., Эванс Р. Д., Метод симметричных составляющих, ОНТИ НКТП СССР, 1936.
13. Щедрин Н. Н., Токи короткого замыкания высоковольтных систем, ОНТИ, 1935.
14. Марголин Н. Ф., Токи короткого замыкания и токи в земле, Специальный курс, вып. I, изд. МЭИ, 1941.
15. Ульянов С. А., Короткие замыкания в электрических системах, Госэнергоиздат, 1952.
16. Жданов П. С., Устойчивость электрических систем, Госэнергоиздат, 1948.
17. Рюденберг Р., Переходные процессы в электроэнергетических системах, Изд-во иностранной литературы, 1955.
18. Костенко М. П., Электрические машины, Специальная часть, Госэнергоиздат, 1949.

19. Горев А. А., Переходные процессы синхронной машины, Госэнергоиздат, 1950.
20. Венников В. А., Жуков Л. А., Переходные процессы в электрических системах, Госэнергоиздат, 1953.
21. Грузов Л. Н., Методы математического исследования электрических машин, Госэнергоиздат, 1953.
22. Лайбль Т., Теория синхронной машины при переходных процессах, Госэнергоиздат, 1957.
23. Лайон В., Анализ переходных процессов в электрических машинах переменного тока, Госэнергоиздат, 1958.
24. Конкордия Ч., Синхронные машины; переходные и установившиеся процессы, Госэнергоиздат, 1959.
25. Кимбарк Э., Синхронные машины и устойчивость электрических систем, Госэнергоиздат, 1960.
26. Важнов А. И., Основы теории переходных процессов синхронной машины, Госэнергоиздат, 1960.
27. Ковач К. П., Рац И., Переходные процессы в машинах переменного тока, Госэнергоиздат, 1963.
28. Городский Д. А., Горохов В. С., Переходные процессы в синхронных машинах, Изд. академии им. Жуковского, 1953.
29. Щедрин Н. Н., Ульянов С. А., Задачи по расчету коротких замыканий, Госэнергоиздат, 1955.
30. Атабеков Г. И., Теоретические основы релейной защиты высоковольтных сетей, Госэнергоиздат, 1957.
31. Петров Г. Н., Электрические машины, ч. 2, Госэнергоиздат, 1963.
32. Федосеев А. М., Основы релейной защиты, Госэнергоиздат, 1961.
33. Васильев А. А., Электрическая часть станций и подстанций, ч. I, Госэнергоиздат, 1963.
34. Clarke E., Circuits analysis of a-c power systems, 1943.

II. По отдельным вопросам

35. Бургсдорф В. В., Открытые электрические дуги большой мощности, «Электричество», 1948, № 10.
36. Горев А. А., Костенко М. В., Приведение сложных сетей к простейшим эквивалентным схемам, «Электричество», 1948, № 3.
37. Ионкин П. А., О схемах замещения электрических цепей с магнитной связью, «Электричество», 1947, № 2.
38. Ионкин П. А., О схемах замещения пассивных многополюсников, «Электричество», 1950, № 11.
39. Башкиров Д. А., Графоаналитические методы построения переходных процессов в системах автоматического регулирования, Основы автоматического регулирования, под редакцией Солодовникова В. В., Машгиз, 1954.
40. Сыромятников И. А., Расчеты токов короткого замыкания с учетом активного сопротивления, «Электрические станции», 1938, № 7.
41. Левин М. С., Ганелин А. И., Графоаналитический метод расчета токов короткого замыкания в сетях со стальными проводами, «Электричество», 1952, № 4.

42. Першина Л. М., Сопротивления стальных проводов при токах короткого замыкания и их простейшее аналитическое выражение, Труды института энергетики АН УзССР, вып. 8.

43. Першина Л. М., Аналитический метод расчета токов короткого замыкания в сетях со стальными проводами, «Электричество», 1961, № 4.

44. Марголин Н. Ф., Определение установившегося тока короткого замыкания в цепи с омическим сопротивлением, питаемой генератором с неявно выраженными полюсами, «Электричество», 1934, № 18.

45. Марголин Н. Ф., Приведение короткого замыкания в цепях с омическим сопротивлением к чисто индуктивному, «Электричество», 1935, № 20.

46. Марголин Н. Ф., О спрямлении характеристики при расчете установившихся токов короткого замыкания, «Электричество», 1935, № 17.

47. Щедрин Н. Н., Характерный пример результатов определения установившихся токов короткого замыкания различными методами, «Электричество», 1929, № 19—20.

48. Городский Д. А., Схема замещения индуктивно нагруженного синхронного генератора, «Электричество», 1934, № 15.

49. Лютер Р. А., Методика расчета токов короткого замыкания синхронной машины с использованием теоремы о постоянстве потокоцеплений для сверхпроводящих контуров, «Электросила», 1947, № 4.

50. Park K. H., Two-reaction theory of synchronous machines, Pt I, Trans. AIEE, 1929; Pt II, Trans. AIEE, 1929.

51. Иосифян А. Г., Теория преобразований дифференциальных уравнений синхронной машины, Доклады АН Арм. ССР, 1947, т. V, № 3.

52. Алябьев М. И., К вопросу о классификации и выборе методов исследования электрических машин, «Электричество», 1959, № 11.

53. Веретенников Л. П., Классификация дифференциальных уравнений Горева—Парка, «Электричество», 1959, № 11.

54. Веретенников Л. П., Вилесов Д. В., К вопросу о различном написании дифференциальных уравнений типа Горева—Парка (в переменных $d, q, 0$), «Электричество», 1959, № 11.

55. Алябьев М. И., Уравнения электрических машин переменного тока в физических и относительных единицах, «Электричество», 1960, № 1.

56. Галалов И. И., Преобразования цепей при анализе электрических машин, «Электричество», 1961, № 4.

57. Колек В., Павлюк К., О форме записи уравнений Горева—Парка, Известия высших учебных заведений, «Энергетика», 1962, № 8.

58. Казовский Е. С., Некоторые вопросы переходных процессов в машинах переменного тока, Госэнергоиздат, 1953.

59. Страхов С. В., Переходные процессы в электрических цепях, содержащих машины переменного тока, Госэнергоиздат, 1960.

60. Глух Е. М., Чалый Г. В., Эттингер Е. Л., Система возбуждения гидрогенераторов, «Электросила», 1956, № 14.

61. Цукерник Л. В., Переходные процессы в системе синхронная машина — возбудитель, «Электричество», 1954, № 10.

62. Морозова Ю. А., Методика расчета тока ротора при переходных процессах в синхронных генераторах с учетом возбудителей, Известия высших учебных заведений, «Энергетика», 1958, № 10.

63. Морозова Ю. А., Расчет процесса самовозбуждения машинных возбудителей синхронных генераторов, Известия высших учебных заведений, «Энергетика», 1960, № 3.

64. Иносов В. Л., Цукерник Л. В., Компаундирование и электромагнитный корректор напряжения синхронных генераторов, Госэнергоиздат, 1954.

65. Марголин Н. Ф., Гашение поля синхронных машин по схеме переключения обмотки возбуждения с возбудителя на разрядное активное сопротивление, Труды МЭИ, 1938, вып. 2.

66. Поляк Н. А., Выбор величины сопротивления в схеме гашения поля, «Электрические станции», 1938, № 4.

67. Романов М., Принудительное развозбуждение электрических машин, «Электричество», 1944, № 1—2.

68. Красильников Л. В., О перенапряжениях при гашении поля генераторов, «Электрические станции», 1952, № 3.

69. Фролов Б. В., Гашение магнитного поля при наличии успокоительной обмотки, Труды ЛИАП, 1954, вып. 8.

70. Фролов Б. В., Гашение поля гидрогенераторов, Труды ЛИАП, 1958, вып. 26.

71. Брон О. Б., Образцов В. А., Гашение поля синхронных машин, «Электричество», 1957, № 7.

72. Брон О. Б., Автоматы гашения магнитного поля, Госэнергоиздат, 1961.

73. Костенко М. П., Эквивалентные схемы и постоянные времени затухания симметричных составляющих токов внезапного короткого замыкания, Энергетический сборник, ЛОЭКНИТО, 1934, вып. 1.

74. Мамикосянц Л. Г., Об уточнении параметров синхронных генераторов, «Электрические станции», 1949, № 11.

75. Мамикосянц Л. Г., О переходных процессах в синхронных машинах с успокоительными контурами на роторе, «Электричество», 1954, № 7.

76. Медведев Б. П., Упрощенный расчет переходных процессов в синхронной машине, «Электричество», 1955, № 6.

77. Околович М. Н., Полевая И. В., Учет асинхронных двигателей при расчете токов короткого замыкания и выборе аппаратуры на собственных нуждах мощных электростанций, «Электрические станции», 1963, № 4.

78. Чернин А. Б., Кривые затухания и кривые фиктивного времени с учетом автоматического регулятора напряжения, Информационный материал НКЭС, 1944, IX.

79. Чернин А. Б., Особенности кривых затухания и кривых фиктивного времени с учетом регуляторов напряжения, «Релейная защита и системная автоматика» (сборник статей), Госэнергоиздат, 1948.

80. Чернин А. Б., Метод спрямленных характеристик для расчета токов короткого замыкания, «Электричество», 1935, № 4.

81. Ульянов С. А., Швагер В. Я., Вычисление токов короткого замыкания с учетом действия автоматических регуляторов напряжения, «Электричество», 1939, № 10, и 1940, № 5.

82. Чернин А. Б., Расчет токов короткого замыкания при наличии регуляторов напряжения, «Электрические станции», 1939, № 10—11.

83. Щедрин Н. Н., Бесконечные цепные схемы несимметричных замыканий цепей, питаемых генераторами с одноосной обмоткой ротора, Труды ЛПИ, 1947, № 5.

84. Меерович Э. А., Применение метода симметричных составляющих для исследования неустановившихся процессов в трехфазных цепях, «Электричество», 1952, № 4 и 1954, № 2.

85. Зевеке Г. В., Применение метода симметричных составляющих для исследования переходных процессов в статических трехфазных цепях, «Электричество», 1954, № 2.

86. Жданов П. С., О симметричных составляющих, «Электричество», 1945, № 9.

87. Паль Е. А., Косвенный метод определения индуктивного сопротивления обратной последовательности синхронной машины, Труды ЛПИ, 1946, № 1.

88. Трояnek З., Некоторые вопросы несимметрии электрических систем, Кандидатская диссертация, МЭИ, 1954.

89. Stagg F. M., Equivalent circuits, Trans. AIEE, 1932, vol. 51, № 2.

90. Полевой-Мансфельд В. А., Принцип расщепления обмоток и его применение на электрических установках, Кандидатская диссертация, МЭИ, 1947.

91. Глушко А. И., Схемы замещения многообмоточных трансформаторов и автотрансформаторов, Известия высших учебных заведений, «Энергетика», 1961, № 2.

92. Чернин А. Б., Схема замещения добавочного трансформатора для продольно-поперечного регулирования напряжения под нагрузкой, Известия высших учебных заведений, «Электромеханика», 1962, № 12.

93. Campbell G. A., Mutual impedance of grounded circuits, Bell System Tech. Journ., 1923, № 10.

94. Mayr, Die Erde als Wechselstromleiter, ETZ, 1925, № 9.

95. Carson T., Wave propagations in overhead wires ground return, Bell System Tech. Journ., 1926, vol. 5, № 10.

96. Clem E., Reactance of transmission lines with ground return, Trans. AIEE, 1931, vol. 50.

97. Городский Д. А., Сопротивления нулевой последовательности воздушных линий, «Электричество», 1933, № 12.

98. Марголин Н. Ф., Токи в земле, Госэнергоиздат, 1947.

99. Мельников Н. А., Шерентис А. М., О системе заземления тросов длинных линий электропередачи, «Электричество», 1958, № 1.

100. Костенко М. В., Взаимные сопротивления между воздушными линиями, «Электричество», 1955, № 10.

101. Неклепаев Б. Н., Влияние и учет взаимной индукции между линиями электропередачи при несимметричных режимах, Кандидатская диссертация, МЭИ, 1958.

102. Неклепаев Б. Н., Распределение токов нулевой последовательности при коротких замыканиях на трехцепных линиях электропередачи, Труды МЭИ, 1957, вып. 26.

103. Неклепаев Б. Н., Схемы замещения нулевой последовательности линий электропередачи с взаимной индукцией, Известия высших учебных заведений, «Энергетика», 1958, № 1.

104. Гейнин Н. Г., Эквивалентные схемы замещения нулевой последовательности нескольких близко трассируемых линий, «Электричество», 1960, № 8.

105. Атабеков Г. И., Диаграммы токов и напряжений при авариях в системе, «Электричество», 1935, № 23.

106. Страхов С. В., Расчет двухфазного короткого замыкания с одновременным замыканием на землю третьей фазы в той же точке, «Электрические станции», 1943, № 9.

107. Чернин А. Б., Швагер В. Я., Поведение регулятора напряжения при несимметричных коротких замыканиях, «Электричество», 1945, № 8.

108. Атабеков Г. И., Мамиконянц Л. Г., Применение комплексных схем замещения для расчета переходных процессов, «Электричество», 1949, № 4 и 1954, № 2.

109. Чернин А. Б., Вычисление электрических величин и поведение релейной защиты при неполнофазных режимах в электрических системах, Госэнергоиздат, 1963.

110. Костянин Г. Г., Измерение составляющих тока в длительном неполнофазном режиме, «Электрические станции», 1958, № 7.

111. Эбин Л. Е., Несимметричные схемы работы трансформаторов, Госэнергоиздат, 1944.

112. Красильников Л. В., Пуск синхронных компенсаторов при реактировании двух фаз, «Электрические станции», 1955, № 6.

113. Эбин Л. Е., Сети с использованием земли в качестве провода, «Электрические станции», 1939, № 8.

114. Розенберг Б. И., Комплексные схемы замещения трехфазных сетей при некоторых видах асимметрии, «Электричество», 1957, № 1.

115. Чернин А. Б., О расчете токов и напряжений при работе линии по системе «два провода—земля», «Электрические станции», 1960, № 7.

116. Обердорфер Г., Замыкания на землю и борьба с ними, ОНТИ, Энергоиздат, 1932.

117. Clarke E., Simultaneous Faults in Three-Phase Systems, AIEE, Tr., т. 50, стр. 919—941, 1931 (реферат: «Энергетическое обозрение», Электротехнический выпуск, № 7, 1933).

118. Kimbark E. W., Experimental analysis of double unbalances, El. Eng., 1935, № 2, (реферат: «Энергетическое обозрение», Электротехнический выпуск, № 12, 1935).

119. Маркович И. М., Расчеты токов короткого замыкания с одновременным разрывом, «Электричество», 1935, № 11.

120. Маркович И. М., Применение метода суперпозиции к расчету токов короткого замыкания при одновременном обрыве провода, «Электричество», 1935, № 17.

121. Зуратов Р. С., Расчеты токов короткого замыкания при одновременных повреждениях в двух различных точках системы, «Электричество», 1936, № 23.

122. Ульянов С. А., Швагер В. Я., Одновременные замыкания на землю в двух точках электрической сети, «Электричество», 1939, № 5.

123. Богатырев О. М., Чернин А. Б., Метод расчета токов короткого замыкания при одновременном обрыве провода, «Электрические станции», 1941, № 2.

124. Чернин А. Б., Расчеты токов двойного замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью, «Электричество», 1939, № 5.

125. Чернин А. Б., Расчет токов двойного замыкания на землю, «Электричество», 1937, № 17—18.

126. Щедрин Н. Н., К теории сложных несимметричных режимов электрических систем, «Электричество», 1946, № 5.

127. Щедрин Н. Н., Некоторые дополнения к вопросу о расчете двойных несимметричных коммутаций в электрических системах, Труды института энергетики АН Узб. ССР, вып. 7, 1954.

128. Адонц Г. Т., К теории сложных несимметричных режимов электрических систем, «Электричество», 1951, № 9.

129. Соколов Н. И., Построение и применение комплексных схем замещения при сложных несимметричных цепях, «Электричество», 1949, № 8.

130. Мельников Н. А., Метод расчета сложных несимметричных многофазных электрических систем, Труды ВЭИ, вып. 3, Госэнергоиздат, 1954.

131. Сатаров В. А., Расчеты токов короткого замыкания при продольной несимметрии, «Электричество», 1956, № 3.

132. Сатаров В. А., Расчеты одновременных коротких замыканий в двух точках электрической системы, Труды ВЭИ, вып. 3, Госэнергоиздат, 1954.

133. Сатаров В. А., Расчеты режимов короткого замыкания в электрической системе с продольной несимметрией методом активного многополюсника, Труды ВЭИ, вып. 6, Госэнергоиздат, 1955.

134. Борковская В. Н., Пухов Г. Е., К расчету трехфазных цепей с произвольным числом коротких замыканий и разрывов фаз, «Электричество», 1955, № 5.

135. Костаянн Г. Г., Расчеты коротких замыканий в системах с неполнофазной передачей, «Электричество», 1958, № 2.

136. Костаянн Г. Г., К теории сложных несимметричных повреждений в электрических системах, Известия АН Арм. ССР (серия технических наук), том XII, № 2, 1959.

137. Костаянн Г. Г., Расчет режимов сложных повреждений по результатам расчета более простых режимов, «Электричество», 1960, № 11.

138. Наяшкова Е. Ф., Упрощенный расчет трехфазного короткого замыкания в продольно-компенсированной цепи, Известия вузов МВО СССР, «Энергетика», 1959, № 3.

139. Соколов Н. И., Якушев В. М., Применение математических машин непрерывного действия при расчетах на статических моделях постоянного и переменного тока, Доклады четвертой межвузовской конференции по применению физического и математического моделирования в различных отраслях техники, сборник № 2, Госэнергоиздат, 1962.

140. Соколов Н. И., Гуревич Ю. Е., Хвощинская З. Г., Моделирование системы со многими генераторами на математической машине непрерывного действия, «Электричество», 1961, № 5.

141. Брук И. С., Зубков П. И., Крюков А. А., Либкинд М. С., Маркович И. М., Совалов С. А., Дальние передачи переменного тока, Изд-во АН СССР, 1958.

142. Сапир И. Л., Расчет переходных процессов в сложных линиях с распределенными и сосредоточенными постоянными, «Электричество», 1951, № 3.

143. Лосев С. Б., Чернин А. Б., Практический метод расчета переходных процессов при коротких замыканиях на линиях с распределенными параметрами, «Электричество», 1957, № 4.

144. Караев Р. И., Переходные процессы в линиях большой протяженности, Госэнергоиздат, 1963.

145. Щедрин Н. Н., Упрощение расчетов коротких замыканий продольно-компенсированных линий передачи, «Электричество», 1953, № 1.

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Аварийный шунт 526
- Автоматическое повторное включение (АПВ) 18, 19
 - регулирование возбуждения 20
- Автоматы гашения магнитного поля 275
 - — поля 260
- Автотрансформаторы 419
- Активное сопротивление линии «провод — земля» 431
 - — нулевой последовательно-сти синхронной машины 411
 - — оболочки кабеля 450
 - — обратной последовательно-сти синхронной машины r_2 410
- Апериодическая слагающая тока 74
- Асинхронные двигатели 411
- Базисные условия 32
- Векторная диаграмма явнополюс-ной машины 160
 - — — — с демпферными об-мотками 168
- Векторные диаграммы токов и напряжений в местах двойно-го замыкания на землю 622
 - — — — — — — — простого за-мыкания на землю 532
 - — — — — — — — при разных ви-дах короткого замыкания 511
- Вероятность различных видов короткого замыкания 16
- Взаимная система относительных единиц 208
- Взаимное влияние синхронных машин при внезапном корот-ком замыкании 322
- Взаимное влияние синхронных ма-шин при переходном процессе несимметричного короткого за-мыкания 524
- Виды повреждений сложные 17
- Включение обмотки возбуждения на постоянное напряжение 225
- Влияние автоматического регули-рования возбуждения 142
 - — — — — при внезапном ко-ротком замыкании 304
 - — — — — — — — синхрон-ной машины 308
 - и учет нагрузки 134
 - качания синхронных машин при коротком замыкании 327
 - нагрузки в начальный момент короткого замыкания 340
 - — при несимметричных ко-ротких замыканиях 517
 - явнополюсности ротора 132
- Внезапное короткое замыкание синхронной машины без демп-ферных обмоток 279
 - — — — — с демпферными обмотками 291
 - — — — — трансформатора 123
- Воздушные линии 428
- Время гашения поля 266
- Высшие гармоники 394
- Гашение магнитного поля 259
 - поля на постоянное разрядное сопротивление 261
 - — — оптимальные условия 262, 263
 - — при наличии демпферной обмотки 269
 - — с помощью дугогаситель-ной решетки, включенной по-

следовательно с обмоткой
возбуждения 267
Графическое решение 103

Двойное замыкание на землю
619

Двухфазное короткое замыкание
15, 472, 503

— — на землю 15, 409, 507

Двухцепная линия с тросами 440

Действующее значение тока
в произвольный момент пере-
ходного процесса 83

Диаграмма для учета теплового
спада тока короткого замыка-
ния 101

— сопротивления нулевой после-
довательности линии с тросом
441

Дополнительное сопротивление r_z ,
учитывающее потерю мощно-
сти в земле от протекающего
в ней тока 431

Емкостная проводимость нулевой
последовательности 460

Замена переменных 196

Значения ударного коэффициен-
та для асинхронных двигате-
лей 343

— x/r для элементов электриче-
ской системы 341

Изменение параметров ферро-
магнитных проводников 95

Индуктивность нулевой последова-
тельности 206

— обмоток синхронной машины
188

Ионное возбуждение 257

Использование комплексных схем
замещения 616

Кабели 448

Каскадное отключение 19

— — и повторное включение ко-
роткого замыкания 313

Компаундирование 253, 255

Комплексная схема для одно-
фазного короткого замыкания
с одновременным обрывом
одной фазы 617, 618

Комплексные схемы замещения
491, 492, 587, 592

Комплексный коэффициент транс-
формации 466

Конец схемы нулевой последова-
тельности 461

— — прямой или обратной по-
следовательности 455

Короткие замыкания в одной
точке, основные виды 15

— — случайного характера 23

Короткое замыкание 13

— — синхронной машины без
демпферных обмоток, внезап-
ное 279

Коэффициент магнитной связи
между контурами 108

— рассеяния 108

— усиления каскада 249

Кривые для определения расчет-
ных E_i и x_i генераторов с АРВ
380

— изменения токов при внезап-
ном коротком замыкании син-
хронной машины без демпфер-
ных обмоток 288

— — — — — с
демпферными обмотками 300

Критическая реактивность 379

— — для данного времени $x_{кр}$
378

Критический ток 144, 381

Критическое время 237

— сопротивление 143

Линия передачи «два провода —
земля» 595, 598

Магнитные потоки в продольной
оси ротора без демпферных
обмоток 160

— — являющейся машины
с демпферными обмотками 167

Металлическое замыкание 15

Метод расчетных кривых 354, 550
— спрямленных характеристик
376, 361

Модель преобразованной син-
хронной машины 204

Мощность короткого замыкания
68

Наибольшее действующее значе-
ние тока короткого замыкания
85

- Наложение собственно аварийного режима на предшествующий 62
- Напряжение короткого замыкания трансформатора 33
- Начало схемы нулевой последовательности 459
- — прямой или обратной последовательности 455
- Начальный момент внезапного нарушения режима 1155
- переходный ток 173
- сверхпереходный ток 173
- Несимметрия поперечная 17
- продольная 17
- Нулевая последовательность 444
- Обобщенная нагрузка 413
- Обобщенный вектор трехфазной системы 194
- Общие уравнения электромагнитного переходного процесса синхронной машины 1183
- Общий коэффициент рассеяния 108
- Однократная поперечная несимметрия 470
- продольная несимметрия 583
- Однофазное короткое замыкание 476, 506
- — с обрывом фазы 639
- Одноцепная линия с тросом 436
- Операторные реактивности синхронной машины 214
- Определение начальных переходного и сверхпереходного токов 173
- Оптимальные условия гашения поля 262, 263
- Основная и производная схемы прямой последовательности для случая однофазного короткого замыкания с одновременным обрывом той же фазы 641
- Основные допущения 27
- Особая фаза 471
- Осциллограммы гашения поля 274
- Относительные угловые частоты изменений соответствующих свободных токов, выраженных в осях d , q 281
- Отношение короткого замыкания 130
- Параметры типовых союзных генераторов средней мощности 358
- Переходный процесс в простейших трехфазных цепях 71
- Переходные э. д. с. и реактивности синхронной машины 156
- Периодическая слагающая тока 74
- Погрешности приближенного приведения 49
- Поперечная несимметрия 117
- переходная э. д. с. 159
- сверхпереходная реактивность 166
- Последовательное возбуждение 251
- Постоянная времени быстро изменяющихся свободных токов 220
- — гашения поля 268
- — медленно изменяющихся свободных токов 220
- Потенциал незаземленной нейтрали автотрансформатора 424
- Потокоцепления и э. д. с., их составляющие в координатах d , q 201
- Правило эквивалентности прямой последовательности 483, 602
- Предельное приращение тока возбуждения 306
- — установившегося тока короткого замыкания 306
- Предельный ток возбуждения 132
- Преднамеренное короткое замыкание 23
- Преобразование схем замещения 39
- уравнения равновесия э. д. с. и падений напряжений 209
- Приближенное приведение в именованных единицах 46
- — — относительных единицах 48
- Приближенный учет качания 386, 578
- — системы 347
- Применение практических методов к расчету переходного процесса при несимметричных коротких замыканиях 536
- принципы наложения 62, 606

- Применимость метода симметричных составляющих к исследованию переходных процессов 397
- Принципиальная схема явнополюсной синхронной машины 186
- Причины возникновения электромагнитных переходных процессов 22
- Продольная несимметрия 17
- переходная реактивность 159
 - сверхпереходная реактивность 166
- Производная схема прямой последовательности для двойного замыкания на землю 623
- Простейшая трехфазная цепь 71
- цепь с магнитной связью 107
- Простое замыкание 113
- — на землю 529
- Прямая (обратная) последовательность 444
- Распределение и трансформация токов и напряжения 462
- напряжения 604
 - токов и напряжений 67
- Расчет для выбора выключателей по отключающей способности 350, 547
- начального сверхпереходного и ударного токов короткого замыкания 337, 539
 - по общему изменению 551
 - при наличии автоматического регулирования возбуждения 147
 - отсутствии автоматического регулирования возбуждения 139
 - с учетом индивидуального изменения 551
 - электромагнитного переходного процесса 25
- Расчетная отключаемая мощность 350
- реактивность 355, 378, 550
 - э. д. с. 378
- Расчетное время 387, 388
- — размыкания контактов выключателей 351
- Расчетные кривые для гидрогенератора с автоматическим регулированием возбуждения 357
- — — турбогенератора с автоматическим регулированием возбуждения 356
- Расчетные параметры стальных проводов 96
- условия 26, 29
- Расчетный отключаемый ток 350
- Реактивное емкостное сопротивление воздушной линии 444
- — — прямой последовательности трехжильного кабеля 451
 - — — трехжильного кабеля 451
- Реактивность выделяемой генерирующей ветви 368
- линии «провод — земля» 430
 - нагрузки 137
 - нулевой последовательности синхронных машин 411
 - обратной последовательности синхронной машины 404
 - рассеяния статора 130
- Режим нормального напряжения 143, 379
- подъема возбуждения 379
 - предельного возбуждения 143
- Резонансный треугольник 424
- Результирующие э. д. с. и сопротивления 460
- Сверхпереходные э. д. с. в продольной и поперечной осях 166
- Свободный переходный ток 294
- сверхпереходный ток 294
- Симметричные составляющие токов и напряжений в месте коротких замыканий 484
- Синхронные машины 403
- ненасыщенные реактивности по поперечной оси 129
 - — — продольной оси 129
- Система относительных единиц 30
- Скорость нарастания тока возбуждения 224
- Сложные виды повреждений 611
- Собственные и взаимные сопротивления и проводимости 64
- Соотношение токов в земле 507
- между x_0 и x_1 для воздушных линий передачи 443
- Сопротивление в двух фазах 590
- — одной фазе 585
 - взаимной индукции нулевой последовательности между оболочкой и жилами кабеля 450

- Форсировка возбуждения при
электромашинном возбудителе
230
- Функция приращений от действия
форсировки возбуждения 241
- Характеристики двигателей и на-
грузки 170
- холостого хода 129
- Цепная схема замещения 408
- Эквивалентная глубина возврата
тока через землю 429
- постоянная времени 91
- схема замещения 40
- — прямой последовательности
при поперечной несимметрии
одновременно в двух точках
615
- Эквивалентный радиус жилы 449
- Электродвижущая сила вращения
203
- — трансформации 203
- Элементарные схемы при двойном
замыкании на землю 621
- — — несимметричных корот-
ких замыканиях одновременно
в двух точках 613
- Эпюры напряжений отдельных по-
следовательностей при обрыве
605
- относительных напряжения от-
дельных последовательностей
при коротких замыканиях 512
-

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Введение	6

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

Общие сведения и указания

Глава первая. <i>Основные сведения об электромагнитных переходных процессах</i>	13
1-1. Основные определения	13
1-2. Причины возникновения и следствия	22
1-3. Назначение расчетов и требования к ним	25
1-4. Вопросы	27
Глава вторая. <i>Общие указания к выполнению расчетов</i>	27
2-1. Основные допущения	27
2-2. Понятие о расчетных условиях	29
2-3. Система относительных единиц	30
2-4. Составление схемы замещения	36
2-5. Погрешности приближенного приведения	49
2-6. Преобразование схем замещения	59
2-7. Применение принципа наложения	62
2-8. Распределение токов и напряжений	67
2-9. Мощность короткого замыкания	68
2-10. Вопросы и задачи	69

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

Электромагнитные переходные процессы при сохранении симметрии системы

Глава третья. <i>Переходный процесс в простейших трех-фазных цепях</i>	71
3-1. Постановка задачи и ее ограничения	71
3-2. Трехфазное короткое замыкание в неразветвленной цепи	72
3-3. Действующие значения полных величин и их отдельных составляющих	83
3-4. Приближенное решение	86
3-5. Определение эквивалентной постоянной времени	91
3-6. Учет изменения параметров элементов цепи	94

3-7. Графическое решение	103
3-8. Вопросы и задачи	105
Глава четвертая. Переходный процесс в неподвижных магнитно связанных цепях	106
4-1. Общие замечания	106
4-2. Основные уравнения и соотношения	107
4-3. Приближенное решение	119
4-4. Внезапное короткое замыкание трансформатора	123
4-5. Вопросы и задачи	127
Глава пятая. Установившийся режим короткого замыкания	128
5-1. Общие замечания	128
5-2. Основные характеристики, параметры и соотношения	129
5-3. Влияние явнополюсности ротора	132
5-4. Влияние и учет нагрузки	134
5-5. Расчет при отсутствии автоматического регулирования возбуждения	139
5-6. Влияние автоматического регулирования возбуждения	142
5-7. Расчет при наличии автоматического регулирования возбуждения	147
5-8. Вопросы и задачи	154
Глава шестая. Начальный момент внезапного нарушения режима	155
6-1. Общие замечания	155
6-2. Переходные э. д. с. и реактивности синхронной машины	156
6-3. Сверхпереходные э. д. с. и реактивности синхронной машины	163
6-4. Характеристики двигателей и нагрузки	170
6-5. Определение начальных переходного и сверхпереходного токов	173
6-6. Вопросы и задачи	183
Глава седьмая. Общие уравнения электромагнитного переходного процесса синхронной машины	183
7-1. Общие замечания и допущения	183
7-2. Исходные уравнения	185
7-3. Индуктивности обмоток синхронной машины	188
7-4. Обобщенный вектор трехфазной системы	194
7-5. Замена переменных	196
7-6. Потокосцепления и э. д. с., их составляющие в координатах $d, q, 0$	201
7-7. Преобразование уравнений равновесия э. д. с. и падений напряжений	209
7-8. Уравнения в операторной форме	213
7-9. Операторные реактивности синхронной машины	214
7-10. Вопросы и задачи	223
Глава восьмая. Форсировка возбуждения и развозбуждение синхронной машины	224
8-1. Общие замечания	224
8-2. Включение обмотки возбуждения на постоянное напряжение	225
8-3. Форсировка возбуждения при электромагнитном возбудителе	230
8-4. Последовательное возбуждение	251

8-5. Компаундирование	253
8-6. Ионное возбуждение	257
8-7. Гашение магнитного поля	259
8-8. Вопросы и задачи	277
Глава девятая. Внезапное короткое замыкание синхронной машины	278
9-1. Общие замечания	278
9-2. Внезапное короткое замыкание синхронной машины без демпферных обмоток	279
9-3. Внезапное короткое замыкание синхронной машины с демпферными обмотками	291
9-4. Влияние автоматического регулирования возбуждения при внезапном коротком замыкании	304
9-5. Каскадное отключение и повторное включение короткого замыкания	313
9-6. Вопросы и задачи	319
Глава десятая. Взаимное влияние синхронных машин при переходном процессе	321
10-1. Общие замечания	321
10-2. Взаимное влияние синхронных машин при внезапном коротком замыкании	322
10-3. Влияние качаний синхронных машин при коротком замыкании	327
10-4. Вопросы и задачи	333
Глава одиннадцатая. Практические методы расчета переходного процесса короткого замыкания	334
11-1. Общие замечания	334
11-2. Расчет начального сверхпереходного и ударного токов короткого замыкания	337
11-3. Приближенный учет системы	347
11-4. Расчет для выбора выключателей по отключающей способности	350
11-5. Метод расчетных кривых	354
11-6. Уточнения метода расчетных кривых	364
11-7. Метод спрямленных характеристик	374
11-8. Приближенный учет качаний	386
11-9. Вопросы и задачи	391

ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ

Электромагнитные переходные процессы при нарушении симметрии системы

Глава двенадцатая. Основные положения в исследовании несимметричных переходных процессов	393
12-1. Общие замечания	393
12-2. Образование высших гармоник	394
12-3. Применимость метода симметричных составляющих к исследованию переходных процессов	397
12-4. Вопросы и задачи	401
Глава тринадцатая. Параметры элементов для токов обратной и нулевой последовательностей	402
13-1. Общие замечания	402
13-2. Синхронные машины	403

13-3. Асинхронные двигатели	411
13-4. Обобщенная нагрузка	413
13-5. Реакторы	414
13-6. Трансформаторы	415
13-7. Автотрансформаторы	419
13-8. Воздушные линии	428
13-9. Кабели	448
13-10. Вопросы и задачи	452
Глава четырнадцатая. Схемы отдельных последовательностей	453
14-1. Общие замечания	453
14-2. Схемы прямой и обратной последовательностей	454
14-3. Схема нулевой последовательности	455
14-4. Результирующие э. д. с. и сопротивления	460
14-5. Распределение и трансформация токов и напряжений	462
14-6. Вопросы и задачи	469
Глава пятнадцатая. Однократная поперечная несимметрия	470
15-1. Общие замечания	470
15-2. Двухфазное короткое замыкание	472
15-3. Однофазное короткое замыкание	476
15-4. Двухфазное короткое замыкание на землю	479
15-5. Правило эквивалентности прямой последовательности	483
15-6. Комплексные схемы замещения	491
15-7. Сравнение видов короткого замыкания	497
15-8. Векторные диаграммы токов и напряжений	511
15-9. Влияние нагрузки при несимметричных коротких замыканиях	517
15-10. Взаимное влияние синхронных машин при переходном процессе несимметричного короткого замыкания	524
15-11. Простое замыкание на землю	529
15-12. Вопросы и задачи	535
Глава шестнадцатая. Применение практических методов к расчету переходного процесса при несимметричных коротких замыканиях	538
16-1. Общие замечания	538
16-2. Расчет начального сверхпереходного и ударного токов короткого замыкания	539
16-3. Расчет для выбора выключателей по отключающей способности	547
16-4. Метод расчетных кривых	550
16-5. Метод спрямленных характеристик	561
16-6. Приближенный учет качаний	578
16-7. Вопросы и задачи	581
Глава семнадцатая. Однократная продольная несимметрия	583
17-1. Общие замечания	583
17-2. Сопротивление в одной фазе	585
17-3. Сопротивление в двух фазах	590
17-4. Линия передачи «два провода—земля»	595
17-5. Правило эквивалентности прямой последовательности	602
17-6. Распределение напряжений	604

17-7. Применение принципа наложения	606
17-8. Вопросы и задачи	609
Глава восемнадцатая. <i>Сложные виды повреждений</i>	611
18-1. Общие замечания	611
18-2. Общий путь решения	612
18-3. Использование комплексных схем замещения	616
18-4. Двойное замыкание на землю	619
18-5. Однофазное короткое замыкание с обрывом фазы	639
18-6. Вопросы и задачи	646
П-1. Графики изменения тригонометрических функций	648
П-2. Графики изменения показательных функций	649
П-3. Основные формулы преобразования схем и нахождения токораспределения	651
П-4. I. Основные параметры синхронных машин	654
II. Примерные значения параметров синхронных машин	656
П-5. Основные параметры асинхронных двигателей	657
П-6. Основные параметры реакторов	658
П-7. Напряжения короткого замыкания ($u_{к\%}$) трансформаторов и автотрансформаторов	659
П-8. А. Схемы замещения прямой последовательности трансформаторов и автотрансформаторов	662
Б. Формулы для определения реактивностей элементов схем замещения прямой последовательности трансформаторов и автотрансформаторов	663
П-9. Параметры стальных проводов	668
П-10. А. Расположение проводов типовых воздушных линий передачи	669
Б. Индуктивные сопротивления воздушных линий передачи	670
П-11. Сопротивления прямой последовательности кабелей	671
П-12. Основные соотношения метода симметричных составляющих	672
П-13. Типовые схемы нулевой последовательности с взаимной индукцией между цепями	674
П-14. Типовые графики изменения угла δ' в функции от расчетного времени τ	681
Литература	686
Алфавитный указатель	694