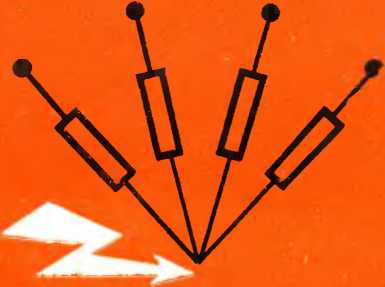
**БИБЛИОТЕКА ЭЛЕКТРОМОНТЕРА**

**Е.Н. БЕЛЯЕВА**



**КАК РАССЧИТАТЬ**

**ТОК**

**КОРОТКОГО**

**ЗАМЫКАНИЯ**

**СОДЕРЖАНИЕ**

**Стр**

Предисловие - 3

1. Общие сведения о коротких замыканиях 4
2. Короткое замыкание в симметричной трехфазиой цепи . 5
3. Электродинамическое действие токов короткого замыкания 12
4. Термическое действие токов короткого замыкания . . 13
5. Выбор исходных условий для расчета токов короткого

замыкания . 18

1. Составление и преобразование схемы замещения ... 21
2. Применение системы относительных единиц для расчша

токов короткого замыкания 28

1. Параметры элементов расчетной схемы 34
2. Вычисление начального значения периодической слагаю­щей тока трехфазного короткого замыкания .... 41
3. Вычисление ударного тока короткого замыкания ... 74
4. Определение периодической слагающей тока трехфазного

короткого замыкания для моментов времени до 0,5 с . . 75

1. Общие представления о несимметричных коротких замы­каниях 89

13 Проверка аппаратов и проводников по токам короткого замыкания 123

Приложение. Определение расчетной э. д. с. и индуктивного сопротивления генератора для начального .момента корот­кого замыкания ... 132

**Список литературы 3-я стр.**

**обложки**

**БИБЛИОТЕКА ЭЛЕКТРОМОНТЕРА**

***Основана в 1959* е.**

**Выпуск 544**

**Е. Н. БЕЛЯЕВА**

КАК РАССЧИТАТЬ

ТОК

КОРОТКОГО

ЗАМЫКАНИЯ

***Издание второе, переработанное и,дополненное***

**ББК 31 27**

**Б 44**

УДК 621 3 014 7

Редакционная коллегия:

В Н Андриевский, С. А Бажанов, Ю И Зайцев, В П. Ла­рионов, Э. С. Мусаэлян, С. П. Розанов, В. А. Семенов, А. Д. Смирнов, А. Н. Грифонов, П. И. Устинов, А. А. Фила­тов

**Беляева Е. Н.**

Б 44 Как рассчитать ток короткого замыкания.—2-е изд. перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1983.— 136 с., ил. — (Б-ка электромонтера. Вып. 544)

35 к.

Дано краткое изложение способов расчета токов к з в электро установках выше 1000 В, иллюстрированное примерами Первое издание вышло в 1964 г Во втором издании материал переработан в соответ­ствии с новыми РУ по расчету токов к з , учтены новые ГОСТ на ап­параты, машины, системы единиц

Для квалифицированных электромонтеров, бригадиров и мастеров электроцехов как практическое пособие по расчетам токов короткого замыкания

**2302040000-067 ББК 31 27**

**Б051(01)-83 П4’82 6П2.11**

*ЕВГЕНИЯ НИКОЛАЕВНА. БЕЛЯЕВА*

**Как рассчитать ток короткого замыкания**

Редактор *В А Семенов*

Редактор издательства *Л В Копейкина*

Технический редактор *В В Хапаева*

Корректор *И.* А. *Володяева*

ИБ № 2847

Сдано в набор 23 08 82 Подписано в печать 28 12 82 Т 23462 Формат 84Х 1О8’/з2 Бумага типографская К" 2 Гарнитура литературная Печать высокая Усл печ л 7 14 Усл кр отт. 7,46 Уч -изд л 6,98 Тираж 60 000 экз Заказ № 206 Цена 35 к

Энергоатомиздат, 113114, Москва, М 114, Шлюзовая наб, 10

Владимирская типография «Союзполиграфпрома» при Государственном комитете СССР по делам издательств полиграфии и книжной торговли 600000, г Владимир, Октябрьский проспект, д 7

**ПРЕДИСЛОВИЕ**

Необходимость определения токов короткого замыка­ния в процессе эксплуатации может возникнуть:

при изменении схемы питания энергетического объек­та для проверки электрооборудования высокого напряже­ния на термическое и электродинамическое действие то­ков короткого замыкания, пригодности существующих уставок релейной защиты, средств, грозозащиты и т. д.;

при частичной замене электрооборудования на элект­ростанции или подстанции, если намеченные к установке машины и аппараты по своим паспортным данным отли­чаются от демонтируемых; если проектные данные по объекту отсутствуют или устарели и токи короткого за­мыкания в данный момент неизвестны обслуживающему персоналу. Возможны и другие случаи, когда вследствие изменения условий эксплуатации требуется выполнять расчеты токов короткого замыкания.

Назначение книги — на практических примерах на­учить электротехнический персонал расчетам токов ко­роткого замыкания.

Настоящее издание книги существенно отличается от предыдущего издания 1964 г. в связи с тем, что при пере­издании быта поставлена задача привести книгу в соот­ветствие с разработками руководящих указаний по рас­чету коротких замыканий, выбору и проверке аппаратов и проводников по условиям короткого замыкания кафед­ры электрических станций Московского энергетического института. Все числовые примеры, приведенные в книге, переработаны или составлены заново.

Замечания и пожелания читателей по данной книге следует направлять по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10, Энергоатомиздат.

*Автор*

1. **ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ**

Коротким замыканием (к. з.) называется нарушение нормальной работы электрической установки, вызванное замыканием фаз между собой, а в системах е заземлен­ной нейтралью также замыканием фаз на землю.

Короткие замыкания в электроустановках возникают в результате пробоев и перекрытий изоляции электрообо­рудования, набросов, ошибочных действий персонала и по многим другим причинам.

При к. з. токи в фазах установки увеличиваются по сравнению с их нормальным значением, а напряжения снижаются. В трехфазной электрической сети возможны: трехфазное, двухфазное, двухфазное на землю и одно­фазное к. з.

Виды к. з. в трехфазной сети и их обозначения приве­дены на рис. I *(а—г).*

Для прохождения тока однофазного к. з. необходимо, чтобы на участке сети, где произошло повреждение, была заземленная нулевая точка трансформатора, электриче­ски связанная с местом к. з. (рис. 1,*г).*

Как правило, в месте к. з. возникает электрическая дуга, которая вместе с сопротивлениями элементов пути тока к. з. образует переходное сопротивление. Непосред­ственное к. з. без переходного сопротивления в месте по­вреждения называется металлическим к. з.

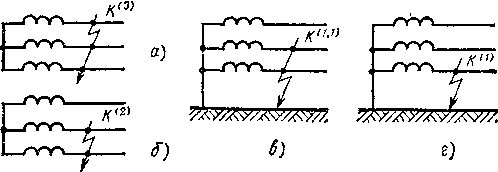


Рис. 1. Виды коротких замыканий.

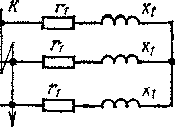
*а* — трехфазное; *б* — двухфазное; *в —* двухфазное на землю; *г —* однофазное.

В данной книге рассматриваются только металличес­кие к. з.

Пренебрежение переходным сопротивлением значи­тельно упрощает расчет и дает максимально возможное при одних и тех же исходных условиях значение тока к. з. Для выбора аппаратуры, например, необходим имен­но такой расчет; при расчетах релейной защиты возмож­ное снижение значения тока за счет переходного сопро­тивления в месте к. з. учитывается введением специаль­ного коэффициента.

1. **КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ В СИММЕТРИЧНОЙ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ**

Для того чтобы ознакомиться с сущностью явления к. з., достаточно остановиться на наиболее простом по­вреждении — трехфазном к. з.



**CZJ-ZVY4**

Рис. 2 Трехфазное к. з. в симметричной цепи.

Если трехфазная цепь симметрична, т. е. сопротивле­ния фаз равны между собой, замыкание всех фаз водной точке (рис. 2) приводит к уменьшению их сопротивления, но не нарушает симметрии токов и напряжений. По срав­нению с режимом нагрузки токи в цепи возрастают, а на­пряжения уменьшаются. Угол сдвига <р между током и напряжением, как правило, увеличивается за счет исклю­чения из схемы активных сопротивлений нагрузки, дости­гая 900 при чисто индуктивном сопротивлении цепи.

*Изменение тока в процессе короткого замыкания.* Ток к. з. изменяется в процессе короткого замыкания (рис. 3) по сложному закону, зависящему от многих фак­торов: мощности источника питания, времени затухания апериодических токов, наличия автоматических регуля­торов возбуждения (АРВ) на генераторах и т. п.

В левой части графиков изображены кривые токов предшествующего нагрузочного режима. Пересечение оси

токов *i* с осью времени *t* соответствует моменту возникно­вения к. з. В правой части графиков показаны кривые токов iK, in и га. Кривая iK изображает ток к. з., фактиче­ски протекающий по цепи, или полный ток к.’з. Кривые

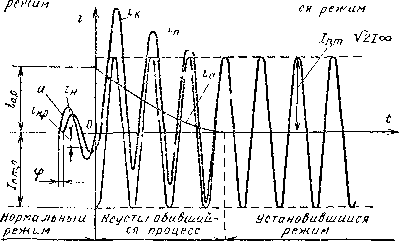
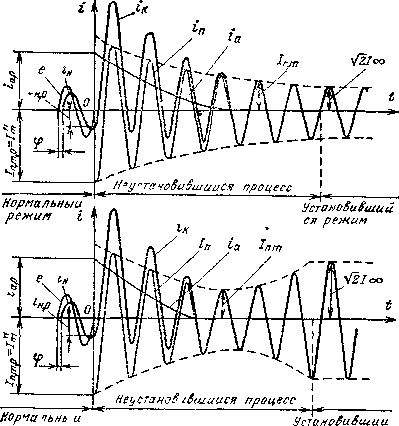


Рис 3 Кривые изменения тока трехфазного к з.

я— в цепи синхронного генератора без АРВ, *б —* в цепи синхронного генера­тора с АРВ, *в* — в цепи питающейся от энергосистемы

\*п и 4 соответствуют периодической и апериодической слагающим полного тока iK. В качестве общего положе­

ния при составлении графиков было принято, что индук­тивное сопротивление цепи к. з. значительно преобладав ет над активным и периодическая слагающая in отстает по фазе от э. д. с. примерно на 90 °.

Часть процесса, которая характеризуется изменением амплитудных значений тока к. з., принято называть не- установившимся процессом. В установившемся режиме амплитуды тока к. з. постоянны.

В зависимости от того, изменяется э. д. с. источника во время к. з, или нет, протекание процесса к. з. и дли­тельность перехода к установившемуся режиму будут различными.

Рассмотрим трехфазное к. з. для следующих случаев питания сети: от генератора без АРВ, от генератора с АРВ и от энергосистемы.

Под определением «энергосистема», или «электрическая систе­ма», которым часто пользуются при расчетах токов к. з., подразу­мевается мощный источник питания, напряжение на шинах которого остается постоянным при любых изменениях режима сети — сбросах нагрузки, перегрузках или коротких замыканиях Внутреннее сопро­тивление такого источника принимается равным нулю (Хс,вн=0, **г С,ВН"0).**

Свойства системы как источника питания широко используют­ся в практике расчетов токов к з В самом деле, если требуется определить максимально возможный ток к. з, его предельное зна­чение за элементом электрической схемы, например за трансформа­тором или реактором, то достаточнс этот элемент условн' подклю­чить к шинам элп трической системы Методы вычислений рассмот­рены в § 9

Если удаление точек к з. от шин источника питания характе ризуется значительными сопротивлениями (§ 11), можно считать, что при к. з не происходит изменения напряжения на шинах и зна­чение периодического тока к з, определяемое в данном случае на­пряжением источника, также не изменяется в течение к. з Условие неизменности напряжения источника значительно облегчает расчет.

Рассмотрим вначале момент возникновения к. з. (рис. *3).*

*Поскольку* речь идет о симметричной трехфазной сис­теме, для оценки явлений достаточно рассматривать про­цесс в одной фазе.

Как уже упоминалось, при к. з. ток в электрической цепи возрастает Однако мгновенного увеличения тока (кривая ц) в обмотке статора генератора произойти не может из-за того, что обмотка статора и цепь к. з. обла­дают индуктивностью.

В начальный момент к. з. в обмотке статора и в ин­дуктивных сопротивлениях цепи наводится э. д. с. само­индукции, препятствующая изменению тока, и индукти­руется ток самоиндукции встречного направления, так называемый свободный апериодический ток (кри­вая г'а). Апериодическим этот ток называется потому, что направление его не изменяется.

С момента возникновения к. з. ток повреждения мож­но представить состоящим из двух слагающих: свободно­го апериодического тока — апериодической слагающей тока к. з. и вынужденного периодического тока, создаваемого э. д. с. генератора, — периодической сла­гающей тока к. з.

В результате взаимного действия слагающих ток в це­пи для начального момента к. з. остается равным мгно­венному значению тока нагрузочного режима *iB,c-* Таким образом,

^'а,о "4" ^п,о \*но» . 0)

где га,о — начальное значение апериодической слагающей тока к. з.; in,o — начальное значение периодической сла­гающей тока к. з., *in,о —* мгновенное значение тока на­грузки в момент возникновения к. з. 1

На основании (1)

га,о ~ г'н,о А а- (2)

Из выражения (2) следует, что начальное значение апериодического тока\* будет максимальным при отсутст­вии тока нагрузки (ти,о=О) и возникновении к. з. в тот момент, когда периодическая слагающая имеет наиболь­шее значение *in,o=hi,m,o'-*

^а,о, *max* Льтп.О’

Значение периодической слагающей для начального момента к. з. зависит от э. д. с. генератора, его внутрен­него сопротивления и сопротивления внешней цепи.

Начальное действующее значение периодической сла­гающей in,o=in,m,o/ *V* 2 вычисляется по выражениям (49)-(52).

Далее проследим, как изменяются апериодическая и периодическая слагающие в течение короткого замыка­ния.

'\* В сетях с индуктивной нагрузкой.

Апериодическая слагающая затухает по закону **пока­**зательной функции:

*t\_ t\_*

*т т*

*. . 'а j* а *j*

^а,о^ ^п,т,о ® п,т,о

где Та — постоянная времени затухания; *at —* коэффици­ент затухания.

Постоянная времени

= <3>

где со=2 л/ — угловая частота; *г, L* и *х —* соответственно активное сопротивление, индуктивность и индуктивное сопротивление цепи к. з.

Быстрота затухания апериодической слагающей зави­сит от соотношения между активным и индуктивным со­противлениями цепи к. з.: чем больше активное сопротив­ление цепи, тем затухание происходит интенсивнее.

Сказанное выше относительно начальных значений тока к. з. и затухания апериодической слагающей дейст­вительно для всех трех случаев к. з., приведенных на рис. 3.

Однако периодическая слагающая тока к. з. изменя­ется по-разному в зависимости от источника питания. Для генератора без АРВ, как видно, из рпс. 3, а с исчез­новением апериодической слагающей неустановившийся процесс не заканчивается, так как изменение периодиче­ской слагающей тока к. з. происходит более длительно.

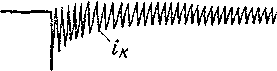
При этом амплитуды периодической слагающей уменьшаются от максимального начального /П)т,о до некоторого установившегося значения 7n.m,°o= *V* 2/тс.

Благодаря магнитной связи между обмотками стато­ра и ротора синхронной машины при возрастании перио­дического тока статора в момент возникновения к. з. в обмотке ротора наводится апериодический индукционный ток, по направлению совпадающий с током обмотки воз­буждения (рис. 4); в результате в начальный момент к. з. результирующий магнитный поток обмотки возбуж­дения и э. д. с. £^(или £') машины остаются без изме­нения (см. приложение).

Далее, с затуханием апериодического тока в обмотке возбуждения результирующий магнитный поток, посте­пенно уменьшаясь, доходит до установибшегося значе­ния; одновременно уменьшаются э. д. с. и амплитуды пе­риодической слагающей тока к. з.

При достижении периодической слагающей тока к. з. установившегося значения /оо неустановившийся про­цесс заканчивается. Длительность его определяется зату­ханием апериодического тока в обмотке возбуждения и при к. з. на выводах генератора составляет примерно 3—5 с.

При пересечении ротором генератора магнитного по­ля апериодической слагающей тока статора в обмотке возбуждения возникает периодический ток. Этот ток складывается с постоянными слагающими тока возбуж­дения — основной, создаваемой возбудителем, и апери­одической — и затухает одновременно с апериодическим током статора (рис. 4).



*и U,£ и,т щь иуб /уи 1,'Л С*

Рис. 4 Осциллограммы токов статора и ротора при внезапном ко­ротком замыкании синхронного генератора.

гв0—ток возбуждения в нормальном режиме; —полный ток возбужде­ния, i Bja—апериодический ток возбуждения; (вЦ—периодический ток воз­буждения; iK — ток кзв обмотке статора.

Отличие процесса к. з. для генераторов с АРВ (рис. *3,6) от* рассмотренного случая (рис. 3, а) состоит в том, что снижение напряжения на выводах генератора при к. з. вызывает действие АРВ, увеличивающего ток воз­буждения.

Однако вследствие инерционности действие АРВ практически становится заметным лишь через 0,08— 0,3 с. Этим объясняется спад периодического тока по значению в первые периоды после возникновения к. з., подобный изменению периодической слагающей для ге­нератора без АРВ. Повышение возбуждения приводит к возрастанию э. д. с. генератора и росту периодической

слагающей тока статора вплоть до установившегося зна­случае определяется временем изменения периодической слагающей тока статора от начального значения /п,т,о до установившегося /п,*т,х—У 2/х.*

чения.

Длительность неустановившегося процесса в данном

На рис. 3, *в* показано протекание процесса к. з. в се­ти, питаемой от энергосистемы.

Из предыдущего известно, что при к. з. в сети напря­

жение на шинах энергосистемы большой мощности не из­

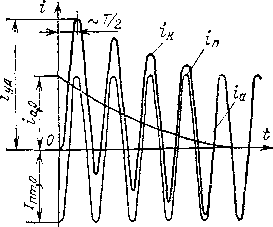
меняется. Поскольку внут­реннее сопротивление та­кого источника равно ну­лю, то напряжение энерго­системы приравнивается ее э. д. с. Неизменность напряжения (э. д. с.) оп­ределяет постоянство ам­плитуд вынужденной пе­риодической слагающей тока к. з. в течение всего процесса к. з. Периодичес­кий ток при питании ог ного энергетического источника определяется лишь на­личием апериодического тока в обмотке статора. С зату­ханием этого тока наступает установившийся режим.

Рис. 5. Графическое определение

системы определяется по ударного тока к. з.

выражениям (51) и (52).

Неустановившийся процесс к. з. при питании от мощ­

*Ударный ток трехфазного короткого замыкания.* Для выбора аппаратуры высокого напряжения по условию электродинамической стойкости необходимо знать макси­мальное значение тока к. з.

Возможное наибольшее значение тока к. з. зависит как от предшествующего режима, так и от момента воз­никновения к. з.

Для сети с преобладающим индуктивным сопротивле­нием <jpK^90° наиболее тяжелым случаем к. з. следует считать его возникновение на холостом ходу, в момент перехода напряжения через нуль (рис. 5).

Очевидно, что слагающие тока к. з. при этом будут иметь наибольшее начальное значение:

^п,о ■'п,т,о> \*а,о ■'п.т.о-

В сумме эти токи составят полный ток к. з., который в начальный момент к. з. будет равен нулю, т. е. току предшествующего режима. Примерно через полпериода ток к. з. достигнет максимального значения. Наибольшее возможное мгновенное значение тока к. з. принято назы­вать ударным током гуд (рис. 5).

В общем случае для начального периода к. з. *t&TI2* с некоторым приближением можно считать, что периоди­ческая слагающая не затухает, как и показано на рис. 5.

При отсутствии затухания апериодической слагающей ударный ток был бы равен:

^"уд = “Ь й = 2/П|т1в.

С учетом затухания

*i* / i\_\

*Т ( т* I

*• г г | г* a *w* 11) )

\*уд \*n,m,o ‘ \* п,т,о ~ \ \* т ® ~

*~V2IVJIkw* (4)

где /п,т,о = 1Л2 /по, /?уд~ ударный коэффициент.

1. **ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ**

Прохождение токов в проводниках приводит к воз­никновению между ними электродинамических (механи­ческих) усилий. Одинаковое направление токов в парал­лельных проводниках вызывает их притягивание, проти­воположное — отталкивание. При этом механические силы взаимодействия, незначительные в режиме нормаль­ной нагрузки, во Время к. з. могут достигнуть значений, опасных для .аппаратуры и ошиновки, и вызвать их де­формацию или разрушение.

Из электротехники известно, что сила взаимодействия (Н) между двумя проводниками при прохождении по ним токов й и й определяется по формуле

*F* = 2&ф. 10-7,  
*а*

где й и й — мгновенные значения токов в данных провод­никах, А; *I —* длина проводников, м; *k.% —* коэффициент формы, учитывающий форму сечения и взаимное распо­ложение проводников; *а —* расстояние между парал­лельными проводниками, м.

Максимальное механическое усилие (Н) при двухфаз­ном к. з., при котором токи в поврежденных фазах равны по значению (см. § 12), определяется как

i<2)2 *I*

*FW* -2^2 Ь,. 10-7,

*а*

где *i* —ударный ток двухфазного к. з. (наибольшее амплитудное значение).

Для трехфазного к. з. в формулу вводится снижаю­щий коэффициент примерно 0,87, учитывающий неодина­ковость мгновенных значений токов в фазах, в результа­**те** чего

\_ i<3’2 *I*

F<3> = /-3 .10-7. (5)

*а*

Расчеты по проверке электродинамической стойкости оборудования при к. з. должны производиться в соответ­ствии с [4].

Примеры расчетов приведены в § 13.

Вследствие того, что максимальные усилия при к. з. возникают практически мгновенно, обеспечить механичес­кую прочность установленного оборудования можно только путем уменьшения тока к. з. — установкой реакто­ров, трансформаторов с расщепленными обмотками, сек­ционированием шин и т. п.

1. **ТЕРМИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ**

По закону Джоуля-Ленца количество тепла *Q,* выде­ляемое электрическим током в проводнике, пропорцио­нально квадрату силы тока /2, сопротивлению проводни­ка г и времени *t.*

Время прохождения тока к. з. определяется действием защитных устройств и отключающей аппаратуры. Для того чтобы повреждения от термического (теплового) воздействия тока к. з. были наименьшими, стремятся от­ключать к. з. возможно быстрее, так что обычно длитель­ность к. з. находится в пределах от долей секунды до не­скольких секунд.

Поскольку ток к. з. может во много раз превышать нормальный ток нагрузки, очевидно, что, несмотря на сравнительно небольшую длительность процесса, при

к. з. возможен значительный перегрев проводника. Пере­грев сверх допустимой температуры может вызвать по­вреждение изоляции — выгорание, потерю эластичности, электрической прочности; быстрый нагрев до определен­ной температуры с последующим медленным охлаждени­ем может привести к отжигу металла, т. е. к потере ме­ханических качеств проводника.

При нагреве проводника током нагрузки часть выде­ленного тепла рассеивается в окружающую среду, причем степень рассеивания зависит от условий охлаждения. Установившийся перегрев проводника по отношению к температуре окружающей среды определяется из тепло­вого баланса или равенства количества выделенного и рассеянного тепла. Напротив, кратковременность к. з. в большинстве случаев позволяет не считаться с отводом тепла в окружающую среду и принимать, что все выде­ляемое тепло идет на нагрев и повышение температуры проводника.

Тепловые потери при к. з., теплоотдача или тепловой спад учитываются только при проверке сечений провод­ников, если время отключения к. з. превышает заданное критическое время или относительно велико активное сопротивление цепи к. з.

Термическое действие тока к. з., исходя из закона Джоуля-Ленца, определяется значением импульса квад­ратичного тока Вк от протекания тока к. з. iK за время *tK —* с момента возникновения повреждения до его от­ключения (или прекращения тока в результате его за­тухания) .

В общем виде выражение для определения импульса квадратичного тока имеет вид:

(6)

£=0

где *1К —* ток к. з. (мгновенное значение); *At —* прираще­ние времени; /к — продолжительность к. з.

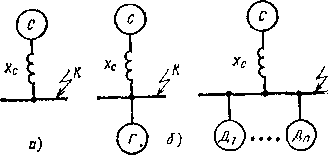
Решение задачи по определению нагрева проводника при к. з. осложняется тем, что значение тока *iK* за время к. з. изменяется (см. рис. 3). Точный подсчет *Вк* при из­меняющемся значении тока /к, состоящего из периодичес­кой и апериодической слагающих, достаточно сложен и требует применения методов высшей математики.

В связи с этим для вычисления Вк целесообразно ис­пользовать формулы (7) — (14) из [4].

В [4] рассматриваются три схемы определения импуль­сов квадратичного тока (рис. 6, *а, б* и *в)<* Там же приня­то, что импульс *Вк* состоит из двух слагаемых или двух импульсов — от периодического тока Вк,п и от апериоди­ческого В К,а’.

Рис. 6. Типовые схемы для расчета импульсов квадратичного тока от токов к. з.

(7)

*а —* система; б—генератор- система; в — группа двига­телей — система. .

*е)*

Вн = *Вк,а* 4- Вк,а.

а) Для схемы питания потребителей от энергосистемы импульсы квадратичного щим выражениям:

5к.п

тока вычисляются по следую-

*Вк.я* — ЛцсТа.с \1 —

*— р t •*

*П,С* отк’

*^отк*

у2 *т \**

1 п,с 1 а,с »

(8)

(9)

где /п,с — действующее значение периодической ляющей тока к. з. системы; /Отк — время отключения к. з.; Та,с — постоянная времени затухания апериодической со­ставляющей тока к. з. энергосистемы,

состав-

Л,е =

где и г s— соответственно результирующие индуктив­ное и активное сопротивления энергосистемы; *G)~2nf—* = 314 — угловая частота.

Результирующий импульс квадратичного тока опре­деляется по (7)—(9).

б) Для двухлучевой схемы питания потребителей от энергосистемы и генератора вначале по кривым рис. 7 для расчетного времени отключения генератора опреде­ляют относительные значения импульсов токового и квадратичного тока от периодической слагающей тока к. з. генератора.

По полученным результатам рассчитывается импульс квадратичного тока от периодической слагающей тока к. зл

Вк,п 3,5 (/п,а 4“ *In,0,я В\** 4\* 2/п,с Лг,О,г ^отк» (10)

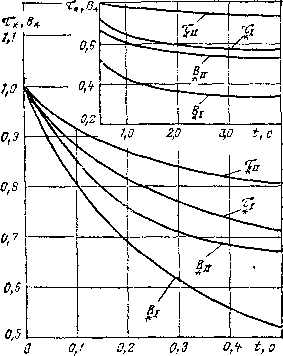
где /п,о — действующее значение периодическо­го тока к. з. энергосисте­мы; /п,о,г—начальное действующее значение пе­риодической слагающей тока к.з. генератора; *tow —* время отключения к. з.

Рис. 7. Расчетные кривые от­носительных токовых им­пульсов (г ») и импульсов квадратичного тока (В»)..

/ —■ турбогенераторы (кроме

ТВВ-800) и синхронный компенса­тор КСВ-100; // — гидрогенераторы, синхронные компенсаторы (кроме КСВ-100) и турбогенератор ТВВ-800.

Примечание. При проверке термической стойко­сти проводников и аппаратов, установленных в цепи ге­нератора

^к.п = ^п.О.г ^отк.г,

где /Отк.,г — время отключения к. з. в цепи генератора.

Импульс квадратичного тока от апериодической сла­гающей определяется с учетом разновременности затуха­ния апериодических токов от энергосистемы и генератора

Вк.а-/п,сТа.с + ^.0.гТа.Г+ ....\_ (Н)

Та,с Та,р

где Та,г — постоянная времени затухания апериодической- слагающей тока к. з. от генератора (берется по ката­логу).

Суммарный импульс *Вк* определяется по (7), (10) и

в) Для схемы работы на сборные шины энергосисте­мы и электродвигателей все двигатели заменяются од­ним с усредненными параметрами.

Затухание периодического тока к. з. от такого эквива­лентного двигателя учитывается приближенно о некото­рой постоянной времени *Т'я »*

*I* **и. 2<ОТК**

5к,п *— 1п,а ^отк* + 2Zn,c /п.О.д *Тд* — е д

/ \

+ 0Мо.д7'Л1 —е Гд Л

(12)

где *1П,*о.д — начальное действующее значение периодиче­ской слагающей тока к. з. от эквивалентного электродви­гателя; Тд—время затухания периодической слагающей тока к. з. электродвигателей.

Импульс квадратичного тока от апериодической сла­гающей определяется из выражения

Вк,а— (7п,с/П10-,д) Га,сх\1—*С*

*Т* I

а,ск Л (13)

В этой формуле постоянные времени затухания апе­риодических токов от системы и электродвигателей заме­нены обобщенной постоянной времени

У с = Т'а.о 7и,с ~Ь Т'а.д Лг,о,Д (14)

Лг,с +*1 п,о,я*

где Та,о — постоянная времени затухания апериодическо­го тока к. з. системы; *Тлл —* то же для электродвигателей.

Результирующий импульс определяется по (7), (12) и (13).

Выше даны выражения для расчета *Вк* в случае пре­обладания в группе электродвигателей синхронных ма­шин; если же электродвигатели в основном асинхрон­ные, то

*Вк* = До (*10ТК* + Та,4 + До.д (0,5 *Т'д* + Та,е4 +

+ 2Лх,сЛг,о,Д + Га.сх).

Примеры практической проверки оборудования на термическую стойкость по выражениям (7) — (14) приве­дены в § 13.

В основном все практические задачи, связанные с тер­мическим действием тока к. з., сводятся к обеспечению термической стойкости оборудования. Для достижения этой цели прибегают в случае необходимости к ограни­чению значения тока к. з. путем реактирования, секцио­нирования или к уменьшению длительности существова­ния к. з. Иногда оба эти способа ограничения нагрева от тока к. з. применяют одновременно.

1. **ВЫБОР ИСХОДНЫХ УСЛОВИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ**

*Принятые допущения.* В расчетах токов к. з., приве­денных ниже, приняты следующие допущения:

не учитываются токи нагрузки;

не учитываются емкости, а следовательно, и емкост­ные токи в воздушной и кабельной сети;

трехфазная сеть принимается симметричной, или со­противления фаз — точно равными друг другу;

отсутствует насыщение стали электрических машин (генераторов, электродвигателей, трансформаторов);

не учитываются токи намагничивания трансформато­ров;

не учитываются активные сопротивления генераторов, трансформаторов и реакторов, за исключением случаев, когда требуется определять постоянные времени затуха­ния свободных токов;

не учитывается сдвиг по фазе э. д. с. различных источ­ников питания, входящих в расчетную схему.

В соответствии с назначением расчета токов к. з. (для выбора или проверки аппаратуры, вычисления уставок релейной защиты, подбора разрядников для грозозащиты линий электропередачи и подстанций, анализа аварийных отключений и т. п.) определяют исходные условия. Это означает выбор расчетной схемы сети, режимов к. з., ви­да к. з. местоположения точек к. з. и момента времени к. з.

*Расчетная схема сети.* На расчетной схеме сети в од­нолинейном изображении указываются источники пита­ния (энергосистема, генераторы) и элементы сети (линии электропередачи, трансформаторы, реакторы), связыва­ющие источники питания с точками к. з., а также пара­метры всех упомянутых элементов, необходимые для рас­чета.

Электродвигатели напряжением выше 1000 В вводят­ся в расчетную схему в качестве дополнительного гене­рирующего источника при условии, если они связаны с местом к. з. непосредственно, кабельными линиями, токо- проводами или через линейные реакторы.

*Режимы к. з.* В зависимости от поставленной задачи может потребоваться определение не только максималь­ных, но и минимальных значений токов в месте к. з. и по элементам расчетной, схемы, а также остаточных напря­жений в различных точках сети.

Для решения задачи производится исследование рас­четной схемы и выясняется, какие элементы расчетной схемы должны быть дополнительно включены или выве­дены для получения большего или меньшего значения тока к. з., большего или меньшего остаточного напряже­ния на шинах. Такого рода предварительная работа с расчетной схемой называется выбором расчетных режи­мов.

Если расчетная схема составлена для нормальных ус­ловий работы сети, а в большинстве случаев это бывает так, то исходный режим, при котором рассчитывается к, з., называется нормальным режимом. Все ос­тальные режимы, выбранные для расчета, отличные от нормального, обычно характеризуются другими парамет­рами энергосистемы (§ 8) или измененным состоянием элементов расчетной схемы. Например, в нормальном ре­жиме генераторы ТЭЦ работают параллельно, в мини­мальном — раздельно.

Расчетным режимам придаются смысловые названия исходя из значения тока к. з., полученного при расчете нормальный, максимальный, минимальный и т. п. или сообщается цифровая нумерация: I, II, III и т. д.

При перспективных расчетах максимальные режимы к. з. следует определять с учетом перспективного разви­тия сети.

Расчеты должны производиться по режимам, соответ­ствующим прохождению по рассматриваемому участку сети наибольшего или наименьшего тока к. з. Так, напри­мер, проверка электротехнического оборудования на тер­мическое и электродинамическое действие токов к. з. должна производиться по наиболее тяжелому режиму, когда по рассматриваемому элементу проходит макси­мальный ток. Напротив, проверка чувствительности ре­лейной защиты производится по наименьшему току к. з., соответствующему минимальному режиму.

Не следует искусственно осложнять условия, приме­няя наложение ремонтных режимов, или ориентировать­ся на временные схемы, создаваемые при переключениях в сети, йспытаниях оборудования и т. п. Например, при выборе расчетного режима для настройки устройств ре­лейной защиты не следует считаться с наложением ре­монтных отключений двух питающих элементов (допус­тим, линии и трансформатора) из трех, если в эксплуата­ции такие совпадения не допускаются; при выборе рас­четного режима для проверки аппаратуры не нужно считаться с кратковременным включением на параллель­ную работу питающих трансформаторов, если в нормаль­ных условиях это запрещается.

*Вид короткого замыкания.* Вид к. з. определяется за­дачей расчета. Tafe, например, проверка аппаратов на электродинамическую стойкость или механическое дейст­вие тока к. з. должна производиться по трехфазному к. з., дающему наибольшее электромеханическое усилие меж­ду проводниками в начальный момент к. з,

Стойкость оборудования к термическому (тепловому) действию тока к. з. также проверяется по трехфазному К. 3.

В расчетах релейной защиты, смотря по обстоятель­ствам, могут быть использованы токи трехфазного, двух­фазного, двухфазного на землю и однофазного к. з.

*Местоположение точек короткого замыкания.* При проверке электрооборудования на электродинамическую или термическую стойкость точки к. з. следует распола­гать таким образом, чтобы при этом проверяемое обору­дование находилось в наиболее неблагоприятных усло­виях.

При выборе уставок релейной защиты точка к. з. при­нимается, в зависимости от назначения выполняемого расчета, в конце или в начале защищаемого участка.

*Момент времени короткого замыкания.* Момент в про­цессе к. з., для которого должны быть определены токи или остаточные напряжения, полностью зависит от ха­рактера расчета. Например, для проверки отключающей способности выключателя производится расчет тока к. з. для времени т, равного собственному времени отключе­ния выключателя с добавлением 10 мс; для проверки чувствительности токовой защиты, действующей с вы­

держкой времени, необходимо определить ток для момен­та к. з., соответствующего выдержке времени защиты. В большинстве случаев для проверки чувствительности релейной защиты допустимо пользоваться значением то­ка к. з. для начального момента времени, что упроща­ет расчет. При этом уменьшение тока к. з. с течением времени учитывается соответствующим коэффициентом запаса.

1. **СОСТАВЛЕНИЕ И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ**

Схема замещения для расчета токов к. з. составляет­ся по расчетной схеме сети. Для этого все без исключе­ния элементы схемы заменяются соответствующими элек­трическими сопротивлениями, а для источников питания, кроме того, указываются значения э. д. с.

Полное сопротивление линии электропередачи z== *— V*r2-|-x2 записывается на схеме через составляющие *г* и *х* следующим образом: вначале пишется *г,* затем х; в результате запись приобретает вид: г; *х.*

При составлении схемы удобна запись сопротивлений дробью: в числителе указывается порядковый номер эле­мента, в знаменателе — значение сопротивления. Элемен­ты с магнитосвязанными цепями — трансформаторы — вводятся в схему своими эквивалентными электрически­ми сопротивлениями (§ 8). Схему замещения, включаю­щую эквивалентные сопротивления трансформаторов, на­зывают эквивалентной схемой замещения.[[1]](#footnote-2)

В большинстве случаев схема сети содержит одну или несколько ступеней трансформации.

Для составления эквивалентной схемы замещения вы­бирается основная, или базовая, ступень трансформации и все электрические величины остальных ступеней приво­дятся к напряжению основной ступени.

Для приведения используются известные соотноше­ния:

*Ё^Е^п^,* ..., пп);

(15)

*U^U^n^,* ..., /гп);

1. *= i (* !——Y (16)

*Xn^ng, .... nn)*

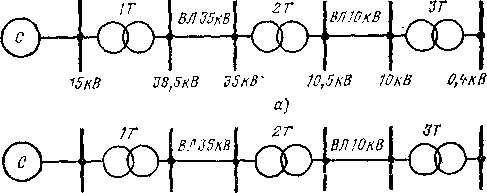
По закону Ома и на основании (15) и (16) приведен­ное сопротивление выразится как

1. *= 2 (ГЩ!,,* nn)2; ]

*°х = х(пхп&,* .... лп)2; (17)

г = г(л1п2п3, .... nn)2. J

Во всех указанных соотношениях *П\,* «2, *tig,..., пп —* коэффициенты трансформации последовательно включен­ных трансформаторов, определенные в направлении от основной ступени к ступени, где производится пересчет величин.



*37K3 37КВ Щ5кВ iO,5xS О^кв*

Рис. 8. Схемы к примерам 1 и 2.

*Пример 1.* Задано сопротивление, Ом, трансформатора *ЗТ* х8т= *~х,* подсчитанное для ступени 0,4 кВ (рис. 8, *а).* За базовую сту­пень принято напряжение 115 кВ на шинах системы. Определить сопротивление трансформатора *ЗТ,* приведенное к базовой ступе­ни напряжения.

Коэффициенты трансформации трансформаторов *IT, 2Т, ЗТ,* со­ответственно равны:

115 35 10

1 38,5 2 10,5 3 0,4

Отсюда на основании (17)

° \_ ( 115 )3 ( 35 V [ 10 V

Хзт~\ 38,5 / ’ ( 10,5 / ’ ( 0,4 / ’

Для приближенных практических расчетов рекомен­дуется заменять действительные коэффициенты транс­формации и номинальные напряжения элементов схемы смещения средними номинальными напряжениями, кВ, до следующей шкале: 515; 340; 230; 154; 115; 37; 24; 20; 18; 15.75; 13,8; 10,5; 6,3; 3,15; 0,69; 0,525; 0,4; 0,23; 0,127, за исключением реакторов с завышенным номи­нальным напряжением по отношению к номинальному напряжению установки, например реакторов 10 кВ, ис­пользуемых в установках 6 кВ.

После замены номинальных напряжений средними приведение величин к основной ступени значительно уп­рощается, и формулы пересчета приобретают вид;

ср'6.;

*Ucp*

*I==I-Uc>' ;* (19)

t/Cp,6

*х = х* (20)

\ б'ср /

*г = г{-^]2.*

\ б'ср /

При перемножении коэффициентов трансформации в выражениях (15) — (17) напряжения всех промежуточ­ных ступеней сокращаются и остается лишь отношение двух напряжений — основной (базовой) ступени и той ступени, на которой производится пересчет величин.

*Пример 2.* По заданному сопротивлению, Ом, трансформатора 3T х3т = х (рис. 8,6) определить сопротивление трансформатора, приведенное к базовой ступени *Us =* 115 кВ.

По выражению (20)

о / 115 V

xQT = *х* I

ЗГ \ 0,4 )

После того как в эквивалентной схеме замещения э. д. с. и сопротивления приведены к базовой ступени на­пряжения, схема замещения упрощается или свертывает­ся относительно точки к. з. Упрощение состоит в том, что точки приложения э. д. с. объединяются и э. д. с. схемы заменяются эквивалентной э. д. с. *Еэк,* сопротивления схемы путем последовательного и параллельного сложе­ния, трансфигурации из треугольника в звезду и т. в., превращаются в суммарное или результирующее сопро­тивление *zs* или xs (рис. 9, й).

Иногда объединение цепей полностью не производит­ся и заканчивается на двух-, трех- или многолучевой звезде (рис. 9, б—г).

На основании закона Ома и дополнительных условий, характеризующих тот или иной вид к. з., по результирую-

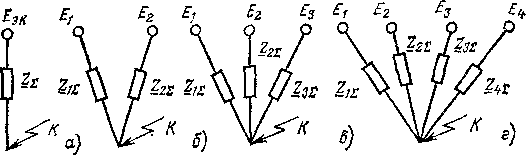


Рис. 9. Упрощение схемы замещения до одной *(а)* или нескольких результирующих ветвей *(б* — г).

щим э. д. с. и сопротивлению определяется суммарный ток в точке к. з.

Если при разных э. д. с. в ветвях помимо суммарного тока к. з. требуется определить токораспределение по ветвям, следует использовать для расчета тока к. з. прин­цип наложения (см. далее), модификацию принципа на­ложения с применением собственных и взаимных сопро­тивлений [1] или другие способы расчета тока к. з. с не­одинаковыми э. д. с.

Для получения токораспределения по ветвям при рав­ных э. д. с. схему (рис. 9, *а)* необходимо развернуть пол­ностью или частично в обратном направлении.

Полученные токи имеют истинные значения только для основной ступени трансформации. Для других ступе­ней их следует пересчитывать в соответствии с выраже­нием (19).

Если э. д. с. источников не равны, эквивалентная э. д. с. для двух ветвей схемы определяется по формуле

*~~£~~~~эн=а~~ ~~Е~~~~1~~~~у~~~~к~~~~±Е~~~~2~~у^} (21)*

*У1 + У 2*

где *у±* = 1/Xj и *у2* = 1/х2,

В частном случае, когда *ЕХ=Е2,* вычисления э. д. с« Вэк не требуется; очевидно, что *ЕЭК=ЕХ — Е2.*

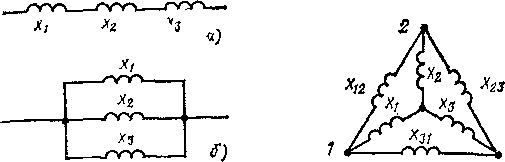
Сложение сопротивлений (рис. 10) выполняется в со­ответствии с выражениями:

при последовательном соединении элементов схемы замещения

хэк *х±* Ч~ *х2 +* (22)

при параллельном соединении элементов

Хэк = —i 5 р-. (23)

*а* — соединенных последовательно! *б* — параллельно.

**\*1 Xg Xg**

Рис. 10. Сложение сопротив­лений.

Рис. И. Преобразование тре­угольника сопротивлений в эк­вивалентную звезду и, наобо­рот, звезды сопротивлений в эквивалентный треугольник.

Если элементы схемы замещения составляют тре­угольник (рис. 11), к вершинам которого подключены ис­точники питания, то для упрощения схемы замещения и определения токов от каждого источника в отдельности производится преобразование схемы иЗ треугольника в звезду.

Сопротивления эквивалентной звезды определяются следующим образом:

***v . Х12Х31***

Д1 ■' ,

\*12 + [[2]](#footnote-3)23 4" \*31

v \*23 \*12 ,

(24)

■\*2 ' ♦

\*12 + \*23 + \*31

\*31 \*23

Л-q ' ■ •

Преобразование из звезды в эквивалентный треуголь­ник (рис. 11) находит применение при вычислениях тока по расчетным кривым, аналитических расчетах несим­метричных к. з. и производится в соответствии с выра­жениями:

Л-12 — Л-1 “Ь Л-2

*Х23 = Х2 + Х3 +*

(25)

*Х31 — х3 +* 4-

В преобразованиях схем, о которых говорилось выше, генерирующие ветви не затрагиваются. Однако возмож­

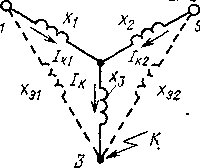
ны преобразования с исполь­зованием генерирующих вет­вей, как например: звезда в схеме замещения заменяется эквивалентным треугольни­ком, треугольник разрезает­ся по вершине, в которой приложена э.д. с., и эта э. д. с. сохраняется на кон­цах полученных ветвей (см. [4])-

Рис. 12. Схема к расчету то­ков к з с помощью коэффи­циентов распределения.

В ряде случаев преобра­зование заканчивают после получения схемы замещения в виде трехлучевой звезды

*Xi, Х2* с общим сопротивлением хз до точки к. з. и с двумя объединенными источниками питания. Токи от каждого источника вычисляют с помощью коэффициентов распре­деления (рис. 12). Коэффициент распределения показы­вает, какая доля тока к. з., принятого за единицу, созда­ется источником питания данной ветви при условии, что э. д. с источников равны.

Очевидно, что в сумме коэффициенты распределения равны единице. Для двух ветвей С’1+Сг= 1.

Определение коэффициентов *Ci* и *С2* производится по закону Кирхгофа из соотношений сопротивлений:

у-, ***X f X***

Ч = и С2 =

или

где *х ~*? суммарное сопротивление схемы до

***Х1 + Х2***

точки объединения лучей.

Для определения токов по ветвям находят эквивалент­ные сопротивления, непосредственно связывающие источ­ники питания с точкой к. з., или взаимные сопротивления между генераторами и точкой к. з.:

\*ЭК1= (26)

где ***х% =*** — h

***х2***

Подставляя в (26) значения xs, Ci и С2, получим:

*ХЭК1 = Х3 + Х1+^-,*

***+***

***. ХлХ&***

*Х3 + -^.*

*Х1*

Нетрудно заметить, что сопротивления хэк соответст­вуют сторонам эквивалентного треугольника (25).

Для нахождения токов в ветвях схемы замещения при источниках питания с неравными э. д. с. может быть ис­пользован принцип наложения. Суть этого принципа со­стоит в том, что действительный режим представляется как результат наложения двух или нескольких условных режимов, каждый из которых характеризуется наличием одной э. д. с. при всех остальных, равных нулю.

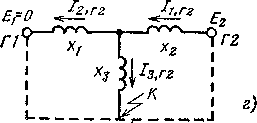
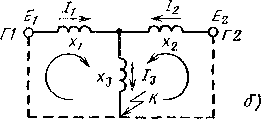
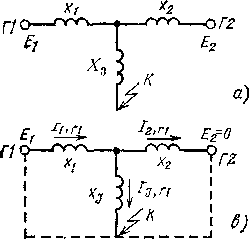
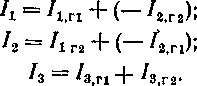
Рассмотрим применение принципа наложения для наиболее часто встречающегося в практике случая с дву­мя источниками питания и общим сопротивлением в мес­те к. з. (рис. 13, й) :

для наглядности схема замещения изображается в виде двух контуров с генераторами *Г1* и *Г2* (рис. 13,6);

задается положительное направление обхода контура по часовой стрелке или против для правильного сумми­рования токов в контурах;

поочередно приравниваются нулю э. д. с. генератора *Г 2* и генератора *Г1* рис. 13, в, г и определяются токи в контурах от каждого генератора;

искомые токи к. з. находятся суммированием токов от генераторов *Г1* и *Г2* в схемах рис. 13, *в, г* условных режимов:



(27)

Рис, 13. Схема к расчету токов к. з. методом наложения.

а —схема замещения; *б —* результирующая схема; *в, г —* схемы условных ре­жимов.

1. **ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЕДИНИЦ ДЛЯ РАСЧЕТА ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ**

Расчет токов к. з. может производиться в абсолют­ных (именованных) или относительных единицах.

Выражение значений в относительных единицах, про­центах или долях номинальной или принятой базовой величины знакомо из курсов физики и электрических машин. Также известно, что сопротивления электричес­ких машин и трансформаторов в паспортах и каталогах ' задаются в относительных единицах.

При расчете в относительных единицах все величины сравниваются с основными или базовыми.

Относительное выражение величин удобно для оцен­ки влияния того или иного участка схемы или отдельно­го элемента на результат расчета. По способу относи­тельных единиц просто определяется ток к. з. на выво- дах генератора иди максимально возможный ток к. з. за трансформатором (§ 9), если известны их номиналь­ные параметры.

Для расчета в относительных единицах сначала вы­бирают базовые величины или условия: мощность Sg, напряжение *U&,* ток *h* и сопротивление хо или £б.

Обычно задаются двумя величинами — базовыми мощностью и напряжением, остальные две — ток и со­противление — получают из уравнений мощности и за­кона Ома: или

За базовое напряжение обычно принимается номи­нальное *Uhom* или среднее расчетное *Ucv* напряжение какой-либо ступени трансформации.

При выборе базовой мощности руководствуются тем, чтобы порядок относительных значений, полученных при расчете, был удобен. Чаще всего базовую мощность принимают равной 100 МВ-А или 1000 МВ-А, но иног­да останавливаются на номинальной мощности какого- либо элемента, если она несколько раз повторяется в схеме.

Относительные величины выражаются следующим образом:

р  *, Е*

£[[3]](#footnote-4)(б) ~ -77—,

*■П - U •*

(28)

(29)

ы#(б) — —- ,

Об

*J I .*

'б

г  
г\*(б) ;

ze

*X г*

(30)

-v\*(6>= —; *г\*{б)~ — ;*го гб

или

*X  
X\** (б) •

хб

Индекс \* (звездочка) указывает на то, что речь идет об относительной величине, индекс «б» говорит о том, что она приведена к базовым условиям.

Базовое сопротивление *zG* или *хв,* как правило, непо­средственно в формулу пересчета (30) не вводится, а выражается через напряжение и ток или мощность:

\_ Гз /в *S6*

г\* (б) — *z =; г ;*

*\*( ив и2*

*х\*(б)=х--3* ; (31)

^б *и2*

Относительное базовое сопротивление показывает, какая часть базового напряжения, приложенного к це­пи, падает в рассматриваемом сопротивлении при про­хождении по нему базового тока.

Относительные величины можно выражать как в до­лях принятой базовой величины, так и в процентах. На­пример, *х* % =100 *х\*.*

Для расчета токов к. з. в относительных единицах все сопротивления и э. д. с. эквивалентной схемы замещения приводят к базовым условиям. Для основной базовой ступени это приведение производится по (28), (29) и (31).

Для остальных ступеней трансформации устанавли­ваются свои базовые условия путем пересчета базовых величин основной ступени трансформации; не пересчи­тывается только базовая мощность — она остается неиз­менной на всех ступенях:

йб = *иб ( ! ) ;* (32)

/° Ьб

/б = 7б («i«2% *пп),*

или

'б - ""7-'г-

Уз *иб*

где «1, *П2,* п3,..., *пп —* коэффициенты тра формации по­следовательно включенных трансформат в, определен­ные в направлении от базовой ступени к той ступени, на которой производится приведение величин к базовым условиям.

(33)

С учетом (32) и (33) относительные величины на всех ступенях трансформации, кроме базовой, опреде­ляются по выражениям:

р - Е .

£\*(<>) — о >

б'в

^\*(6) = — ;

*иб*

*I i .*

== —»

7б

^\*(6) 2 о. ,

Sg

х\* (б) *X* о7 >

«б

*r\*W* =/--зт-.

*и26*

Не будет ошибкой, если напряжение, ток и сопротив­ление любой ступени трансформации привести к основ­ной ступени, а затем отнести к базовым условиям, вы­бранным для этой ступени, т. е.:

*и\*[б)* — ~г-;

(34)

(35)

(36)

о  
г *I .*

(38)

(39)

*'б*

\_\_ ° 5б  
*Х\*(.б) — X ;*

*"б*

*° $бr\*{6T = r-f~.*

*и2б*

Если расчетные параметры элементов схемы заданы в относительных номинальных единицах, то для перево­да их в базовые пользуются следующими соотношения­ми:

О

*„ \_ v Уном /л п\*

Хж(б) —^\*(иом) ~ » (4U)

Люм *Уб*

иначе,

С 7/2

V — V 6 Н0М /1П

*х\*(б)—*АГ\* (ном) • (41)

'^ном *Uб*

Выражениями (40) и (41) можно пользоваться для пересчета величин как на основной, так и на всех других ступенях трансформации, только очевидно, что для ос­новной ступени не требуется производить приведение ба­зовых величин.

Если номинальное напряжение аппарата *UHOm* равно или приравнено к среднему напряжению *Ucp* ступени, на О

которой он установлен, и напряжение t/б определяется по средним напряжениям ступеней, выражения (40) и (41) упрощаются и в результате приобретают вид:

SO

*х\** (б) — АГ\* (ном) ~ (42)

'ном

ИЛИ

я«(б) = АГ\* (ном) "7“^ • (43)

йном

Если расчет производится в именованных единицах, а параметры схемы заданы в относительных номиналь­ных единицах, то необходимо произвести пересчет, кото-

Таблица 1. Пересчет *U, I* и *х* в относительные базовые величины

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Характер пересчета | Величи- иыг подле­жащие приведе­нию | Расчетные выражения | |
| Основная ступень трансформации | Прочие ступени трансформации |
| Из именован - ных в относи­тельные базо­вые величины | *и* | *и иб* | 0  у и  *6' v°* |
| *I* | *I h* | *о*  *1 1*  или  0 /б  'б |
| *X* |  | Sg о *Sq*  *х*  или *х ——* |
| Из относитель­ных номиналь­ных в относи­тельные базо­вые величины | *X* | г /б^ноМ  «(ном) ■  \*ном *иб* | 0  *Y* ном  \*,(ном) ■ — о -  /ном *Us* |
| *X {б*  %(иом) *1* ном | 0  *X Гв*  \*(ном)  \* ном |
| \*\*  “а?  о  S  СО Со  § g с:  с: о\ to s | S6 t^HOM  «(HOM) " о,  Зном^б |
| *X $б*  %(ном) ’с  ^ном | *X*  %(ном)  ^ном |

рый для сопротивлений- производится на основании (31)- с заменой базовых величин номинальными:

Г 12  
с/ном .. ном

***X*** X\* (ном)  ***X\**** (ном) “

1/ о ***г*** йном

***г*** 0 I ном

(44)

соотно-

,,2

^ном \_ - ином

' — '#(ном) <\*(ном) \_ .

1/ Q / ■ ЛНОМ

' ° ' ном

Для наглядности наиболее употребительные шения величин сведены в табл. 1.

1. ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕМЕНТОВ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ

*Синхронные генераторы.* Для расчета должны быть известны: номинальная мощность SHom', номинальное На­пряжение £/ном; сверхпереходное индуктивное сопротив­ление *x'd ~* сверхпереходная э. д. с. постоянная вре­мени затухания апериодической составляющей тока трех­фазного к. з. *Т^’1.*

Перечисленные параметры, кроме э. д. с., даются в паспортных данных машины, а в случае отсутствия мо­гут быть взяты из справочных таблиц.

Электродвижущая сила *Е"* (фазная величина) опре­деляется выражением

*Е* « £40М + /НОм *Xd* sing)\*, (4 5)

где f/ном — номинальное фазное напряжение; 7Ном — но­минальный ток; д> — угол между током и напряжением в доаварийном режиме.

Приближенно *Е"* можно подсчитать по номинально­му напряжению *Ua0K:*

*F" ~ klJ*

Значения коэффициента *k,* равного э. д. **с.** *Е"* в отно­сительных единицах, приведены в табл.2.

Таблица 2 Средние значения *x'd* и *Е",* отн. ед., при номинальных условиях по [1]

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Тип машины | *xd* | *Е’* |
| Турбогенератор мощностью: |  |  |
| до 100 МВт | 0,125 | 1,08 |
| 100—500 МВт | 0,2 | 1,13 |
| Гидрогенератор с демпферными об­мотками | 0,2 | 1,13 |
| Гидрогенератор без демпферных об­моток | 0,27 | 1,18 |
| Синхронный компенсатор | 0,2 | 1,2 |
| Синхронный двигатель | 0,2 | 1,1 |
| Асинхронный двигатель | 0,2 | 0,9 |
| Обобщенная нагрузка | 0,35 | 0,85 |
| \* См. приложение (П4). Индекс *q* | при э. д. с. в (45) опущен, | |
| так как выражение (П4), данное как приблизительное | | дЛя *Е* со- |
| ответствует полной расчетной э. д. с. *Е'* пряжение *U.* | , точнее ее проекции на на- | |

*Эквивалентные источники питания.* Если имеется ис­точник питания, заданный суммарной мощностью гене­раторов того или иного типа S2 и результирующим соп­ротивлением для начального момента времени *хс,* то та­кой источник может рассматриваться как эквивалентный генератор с номинальной мощностью ЗНОм,хи сверхпере­ходным сопротивлением *хс.*

Если источником питания является мощное энергети­ческое объединение, заданное результирующим сопро­тивлением хс, током к. з. /к или мощностью SK = = Гз *uQVi*к, то можно считать, что такое объединение яв­ляется энергосистемой, удаленной от шин потребителя на сопротивление хс.

Когда необходимые данные об энергосистеме отсут­ствуют, расчеты производят по предельному току отклю­чения /отк выключателей, установленных на шинах свя­зи с энергосистемой. Ток отключения приравнивается току к. з. 4 и отсюда определяется сопротивление хс.

*Электродвигатели напряжением выше 1000 В:* рас­сматриваются аналогично генераторам. Сверхпереход­ная э. д. с. *Е"* определяется как *Е" ^Ш-ЛО,Л.* Коэффициент *k* соответствует Е\*' и берется по табл. 2.

Сверхпереходное сопротивление х".\* в паспорте дви­гателя в отличие от генераторов не указывается и опре­деляется по кратности его пускового тока:

/ном 1

Ч k >

*КП* ' ном \*п

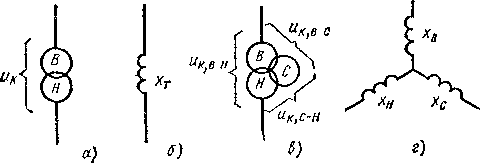
где /ИОм — номинальный ток двигателя; *ka —* кратность пускового тока к номинальному.

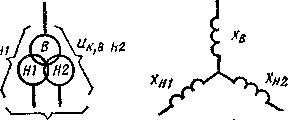
*Обобщенная нагрузка.* Обобщенной нагрузкой приня­то называть смешанную нагрузку, состоящую из нагруз­ки на освещение, питание электродвигателей, печей, вы­прямителей и т. п. Средние расчетные параметры такой нагрузки даны в табл. 2. Указанные значения отнесены к среднему номинальному напряжению ступени транс­формации в месте подключения нагрузки и полной мощ­ности нагрузки (МВ-А).

*Двухобмоточные трансформаторы,* (рис. 14, *а, б).* К расчетным паспортным параметрам трансформатора от­носят: номинальную мощность 5ВОм; номинальные на­пряжения обмоток t/цом,в и (7Яом,н; напряжение к. з. «к %; потери к. з. *Рк* или отношение х/г.

Поясним сущность параметра «к Не­

известно, что между обмотками трансформатора имеется только магнитная связь. Эквивалентное элек­трическое сопротивление первичной и вторичной обмо­ток трансформатора определяется из опыта к.з. Опыт состоит в следующем: вторичная обмотка трансформато­ра закорачивается, после чего трансформатор нагружа­ется номинальным током-, затем на выводах первичной





*3) е)*

Рис 14. Двухобмоточный трансформатор (а) и его схема замеще­ния (б); трехобмоточный трансформатор (в) и его схема замеще­ния (г); двухобмоточный трансформатор с расщепленной обмоткой низшего напряжения (<5) и его схема замещения (е).

обмотки производятся замеры падения напряжения и потерь к.з. *Рк* в трансформаторе.

По данным опыта к.з. вычисляется напряжение к.з. как относительное падение напряжения в сопротивлении трансформатора при прохождении по нему номинально­го тока:

*ик % =* 1 оо % = ~~-EJXomZt~~ j 00 %, (46)

б^ном *UhOM*

где zT — эквивалентное электрическое сопротивление обмоток трансформатора.

Сравнив (46) и (31), нетрудно убедиться, что *ик %* соответствует сопротивлению трансформатора в относи­тельных единицах при номинальных условиях, т. е, “н % = 2т\*(цом) % •

Индуктивное сопротивление трансформатора исходя из Напряжения к. з. *ик* и потерь короткого замыкания *рк=31 ыгт* определяется как

Хт# % = *У2^ % —* Г2\* % .

Но поскольку активное сопротивление трансформа­торов сравнительно невелико, обычно принимают гт\* °/о«хт. % (рис. 14а, б).

Если для вычисления ударного тока к. з. возникает необходимость в определении активного сопротивления трансформатора гт, то это можно сделать на основании чотерь Рк, взятых из каталога или по кривым *xfr* (см. [4]).

*Трехобмоточные трансформаторы* (рис. 14, *в, г). Для* расчета должны быть даны: номинальная мощность’ SHOM; номинальные напряжения обмоток С/НОм,в, t/ном,с, ^ном,н; напряжения к. з. между обмотками «к,в-с %; ик,в-н%; «к,с-н%; потери к. з. *Рк* или отношение *х[г.*

Чтобы определить указанные напряжения к. з., опыт к. з. (см. двухобмоточные трансформаторы) проводится 3 раза — между обмотками В-С, В-Н и С-Н, причем каж­дый раз третья обмотка, не участвующая в опыте, оста­ется разомкнутой.

Из постановки опыта к. з. очевидно, что напряжение к. з. между обмотками можно выразить в виде суммы напряжений к з. этих обмоток, например ик,в-с = Ик,в+ +wK, с.

Записав аналогично в виде суммы все напряжения к. з. трансформатора и решив совместно три уравнения с тремя неизвестными, получим:

0/ (“к,В-с + “к,В-Н~• “к,С-н)%

Ик, В /0 = ;

*ик с% =* ~~■ ^■B-c + »K,~~~~i~~~~q~~~~:~~~~H-“~~~~K~~~~,B-H)o/o .~~ ~~(47)~~

о/ (“к,В Н +“к.с-н~~ ик,В-с)%

WK,H /0 = -— .

1 Номинальной мощностью трехобмоточного трансформатора SH0M является номинальная -мощность наиболее мощной его обмот­ки; к этой мощности приводятся относительные сопротивления трансформатора и потерн к. з.

В расчетах токов к. з. напряжения к. з. трансформа­тора, определенные из (47) и между обмотками, прирав­ниваются индуктивным сопротивлениям, т. е,

Wk, В % ~ (ном) % >

Wk,C% ~Л-С»(ном)%;

Wk,H% Л-НДном) % j

WK.B-c % ~ -^В-С.(ном)

WK,В п % ~ Хв-Щ(ном) % J

Wk,C-H% ~ .Vc-II,(hom) %.

Одновременно, е замером напряжения к, з. в каждом опыте к. з. измеряются потери к. з. Рк; таким образом, в протокол испытания трехобмоточного трансформатора заносят потери к. з, Рк,в.с, *Рк,в-н и Р к,с-н .*

Потерями к. з. трехобмоточного трансформатора на­зываются максимальные из возможных в трансформато­ре потерь *Рк,тах.* Потери *Рк,тах* указываются в каталоге на трансформатор.

Междуобмоточные активные сопротивления транс­форматора определяются по соответствующим потерям к. з.; активные сопротивления обмоток можно получить аналогично *ик,* применяя (47). При отсутствии данных по потерям к. з. для ориентировочных расчетов можно пользоваться кривыми *х/r,* см. [2].

*Двухобмоточные трансформаторы с расщепленной об­моткой низшего напряжения* (рис. 14, *д,* е). К расчетным параметрам трансформатора относят: номинальную мощ­ность обмотки высшего напряжения S ном,В ИЛИ КОМИ- нальную мощнрсть обмотки низшего напряжения Shom,hi(H2)[[4]](#footnote-5); номинальные напряжения обмоток {/нсм,в , Пном,н1(Н2); напряжения к. з. между обмотками Wk,в rii(H2) %5 «К,Н1-Н2%; потери к. з. Рк или отношение *х)г.*

Выражения для напряжений короткого замыкания каждой обмотки трансформатора аналогичны (47):

(“к,В-Н1 +“к,В-Н2 ~"к,Н1-Н2)%

(48) а/ (“к,В-Н1(Н2) + “к,Н1-Н2 ~~ “н,В-Н2(Н1))% •

WK Н1(Н2) /е = -

Напряжения к, з, обмоток расщепленного трансфор­матора по (48) и между обмотками приравниваются к индуктивным сопротивлениям:

Ок,В% ~ % \*,

Нк.НЦНЗ) % ~ Л'Н1(Н2) \*НОм %;

«к,В-Н1(Н2)% ~ Хв-Н1(Н2)4,ноч%;

Ик,Н1-Н2%Л^ ЯН1-Н2»(ном) %.

Определение активных сопротивлений расщепленных трансформаторов производится аналогично определе­нию этих сопротивлений для трехобмоточных трансфор­маторов.

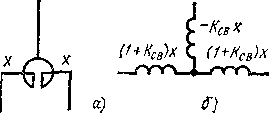


Рис. 15. Сдвоенный реактор (а) и его схема замещения (б),

В отличие от трехобмоточных трансформаторов в каталогах на расщепленные трансформаторы даются потери к.з. для обмоток В-Н1(Н2), отнесенные к мощ­ности обмотки низшего напряжения 5 ноч,ш<н2)

Для определения активных сопротивлений трансфор­матора, если потери к. з. неизвестны, можно применять кривые *xfr* из [4].

*Реакторы.* Расчетными параметрами реактора явля­ются: номинальное индуктивное сопротивление в омах или относительных единицах xH0M или х\*(НОМ) %; номи­нальное напряжение *U* ном» НОМИНаЛЬНЫИ ТОК /ном» номи- нальные потери ДР или отношение х/г.

В случае использования сдвоенных реакторов индук­тивное сопротивление задается для ветви реактора и, помимо перечисленных параметров, указывается коэф­фициент связи между ветвями Асв, обычно йсв —0,5 (рис. 15).

Известно, что сдвоенный реактор конструктивно от­личается от обычного выводом средней точки обмотки, разделяющим обмотку реактора на две ветви.

Ознакомиться с теорией сдвоенного реактора можно по [6].

Расчет активного сопротивления реакторов произво­дится по номинальным потерям или по отношению *х/г* из [4]. При использовании потерь на фазу реактора рас­чет выполняется таким образом: для одинарных реак­торов ДР=/д0Мг; для сдвоенных реакторов А/?=2/2омг. *Линии электропередачи.* Сопротивления линий электро­передачи в расчетных схемах характеризуются удель­ными сопротивлениями на 1 км длины.

Индуктивное сопротивление линии зависит от рас­стояния между проводами и радиуса провода [3].

В качестве средних расчетных значений индуктивно­го сопротивления на фазу следует принимать:

для воздушных линий:

6—220 кВ 0,4 Ом/км

330 кВ (два провода на фазу) 0,33 Ом/км

400—500 кВ (три провода на фазу) .0,3 Ом/км

для трехжильных кабелей:

35 кВ > 0,12 Ом/км

6—10 кВ 0,08 Ом/км

3 кВ 0,07 Ом/км

Активное сопротивление должно учитываться в слу­чаях, если его суммарное значение составляет более одт ной трети индуктивного сопротивления всех элементов схемы замещения до точки к. з., т. е. когда rs^l/3xs или если оно используется для определения затухания апериодического тока к. з. Активное сопротивление ли­ний может быть взято по справочным материалам или для медных и алюминиевых проводов подсчитано

У?

где *I —* длина линий, м; *q —* сечение провода, м2; у — удельная проводимость, МСм/м (для меди у=53 МСм/м, для алюминия у=32 МСм/м.

Общее индуктивное сопротивление стальных прово­дов на 1 км длины определяется как сумма внешнего *X'* и внутреннего *х"* сопротивлений: *x—x'-j-x".* Внешнее индуктивное сопротивление принимается равным

**Таблица 3. Средние значения активного и внутреннего индуктивного сопротивлений стальных проводов**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Марка провода | *г,* Ом/км | *х’*, Ом/км | Марка провода | **|Г, 0М;КМ** | *X”,* Ол/км |
| ПС-70 | 2,1 | 0,5 | ПС-35 | 4,5 | 1,2 |
| ПС-50 | 3,4 | 0,8 | ПС-25 | 6,2 | 1,4 |

0,4 Ом/км так же, как расчетное сопротивление на фазу линий электропередачи напряжением 6—220 кВ.

Активное *г* и внутреннее индуктивное х" сопротивле­ния стальных проводов зависят от тока, который прохо­дит по линии, причем изменение сопротивления провода в свою очередь влияет на ток.

Для точного решения задачи по нахождению тока к. з. при такой зависимости применяют метод последо­вательных приближений: задавшись сопротивлением, определяют ток по кривым: *x"—f(I),* коррек­

тируют сопротивление и уточняют расчет; вычисления повторяют 2 -3 раза.

Однако для приближенного определения тока к. з. можно пользоваться некоторыми средними данными со­противлений [7], которые приведены в табл. 3.

1. ВЫЧИСЛЕНИЕ НАЧАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СЛАГАЮЩЕЙ ТОКА ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Напомним, что условиями, характеризующими трех­фазное к. з., являются симметричность схемы и равен­ство нулю междуфазных и фазных напряжений в месте к. з. (рис. 2):

*Uл,ав = U\*,bc ~ Uk,ca =* 0;

*Ук,А — Ur,B = Uk,C* = 0.

Таким образом, разность потенциалов цепи коротко­го замыкания от места подключения генерирующего ис­точника до точки к. з. равняется э. д.с. данного источ­ника.

Принимая во внимание сказанное, начальное дейст­вующее значение периодической слагающей можно оп­ределить по закону Ома:

*prf p"*

/(3) = Г(З) -—£ — £ , (49)

/зГ(хНш)Ч4

где 7"(3)— сверхпереходный ток трехфазного к. з.; *Е"—* междуфазная сверхпереходная э. д. с. генератора; 22 =]/'*(х”* + хвш)2 + г2ш— результирующее сопротивление цепи к.з.; *х"—* сверхпереходное индуктивное сопротив­ление генератора; хвш, гвш— соответственно индуктив­ное и активное сопротивление внешней цепи от выводов генератора до точки к. з.

В практических расчетах обычно *x’d* обозначают как *х",* опуская индекс *d.*

Без учета активного сопротивления (49) упрощается:

= =—= £ (50)

утх. i/T(\*'+U

где *Xs =х"-$-хвш —* результирующее индуктивное сопро­тивление цепи к. з.

В случае питания к. з. от энергосистемы расчетное выражение для определения периодической слагающей приобретает следующий вид:

/(3) \_ ^ср . *иср* (51)

г'3 + + ’

где Бср — напряжение на шинах энергосистемы;

= ]/ (хс + хвш)2 + г2ш — результирующее сопротивле­ние цепи к. з.; *xs —* результирующее индуктивное сопро­тивление энергосистемы относительно места ее подключе­ния в расчетной схеме; хвш, гвш — соответственно ин­дуктивное и активное сопротивления от места подклю­чения энергосистемы до точки к. з.

Без учета активного сопротивления периодический ток в данном случае будет равен:

/(3) = *исх>* Бср t (52)

*V3* х2 Уз (лс + хвШ)

где *х* s — результирующее индуктивное сопротивление цепи к. з.

5(3)=ГЗ£/Ср/<3), (53)

Зная ток к. з., можно вычислить мощность к, з., кото­рая в заданной точке к. з. при базовом напряжении оп­ределится как

где /<3) — ток в рассматриваемой точке к. з., приведен­ный к напряжению 7/ср.

Расчет в именованных единицах. Опреде­ление токов к. з. производится в соответствии с (49)— (52) и формулами пересчета (15) — (20).

Мощность к. з подсчитывается по (53).

Вычисление сопротивления *хс по* заданному току 7(3) выполняется на основании (52) при *хвш—*0:

*х — ^ср*с /(3) ’

(54)

где *Ucp —* напряжение на шинах энергосистемы; /<3) — заданный ток к. з., приведенный к напряжению *Ucp.*

Сопротивление *хс* по заданной мощности к. з. 3® определяется из соотношения

*и2*

= (55)

5<з)

Для определения максимально возможного тока к. з. при повреждении за элементом расчетной схемы, напри­мер за линией, трансформатором и т. п., пользуются (52), предполагая, что данный элемент подключен непосред­ственно к шинам энергосистемы, т. е. считая хс = 0:

7<з) = \_ДД> (56)

*max ' >*

*У 3 х*

где *х—* индуктивное сопротивление элемента расчетной схемы, Ом.

*Пример 3.* Определить максимально возможное значение тока трехфазного к. з. в конце линии ПО кВ протяженностью 25 км. За расчетную ступень принимаем ^с₽=115 кВ. Индуктивное сопротив­ление линии (§ 8)

х= 0,4-25 = 10 Ом.

Искомый ток находим по (56):

(3, 115 000

= — = 6650 А.

*V* з-ю

*Пример 4.* Вычислить максимально возможный ток трехфазного к з. за реактором РБ10-630-25, включенным на напряжение 6,3 кВ.

На основании (56)

,ч. 6300

= —= = 14 600 А.

*V* 3-0,25

*Пример 5.* Составить схему замещения и вычислить ток трех­фазного к. з. не генераторном напряжении 6,3 кВ электростанции А (рис. 16, *а).*



7/5кЙ

*ВЛ 25км*

*2=0,4 Ом/км*

*К*

*И5кВ*

*4ОМВ-А*

*1 .*

*0,0266*

V *О*

*1  
0,0669*

*121/В,Зк8*

*17.^10,5%*

*2  
0,03*

*3*

*0,104*

*31,ША 6,ЗкВ*

*хЦ; 0,143 E'^=1,08S*

*К J±\_*

*0,151*

*2  
0,0756*

*3*

*0,268*

V*и к*

*0,381*

*Е’х=Г,О8В'*

*ил1*

Рис. 16. Схемы к примерам 5 и 15.

*а* — расчетная схема сети; схемы замещения; б. — в именованных единицах, в — в относительных единицах.

Номинальные напряжения элементов расчетной схемы прирав­ниваем средним напряжениям ступеней по рекомендованной шкале (§ 6).

В качестве основной (базовой) ступени выбираем Vo = 6,3 кВ.

Задаем порядковые номера элементам схемы замещения рис. 16, б и находим их сопротивления.

Энергосистема. В соответствии с (54) и (19)

6,3-6,3

*xL = —* — 0,0266 Ом.

Кз-7,5-115

ВЛ 1 1 0 к В. На основании § 8 и. (20)

/ 6,3 \г

х, = 25-0,4—— =-- 0,03 Ом.

й ’ I 1 1 Е I

Трансформатор 40 МВ-А. По выражению (44) пересче­та нз относительных в абсолютные значения

0,105-6,32

х3 = 0,104 Ом.

40

Генератор 30МВт. По (44)

0,143-6,З2

=0,151 Ом.

37,5

В данном случае схема замещения состоит из двух самостоя­тельных ветвей с питанием от энергосистемы и от генератора. Оче­видно, что параллельное сложение ветвей нецелесообразно.

При расчете тока к. з. по ветвям схемы замещения полный ток в месте повреждения определится как сумма токов от обоих источ­ников питания.

Питание от энергосистемы. Результирующее сопро­тивление цепи к. з. по (22)

xs = 0,0266 + 0,03 + 0,104 = 0,1606 Ом.

Ток к. з. в точке К по (52)

6300

= — = 22700 А.

*V* 3-0,1606

Питание от генератора. Ток в точке К по (50)

т 1,086-6300

/Р) = = 26200 А.

Кз-0,151

Суммарныйтокн месте повреждения

*1$ =* 22700 + 26200 = 48900 А.

*Пример 6.* Определить токи трехфазного к. з. иа шинах 10,5 кВ п/ст. *А,* шинах 10,5 кВ и 0,4 кВ п/ст. *Б* и шинах 10,5 кВ п/ст. *В,* а также ударный ток к. з. на шинах 10,5 кВ п/ст. *А* и *Б* (рис. 17, я).

За базовую ступень принимаем напряжение 10,5 кВ.

Обозначив элементы расчетной схемы порядковыми номерами, находим их сопротивления.

Энергосистема. На основании (54) и (19)

10,5-10,5

***хг = ——*** = 0,191 Ом.

У3.9-37

\* Индекс «6,3» говорит о том, что ток приведен к напряжению 6,3 кВ.

Трансформатор 6300 кВ-А п/ст. *А.* В соответствии о (44)

п п Ю,52

х, = х, = 0,07 = 1,225 Ом.

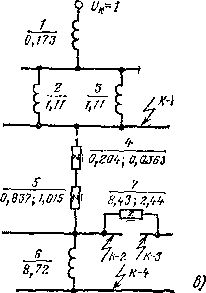
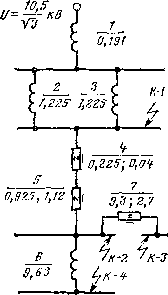
2 6,3

Трансформатор 6 3 0 к В-A п/с т. *Б:*

10,5»  
хв = 0,055 ——— = 9J63 Ом.

0,63

37кВ



6,3тыскЫ(~\ в,ЗтыскВА п/ст.Л

*ак=7%* f=< ^Л=7% *K-f*

*г»н* Y *ТМИ%Ю,5кВ*

Мабель с алюминиевыми х;7 Анилами ц~70мм% z , 7=0,08 Ом/км

i\ M=ot05 Ом/км &Л Яровой стальной

%=25ММ 2 ix’-o/t ом/км

ВЛ Пробод алюминии X ”=№ ом/км; 0=6,2 Ом/км

Вый ^дбмм2 х=оЛОм/км | г=0,33 Ом/км I

*■) Г, ЗОН 7А. 7 Х-2*

J ^5,S%

0,4 кв у /

0,5им

2;8КМ

10,5 кВ

1,5 КМ

п/еггк 6

*а)*

Рис. 17. Схемы к примерам 6 и 16.

ГАл-в-Л *[04кВ , о/ст, В*

а — расчетная схема сети, схемы замещения: б — в именованных единицах; *е* — в относительных единицах.

Линии 10 кВ (кабель с алюминиевыми жилами и ВЛ с алю­миниевыми проводами). Исходя из § 8, подсчитываем сопротивле­ния линий:

х4 = 0,08-0,5 — 0,04 Ом;

г4 = 0,45-0,5 = 0,225 Ом;

\*5 = 0,4-2,8= 1,12 Ом;

г6 = 0,33-2,8 = 0,925 Ом.

ВЛ 1 0 к В (со стальными проводами). В соответствии с табл. 3 внутреннее индуктивное сопротивление на 1 км длины для ПС-25 равно х"=1,4 Ом/км, активное г=6,2 Ом/км, отсюда:

х7= (0,4+1,4)-1,5 = 2,7 Ом;

*г-t* = 6,2-1,5 = 9,3 Ом.

Определяем токи трехфазного к. з.

Короткое замыкание в точке К-1. Результирующее сопротивление цепи к. з. по (22) и (23):

п , 1.225

х2 = 0,191 +—^—« 0,804 Ом.

Ток к. з. в точке К-1 в соответствии с (52)

,ч. 10500

= = 7550 А-

*V* 3-0,804

Расчет ударного тока. За отсутствием данных активное сопротивление системы 37 кВ принято равным нулю. Отношение индуктивного сопротивления к активному и активное сопротивление для трансформаторов 6,3 МВ-А типа ТМН (см. [4]):

-^ = 10; rs=0,l

1,225

яа 0,0613 Ом.

2

Г2(3)

Постоянная времени по (67) 0,804 а “ 314-0,0613

= 0,0418 с.

Ударный коэффициент, исходя из (66) 0,0!

А-уд=1+е о-0418 = 1,79.

Ударный ток по (66)

(О> = ]/2-1,79-7550= 19,1 кА.

Короткое замыкание в точке К-2. Результирующее индуктивное сопротивление цепи к. з.

1 225 «=0,191 +- 1-0,04 + 1,12 = 1,914 Ом.

2  
Результирующее активное сопротивление цепи к. з.  
rs = 0,225 + 0,925 = 1,15 Ом,

1 При к. з. в точке *К-2* поэтому необходимо учитывать

О активное сопротивление цепи.

Полное результирующее сопротивление

z2 = 1/17152+'1,9642 = 2,27 Ом.

Ток к з. в точке *К-2* на основании (51)

10 500 Л ,  
/foJS = ~~~ = 2670 А-

*Уз-2,27*

Расчетударноготока.

Активное сопротивление цепи к. з. (уточненное) с учетом актив­ного сопротивления трансформаторов 2X6,3 МВ-А[[5]](#footnote-6)

rs = 1,15 + 0,0613 = 1,211 Ом.

Постоянная времени по (65)

1,964

Ударный коэффициент в соответствии с (64)

0,01

йуд=1+е 0.00518 \_ljl5e

Ударный ток по (64)

/О» =1/2'. 1,15-2670 = 4,35 кА.

Короткое замыкание в точке *К-3.* Аналогично расче- там для точки к. з. *К-2* производим учет активного сопротивления.

Результирующее индуктивное сопротивление цепи к, з. с ис­пользованием подсчитанного сопротивления до точки к. з. *К-2*

xs = 1,964 + 2,7 «4,66 Ом.

Результирующее активное сопротивление цепи к. з. с учетом со­противления до точки К-2

rs = 1,15+ 9,3= 10,45 Ом.

Полное результирующее сопротивление

*zs =* ]/‘10,452 + 4,662 = 11,44 Ом.

Ток к. з. в точке *К-3*

10 500

<5 = 77= =530 А.

*V* 3-11,44

Короткое замыкание в точке *К-4.* Результирующее индуктивное сопротивление цепи к. з., исходя из сопротивления до точки к. з. К-2,

х2 = 1,964 + 9,63 « 11,59 Ом.

Результирующее активное сопротивление =1,15 Ом.

Значение активного сопротивления таково <—j, что учет его необязателен..

Ток к. з. в точке *К-4,* приведенный к стороне высшего Напря­жения 10,5 кВ трансформатора п/ст. *Б,*

,,, 10 500 н .

<5 = 77= =524 А.

*V* 3-11,59

*Пример 7.* Определить токи трехфазного к. з. на шинах 37 кВ и 6,3 кВ п/ст. *А,* шинах 6,3 кВ п/ст *Б* и шинах 6,3 и 0,4 кВ п/ст. *В,* а также ударный ток при к. з. на шинах 37 и 6,3 кВ п/ст. *А* (рис. 18, *а).*

За основную ступень напряжения принимаем *Ur,=* 115 кВ.

Находим сопротивления элементов расчетной схемы, приведен­ные к напряжению *Ue~* 115 кВ.

Энергосистема. В соответствии с (54)

115

х, = —— = 7,64 Ом.

Кз-8,7

В Л 1 1 0 к В По указаниям § 8

( xj = 0,4-12 = 4,8 Ом.

ВЛ 35 к В. По § 8 и (20)

/ 115 V

х5 = 0,4-10 =38,7 Ом.

Кабельная линия 6 иВ. По § 8 и (20)

/ 115 \2*хе* = 0,08-2 —— = 53,2 Ом;

\ 6,3 /

7 115 \з  
г8 = 0,33-2 —- = 220 Ом.

\ 6,3 /

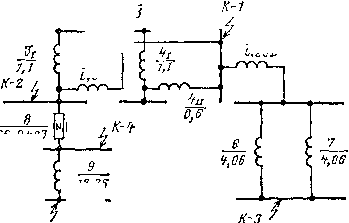
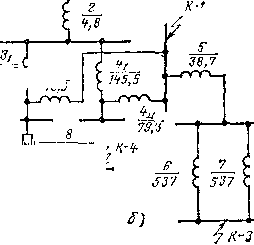
Учет активного сопротивления производим в соответствии с § 8.

Трехобмоточный трансформатор п/ст. *А.* На ос-- новации (44)

1152

Xg j = *х4* | — 0,11 — 145,5 Ом;

1152•\*3,11 = \*4,11 = 6>06——— = 79,3 Ом.



115кв

12км

115 к В

с)

~ "1^8760А

ВЛ >Л0,40м/кМ 0=0,21 Ом/кИ

К-1

лУстА

Ютыс кВ-А

Ух тмтн

\* ВЛ 10 КМ  
^■О^ОМ/КМ

*К-2*

175,5

К 2 1600 \1600 h

. t ~4\_

'7 Капель с алюминие- Qj 5,5% (°) 6,5%

' быни жисами 1}‘95мН^ Yк-з, у  
2=0,08 Ом/КП', Г-0,33 Ом/км ) У 1

6,3к8 п/ст, В

Un,n=6 % Цк,ш=0

■в

37кВ

2км

Л-4

6,3к В

бООквА

«)

К-5 С) к '

J ОЛкВ л/ст, В

J *2211,53,2* Z

*К-5*

*1*

*7,64*

*9*

*1815*

Зя

73,3

*0,2 3 2*

*1,66,0,4'13*

*13,75*

*К-5*

*2 0,0363*

*Зя 0,6*

С *"о,0576*

*е)*

Рие. 18. Схемы к примерам 7 и 17.

*а —* расчетная схема сети; схемы замещения: *б —* в именованных единицах; в — в относительных единицах.

Двухобмоточный трансформатор п/ст. *Б.* По (44) и (20)

115а*хе = х7* = 0,065 = 537 Ом.

1,6

Двухобмоточный трансформатор п/ст. *В*

115а

х9 = 0,055 п ' = 1815 Ом.

0,4

Короткое замыкание в точке *К-1.* Суммарное сопро­тивление трехобмоточных трансформаторов

\*3,4—37

145,5 + 79,3

— 2

= 112,4 Ом.

Результирующее сопротивление цепи к. з. по (22) и (23)

= 7,64 + 4,8 + 112,4 as 124,8 Ом.

Поскольку расчет ведется по напряжению *U5 =* 115 кВ, ток к. з., определенный по результирующему сопротивлению, также получа­ется отнесенным к этому напряжению.

Ток к. з. в точке *К-1* определим, используя (52):

115 000

'$ = 77= =532 А.

*V* 3-124,8

Для вычисления действительного значения тока к. з. на данной ступени полученный ток нужно привести к напряжению 37 кВ по (19):

=532-!^-== 1650 А

37 37

Ударный ток в точке *К-1* вычисляем в соответствии с (64) и (65).

Активным сопротивлением энергосистемы пренебрегаем.

Активное сопротивление линии 115 кВ

*г%* = 0,21 ■ 12 = 2,52 Ом.

Отношение ^индуктивного сопротивления к активному и актив­ное сопротивление трехобмоточных трансформаторов (см. [4]):

х, *х, п* 112,4

“ = =21,5; Гз—а? *— г*4—37 — ~ = 5,23 Ом.

Гз О 21,5

Суммарное активное сопротивление

т2 = 2,52+ 5,23 = 7,75 Ом.

Постоянная времени

124,8

Т» = - 1\_\_ \_ о 05J4 с

а 314-7,75

Ударный коэффициент

0,01  
йуД=14-е 0,0514 — 1,82.  
Ударный ток

= ,82-1,65 = 4,25 кА.

Короткое замыкание в точке *К-2.* Суммарное сопро- тивление трехобмоточных трансформаторов

Хз,4-в,з= 145,5/<145,5 + 2-79,3) « 98,5 Ом. Результирующее сопротивление цепи к. з.

= 7,64 + 4,8 + 98,5 яа 110,9 Ом.

Ток к. з. в точке *К-2*

П5 000 „

— = 600 А.

Кз-110,9

/<3) = 1115

Ток к. з. в точке *К-2,*

приведенный к напряжению данной сту-

пени 6,3 кВ,

115

/<31 = 600 —— = 10 900 А.

1. 6,3

Ударный ток в точке *К-2*

Активное сопротивление трехобмоточных трансформаторов

98,5

^,4-6,3 = = 4,58 Ом-

Суммарное активное сопротивление

= 2,52 + 4,58 = 7,1 Ом.

Постоянная времени

110,9  
314-7,1

= 0,0498 с.

Ударный коэффициент

0,01  
йуд=1+е о-0498 = 1,82.

Ударный ток

= ■j/'2-l, 82-10,9= 28,1 кА.

Короткое замыкание в точке *К-3,* Для определения результирующего сопротивления используется подсчитанное выше сопротивление цепи к. з. для точки *К-1 х=* 124,8 Ом. С учетом это­го результирующее сопротивление цепи к. з. ' 537 = 432 Ом.

х2= 124,8 + 38,7 4-

2

Ток к. з. в точке *К-3*

,(3) \_ 115 000

= 153,5 А.

'115-

*V* 3-432

Ток к. з. в точке *К-3,* приведенный к напряжению данной сту­пени 6,3 кВ,

т . И5  
^б.з — 153,5  
0,0

= 2800 А.

Короткое замыкание в точке К-4. Результирующее индуктивное сопротивление цепи к. з. с использованием сопротив­ления цепи до точки *К-2*

х2= 110,9 + 53,2 « 164 Ом.

Активное сопротивление цепи к. з. *г* 2 =220 Ом.

При расчете тока к. з. в точке *К-4* необходим учет активного сопротивления, поскольку ,

3

Полное сопротивление цепи к. з.

z2 = ]/'220а + 1642 = 275 Ом.

Ток к. з. в точке К-4 на основании (51)

,,, 115 000

/ = — = 242 Л.

J/T-275

Ток к. з. в точке *К-4,* приведенный к напряжению ступени

1. кВ,

= 242 4^- = 4420 А.

6,3

Короткое замыкание в точке *К-5.* Учитывать актив­ное сопротивление кабельной линии 6 кВ при расчете к . з. в точке *К-5* не требуется. '

Результирующее сопротивление цепи к. з. с учетом сопротивле­ния до точки *К-4*

х2= 164+1815» 1980 Ом.

Ток к з. в точке *К-5*т 115 000 п „ ,  
 = 33,5 А.

*V* 3-1980 ’

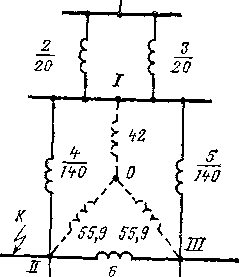
Ток к. з. в точке *К-5,* приведенный к первичному напряжению

1. кВ трансформатора п/ст. В,

! 1

С =33,5 —= 611 А.

V j о



*115КВ*

*1^1)500А*

*~15кВ*

*ВЛ*

*50КМ*

*7=0,6 ом/км*

*- , —Pier,!*

*16МВА*

*16 MBA 115/38,5/6,3к В 115/38,5/6,ЗКВ*

I

*\37кВ  
нум* 1  
*| иц,в-в~Ю,5%  
Чц,в-н~!7"/i  
Uk,c-H~ 6 °/а*

*37кв*

*U-KjB с 10,5% Uк,в-н=17 % U/c,c-tr6%*

*6,ЗкВ*

*Г-1*

*1000А ■, 0,56 Ом*

*7,5 MBA*

*6,3 кв*

*Х'а/0,121*

*Е’^1,073*

*Г-2*

*7,5МВА*

*6,3кв*

*ХЦ;Р,121*

*Е’^1,073 а}*

*8*

*216*

Рис. 19 Схемы к примеру 8

*а —* расчетная схема сети; *б —* схема замещения.

*Пример 8.* Определить ток трехфазного к. з. на шинах 6,3 кВ п/ст. 1 (рис. 19, *а).*

Номинальные напряжения элементов схемы приравниваем сред­ним напряжениям ступеней трансформации. За базовую ступень напряжения принимаем 115 кВ.

Находим сопротивления элементов схемы замещения.

Энергосистема. По выражению (54)

115 000

«г = — -■= 14,8 Ом.

*V* 3-4500

В Л 1 1 0 к В. В соответствии с § 8

х2 = х3 = 50-0,4 = 20 Ом.

Трансформатор 16 MB-А п/ст. 1. Применяя (44), полу­чим:

' 1152

х, = х5 = о, 17 = 140 Ом.

16

Сопротивление трансформатора при к. з. на 6,3 кВ находим по относительному номинальному сопротивлению ик,в-н!:аХв-н((ном)- В самом деле, если в цепь к. з. включены две обмотки трехобмоточного трансформатора, а со стороны третьей обмотки подпитка места к. з. отсутствует, нет необходимости вычислять напряжения к. з. каждой обмотки, а достаточно располагать паспортными напряжениями к з. между обмотками и по ним непосредственно определять искомые сопротивления. -

Реактор. По (20)

/ 115 \2

*хв* = 0,56 —= 186 Ом.

\ 6,3 /

Ге н е р а т о р 7, 5 М В - А. По (44) и (20)

1152

х7 = xR = 0,121 = 214 Ом.

7,5

Как видно из схемы замещения, сопротивления *xit х$,* соеди­нены в треугольник и для нахождения тока в точке *К-1* указанный треугольник необходимо преобразовать в эквивалентную звезду. По (24)

140-140

Xl ~ 140 + 140 + 186 “ 42 Ом’

186-140

= по + йо+Тёб55,9 Ом:

140-186

*х,*. г = т- — 55,9 Ом.

111 140 4-140 + 186

В результате преобразований суммарные сопротивления со сто­роны энергосистемы и генератора *Г-2 до* нулевой точки эквивалент­ной звезды равны:

20

х2,с= 14,8 + —+ 42 = 66,8 Ом;

г = 214 + 55,9» 270 Ом.

Эквивалентная э. д. с. система — генератор *Г-2* определится по (21)1

115 1 124 1

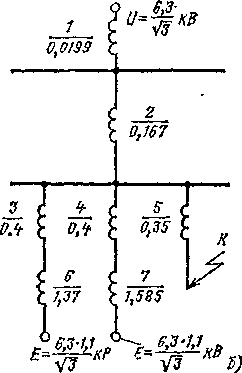
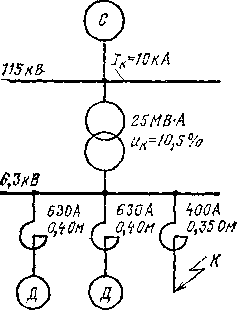
]/з 66’8 + V3 270

А>к = ~J = 67,4 кВ. ■

66,8 + 270

Результирующее сопротивление между точкой приложения эк­вивалентной э. д. с. и точкой к. з. К

« (66,8/270) 4\*55,9— 109,4 Ом.



*Sz,n=S,8Ma-A S^SMB-A*

*Е^Т,1 Е\*=1,1*

*Кп=Е Кп = 5 а)*

Рис. 20. Схемы к примеру 9.

*а* — расчетная схема сети; *б —* схема замещения.

Ток в точке /( от эквивалентного источника по (50)

67 400

109,4

= 615 А.

Ток в точке *К* от генератора *Г-1* также по выражению (50)

лзт 124 000

= 335 А.

*Jns —*

*V* 3-214

Суммарный ток в точке *К,* приведенный к расчетному напря­жению *Уб —*115 кВ

4u5 = 615 4\* 335 = 950 А.

Суммарный ток в точке *К,* приведенный к среднему напряже­нию данной ступени (7=6,3 кВ

115

4б,з = 950—— = 17 300 А.

0,0

*Пример 9.* Определить ток трехфазного к. з. в точке *К.* за реак­тором отходящей лннни 6,3 кВ схемы рис. 20, *а* для начального мо­мента времени.

За основную ступень трансформации принимаем £7б=6,3 кВ.

По (54), (19) и (44) определяем сопротивления энергосистемы, трансформатора и двигателей.

Обозначив сопротивления схемы замещения порядковыми но­мерами, получим:

для энергосистемы

6,3-6,3

= — = 0,0199 Ом;

Кз-10-115

для трансформатора 25М.В А

для синхронных двигателей 0,2-6,32 хв — — 1,37 Ом;

о,о  
0,2-6,32

х, = = 1,585 Ом.

5

Сопротивление цепи к. з. от энергосистемы до шин 6,3 кВ х2с = 0,0199 + 0,167 = 0,1869 Ом.

То же для синхронных двигателей:

\*д,21 = 1,37 + 0,4= 1,77 Ом;

хд22 = 1,585 + 0,4= 1,985 Ом;

Хд 2 = 1,77/1,985 = 0,936 Ом.

Результирующее сопротивление цепи к. з.

\*2 = \*2,с/хд,2 + \*5 == °> 1869/0,936 + 0,35 = 0,1557 + 0,35 «  
«0,506 Ом.

Эквивалентная э. д. с. по (21)

6300 /\_1 1,1 \

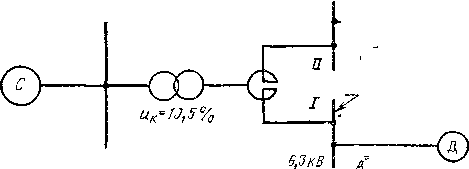
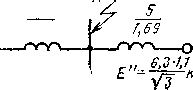
т/7 \0,1869 + 0,936 /

£вк = = —- -1,0167 В.

—'— + —L\_ *V* з

0,1869 0,936

Ток за реактором отходящей линии 6,3 кВ по (52)

*Пример 10.* Определить ток трехфазного к. з. в точке *К* (рис. 21, *а). •*

В случае уравнивания э. д. с. электродвигателей с э. д. с. системы погрешность в расчете в сторону уменьшения тока составит 1 67 %.

*1'^=8,5кА*

*^Отыс КВ* А

*4-0 ты с кв* А

*2500А, О,НОм  
«св=О,5*

®

*Sz ff-S/trbic кВ-А СЧ=1,1-,КП=5 /К*

*115КВ*

*115кВ*

*5^^0,7гыскВА Кгг5*

*Вг\_  
0,21*

*1  
0,023*

*2  
0,105*

ZYW

*37 -0,07*

*0-*

*1,57*

*3'2 0,21*



(54), (19), (44) и § 8

Энергосистема

6,3-6,3

Рис. 21. Схемы к примеру 10.

*а —* расчетная схема сети; *б —* схема замещения

За основную ступень напряжения принимаем напряжение 6,3 кВ секционированных шин подстанции.

Сопротивления элементов схемы замещения подсчитываем по

Трансформатор 40 МВ-А

Сдвоенный реактор

х31 =-0,5-0,14 =—0,07 Ом;

\*з2 — *хз3 =* 1,5-0,14 = 0,21 Ом.

Синхронные двигатели

0,2-6,32

= 1,47 Ом;

5,4 0,2-6,32

= 1,69 Ом.

4,7

На основании § 5 подпитку места к. з. синхронными электро­двигателями секции *II* в расчет не принимаем. Результирующее со­противление энергосистемы прн к. з. в точке *К*

х2 = 0,023 + 0,104 —0,07 + 0,21 =0,267 Ом.

Ток к. з. от энергосистемы в точке А по (52)

m 6300

/Я = 3 = 13620 А.

/з-0,267

Ток к. з. в точке А от двигателей =4,7 тыс. кВ-А по (50) 6300-1,1

*41 =* гН— =-2370 А.

/з-1,69

Суммарный ток к. з. в точке А

7Жз = 13620 + 2370 = 15990 А-

Для сравнения рассчитаем ток к. з. в точке *К* с учетом электро­двигателей секции *II* и одновременно определим погрешность в то­ке к. з. от иеучета указанных двигателей.

Результирующее сопротивление ветвей — энергосистемы и элект­родвигателей S =5,4 тыс. кВ-А

(0,023 + 0,104 — 0,07) (0,21 + 1,47)

*Ху = — !:——* \*—1—- + 0,21 = 0,265 Ом.

2 0,023 + 0,104 — 0,07 + 0,21 + 1,47

В связи с тем, что эквивалентная э. д. с. энергосистема — элект­родвигатели 5,4 тыс. кВ-A незначительно превышает напряжение, определение тока производим при напряжении системы.

Ток к. з. в точке К от энергосистемы и электродвигателей 52д=5,4 тыс. кВ-A по (52),

6300

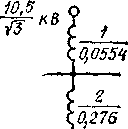
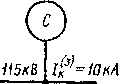
/О) = = 13730 А

’ /+0,265

Суммарный ток к. з. в точке *К*

*№ = i373O* + 2370 = 16100 А.

Как показал расчет, учет электродвигателей секции *II* практи­чески не изменяет значения тока к. з. на секции *I.* Погрешность в токе *I* (,3) от пренебрежения током к. з. от *электроде*игателеД секции *II* составляет менее I %



*ик>в-тя0,г*

*80МВ-а( н1^[Н2\ив,в-нг =0,В икм\~ог~О^7*

*ТРДН( в*

*^0,5*

*0,Н0м*

*I 10,5кВ* Г

*10,5 кВ*

*д - 7,5 МВ~ А*

*t) Е^1,1,Кп\*5,СДН*

*10,5кВ*

*0,1*4 *Ом*

*ИГ 10,5кВ*

*, 3*

*0,1«*

JT

*\_// 10,5-1,1 „*

Рис 22 Схемы к примеру 11,

*а —* расчетная схема сети; б — схема замещения.

*Пример 11.* Рассчитать ток к. з. для начального момента време­ни и ударный ток к. з. при повреждении на секции *II* 10,5 кВ схемы рис. 22. В качестве базового напряжения принимаем *Uo~* = 10,5 кВ.

Схему замещения составляем в соответствии с § 5, учитывая из присоединенных электродвигателей только синхронные двига­тели секции *II,* непосредственно связанные с местом к з.

Сопротивления элементов схемы замещения определяем по (44), (54) и (19), в результате чего получим:

для энергосистемы

\*1 =

10,5 10,5  
j/g 115-10

= 0,0554 Ом;

для трансформатора

10,5?  
\_х2 = 0,2 ——- = 0,276 Ом;

80

для сдвоенного реактора

*хя = 0,*14 Ом;

для синхронных двигателей

10,52х4 = 0,2—— = 2,94 Ом.

7,5

Результирующее сопротивление системы до точки к. з.

\*2 = 0,0554 4-0,276 + 0,14 = 0,4714 Ом.

Ток к. а. на секции *II от* энергосистемы

10,5  
/{о 5 =■ “7= = 12,86 кА,

УЗ-0,4714

Ток к. з. от электродвигателей секции *11* ,,, 10,5-1,1

^10,5д«“ — —2,27 кА.

*V* 3-2,94

Суммарный ток к. з. на секции *II*

4^5= 12,86 + 2,27 = 15,13 кА.

Расчет ударного тока на секции *II* производим по (64), (65) и (68); энергосистему 115 кВ учитываем только индук­тивным сопротивлением.

Отношение индуктивного сопротивления к активному и актив­ное сопротивление:

трансформатора 80 МВ-А типа ТРДН (см. [4]) *х,* 0,276

— = 27, г2 = = 0,0102 Ом;

сдвоенного реактора типа РБС (см. (4])

0,14

— = 62,6 г3 = ■ „ - ■ = 0,00224 Ом. г3 62,6

Суммарное активное сопротивление цепи энергосистемы до точ­ки к. з.

гх = 0,0102 + 0,00224 = 0,01244 Ом.

Постоянная времени энергосистемы „ 0,4714

^а.сю.5- 314.0j01244 “ 0,121 с-

Ударный коэффициент для тока *к. з. от* энергосистемы  
\_ 0101fey„= 1 *+е* 01121 = 1,92.

Ударный ток от энергосистемы

1уд0 = К?.1,92-12,86 = 34,92 кА.

Ударный коэффициент для тока к. з. от электродвигателей типа СДН (при единичной мощности 1 МВт) йуд,д=1,82.

*Генератор J!^B вл 20кМ V5kB Сиг:гг,ема*

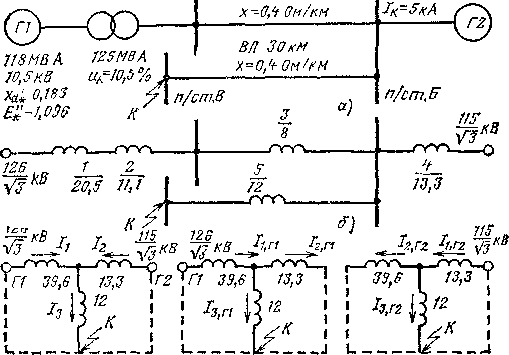


Рис. 23. Схемы к примеру lz.

*а* \_ расчетная схема сети;, *б —* схема замещения; *в, г, д — схемы цля расчета* тока к з по методу наложения.

Ударный ток от электродвигателей секции *II*

/удд = KF-1,82-2,27 = 5,84 кА.

Ударный ток на секции *II*

*i?a = ivn c* 4- 1-удл = 34,92 + 5,84 = 40,76 кА.

*Пример 12.* Определить токи трехфазного к. з. на шинах 115 кВ п/ст, *В* от блока генератор — трансформатор и энергосисте­мы, пользуясь принципом наложения (рис. 23).

За основную ступень трансформации принимаем [/б=И5 кВ.

По (44), (54) и (20) определяем сопротивления генератора, трансформатора и энергосистемы.

Обозначив сопротивления схемы замещения порядковыми номе­рами, получим: для

генератора 118МВ-А

0.183-1152

«1 = ~ =20,5 Ом;

По

для

трансформатора 125 МВ-А 0,105-1152

== Ом;

ДЛЯ

ВЛ 1 1 5 кВ

х8 = 0,4-20 = 8 Ом,  
хв = 0,4-30= 12 Ом;

энергосистемы

для

115

= ——- = 13,3 Ом.

*V* 3-5

Определим сопротивления и токи в схемах условных режимов (23, *г, д).*

Сопротивление генератора, трансформатора и ВЛ 20 км

Xj *х2* 4" \*з = 20,5 4-И.1 4" 8 = 39,6 Ом.

Результирующее сопротивление в цепи генератора Г/

„ 13,3-12

= 39,64- = 45,9 Ом.

13,34-12

Ток к. з. от генератора *Г/*

126

/1 п= = 1,585 кА.

Кз-45,9

Распределение тока 71Г1 по ветвям;

12

72>Г1 = 1,585 уу = 0,752 кА;

7ЗГ1 = 1,585 — 0,752 = 0,833 кА.

Результирующее сопротивление в цепи генератора *Г2*

39 6 • 12

*ХЕ,Г2* = 13.3 4" эд , 12 ~ 22,5 £\*’\*•

v -р 1Z

Ток к, з. от генератора *Г2*

zi,r2 = ~~~7^-- ~ =~~ ~~2~~~~>~~~~95 кА~~~~\*~~

*V* 3-22,5

Распределение тока /ц^по ветвям:

12

/„ г, = 2,95 = 0,686 кА;

2,12 51,6

/ЗГ2 = 2,95 — 0,686 = 2,264 кА.

Совмещая результаты вычислений условных режимов по (27), определим токи в месте к. з.

Ток к. з. от блока генератор — трансформатор

/$15= 1,585 —0,68а «0,9 кА.

Ток к. з, от энергосистемы

/^’15 = 2,95 — 0,752 = 2,198 кА.

Суммарный ток к. з. на шинах 115 кВ п/ст. В

z3?ii5 = 0,833 + 2>264 = 3,097 кА.

В заключение проверим целесообразность решения данного при­мера по принципу наложения, для чего произведем сравнительный расчет, исходя из равенства приведенной э. д. с. генератора сред­нему расчетному напряжению сети £/б=П5 кВ.

Суммарное сопротивление ветвей эквивалентной схемы до шин п/ст. 5

39,6-13,3 п А ~

Ху , = — ~ , = 9,96 Ом.

2,1 39,6+13,3

Результирующее сопротивление цепи к. з.

Ху = 9,96+ 12 = 21,96 Ом.

Суммарный ток в месте к. з.

= =3,03 кА.

*V* 3-21,96

Ток к. з. от блока генератор — трансформатор

/ч) 9,96

/,(3,),5 = 3,03— = 0,762 кА.

1,115 39,6

Ток к в. от энергосистемы

4п15 = 3,03 — 0,762 = 2,268 кА.

Отношение токов к. з. от блока генератор— трансформатор, полученных при расчетах по принципу наложения и при равенстве э д с. генератора напряжению сети

0,9

Д, = —— = 1,18.

1. 0,762

То же для токов к. з. от энергосистемы:

2,198

й» = = 0,97.

1. 2,268

То же для суммарного тока в месте к. з.

3,097

fe3 = = 1,02.

1. 3,03

Расчет показывает, что введение э. д. с. генератора вместо среднего расчетною напряжения дает некоторое увеличение тока в ВЛ ст. *А—*п/ст. *Б* и в блоке генератор — трансформатор, а на зна­чениях тока со стороны энергосистемы и суммарного тока в месте к. з. практически не сказывается.

Следовательно, применение принципа наложения в подобных случаях имеет смысл только для уточнения тока к. з., притекающе­го со стороны станции.

Расчет в относительных единицах. На основании (29)

/(3) = /(3) *I*

.(б) б'

Поскольку базовый ток известен, задача состоит в опре­делении относительного тока к. з.

Независимо от способа расчета — в именованных или относительных единицах — конечные результаты вычислений должны быть одинаковыми. Поэтому оче­видно, что формулы для определения тока к. з. в относи­тельных единицах могут быть получены путем преобра­зования (49)—(52).

Подставим значение сопротивления г из (31) для определения г\* в (49), в результате чего получим;л

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| *Е"* | | | |
|  |  | *. Us г*  ■ , 7 б,  гядб) |  |
| или |  | £Иб) , | (57) |

*где Е\*(б) —*относительная э. д. с., приведенная к базо­вым условиям; (б) — результирующее относительное сопротивление цепи к. з., приведенное к базовым уело-

В

виям;—— ^(б> — относительный ток к. з.

гЩ(б)

Аналогично (50) без учета активного сопротивления

(68)

ХЩ(б)

Если источником питания в расчетной схеме сети яв­ляется энергосистема, то, как известно, э. д. с. системы и напряжение на ее шинах равны *Е'„(б)* = t/Cp\*(6) = l1 от- сюда

/(з)==\_\_! (59)

2Х»(б)

Без учета активного сопротивления

!—/6. (60)

Хх»(б)

Расчет токов к. з. в относительных единицах произ­водится в соответствии с (57)—(60) и (28)—(43).

В развитие сказанного в предыдущем параграфе ко­ротко остановимся на определении сопротивления хс\*(б). Если сопротивление *хс* задано в омах, то перевод его в относительные единицы производится обычным спосо­бом по (31).

Если же в качестве характеристики энергосистемы задан ток / *W* или мощность S , сопротивление хс\*(б) определяется соответственно:

потоку на основании (54) и (31)

\*снб) (61)

*]\d)*

'к

по мощности, исходя из (55) и (31),

(62)

S(3)

Максимальное значение тока к. з. при подключении элемента расчетной схемы непосредственно к шинам 66

энергосистемы (хс\*=0), на основании (60), при условии 7б==-/ном равно:

или

г(3) *} I*

*max „ ,* ч ■‘ном»

Лж(ном)

(63)

100

= 3670 А.

7<з) .

*max х ,* , % ном»

\*(ном) /0

где /ном — номинальный ток элемента расчетной схемы; я\*(ноМ) — относительное индуктивное сопротивление эле­мента расчетной схемы, приведенное к номинальным ус­ловиям.

Расчетное выражение для вычисления максимальной мощности к. з. можно получить, умножив правую и ле­вую части полученного соотношения (63) на^З С/аоМ:

0(3) 100 Q

г>ном»

\*(ном) /0

где Shom — номинальная мощность.

*Пример 13.* Определить ток трехфазного к. з. на выводах гене­ратора. 5ном=15 MB-А; х'^=0,114; £/Ном=6,3 кВ; £"=1,07 £/ном.

Принимаем за базовые величины номинальные параметры гене­ратора: 5б=5ном=15 МВ-А и *Ua — U„a!i*=6,3 кВ.

Номинальный ток генератора

15 000

*I*ном —■ ” .— *— 1380 А — Iq .*

*V* 3-6,3

Пользуясь (58), получим:

1,07

/ <3) = —— 1380 = 12 950 А.

0,114

*Пример 14.* Определить максимально возможный ток за транс­форматором. 5ном=40 MB-А; £Л=115 кВ; £/ц = 6,3 кВ; ик= = 10,5%.

Номинальный ток обмотки 6,3 кВ трансформатора

40 000  
7ном “ .

*V* 3-6,3

Искомое значение тока к. з. определится по (63) s

/О) 1UU

= 3670 = 35 000 А.

*Пример 15* Составить схему замещения сети и определить ток трехфазного к з. на генераторном напряжении 6,3 кВ электростан­ции *А* (рис. 16, *а).*

Номинальные напряжения элементов расчетной схемы прини­маем равными средним напряжениям ступеней трансформации

В качестве базовых величин выбираем 5б = 100 МВ-А и *Ua —* = 6,3 кВ. Отсюда базовый ток на ступени 6,3 кВ

100 000 Л .

/б = — = 9160 А.

*Уз-б,з*

16,

Производим нумерацию элементов схемы замещения (рис *е)* и находим их сопротивления:

для энергосистемы по (61) и (19)

9,16-6,3

= = 0,0669;

1 - 7,5-115

для ВЛ 110 кВ базовое напряжение, приведенное к пени 115 кВ, по (18)

сту-

о 115 Пб= 6,3 =115

6,3

О на основании (36), используя По, и в

100 = 25-0,4- =

\*2 П52

кВ,

соответствии с § 8

0,0756;

для трансформатора 40 MB-А по выражению

(43)

100 х\*8 = 0,105

= 0,262;

8 ад

для генератора 30 МВт, исходя из (43),

100  
 = 0,381.  
37,5

х\*4 — 0,143

Аналогично расчету в именованных единицах (см. пример ток в месте повреждения находим как сумму токов, приходящих ет энергосистемы и от генератора.

5)

Питание от энергосистемы. Результирующее сопро­тивление цепи к. з. по (22)

= 0,0669 + 0,0756 + 0,262 = 0,4045.

Ток к. з., приходящий в точке А, по (60)

'9|60 = 22700 А'

Питание от генератора Ток к. з. по (58)

, о, 1,086

/13>, = -J— -9160 = 26 200 А.

6’3 0,381

Суммарный ток в месте повреждения

Z2b,3 = 22 700 + 26 200 = 48 900 А-

*Пример 16.* Определить токи трехфазного к. з. на шинах 10,5 кЙ п/ст. *А,* шинах 10,5 и 0,4 кВ п/ст. *Б* и шинах 10,5 кВ п/ст. *В* (рис. 17, а). В качестве базовых величин выбираем 5б = Ю0 МВ-А и t/e—10,5 кВ, отсюда

100 000

*1б = =* = 5500 А.

Кз-10,5

Находим сопротивления элементов расчетной схемы.

Энергосистема. В соответствии с (61) и (19)

5500-10,5

\*»i = =0,173.

1 9000-37

Трансформатор 6300 кВ-A п/ст. *А.* Приведем отно­сительное номинальное сопротивление к базовым условиям на ос­новании (43):

ЮО

= 0,07 = 1,11.

\*3 6,3

Трансформатор 630 кВ• А п/ст. 5

100

— 0,055 — 8,72.

0,63

Линии 10 кВ (кабель с алюминиевыми жила­ми и ВЛ с алюминиевыми проводами). В соответст­вии с § 8 и по (31)

100

= 0,08-0,5-——■ = 0,0363;

10,52

100

гм = 0,45-0,5 —— = 0,204;

10,5Л

100

х\*5 = 0,4-2,8——— = 1,015;

10,52

100

/•« = 0,33-2,8—— =0,837.

10,52

ВЛ (со стальными проводами). По та'бл 3 внутрен­нее индуктивное сопротивление провода ПС-25 на 1 км длины рав­но л"=1,4 Ом/км, активное г—6,2 Ом/км, в результате

100

*х^=* (0,4 +1,4). 1,5—— = 2,44;

10,5^

100  
г\*7 = 6,2-1,5—— =8,43.

10,5г

Определяем токи трехфазного к. з.

Короткое замыкание в точке *К-1.* Результирующее сопротивление цепи к. з. по (22) и (23)

*х* у = 0,173 4-——

= 0,728.

Ток кзв точке *К-1* по (60) с;, 5500

/ o’s = 7Г777Г = 7550 А.

10,5 0,728

Короткое замыкание в точке *К-2.* Результирующее индуктивное сопротивление цепи к. з.

х 2 = 0»173 + +0,0363 + 1,015 « 1,78.

Результирующее активное сопротивление цепи к. з,

= 0,204+ 0,837 «1,04.

1

Поскольку *“ х^,* производим учет активного сопротивле­ния.

Полное результирующее сопротивление

Z,S = *Vl* ,042 + 1,782 = 2,06.

Ток к. з. в точке *К-2* по (59)

*Iws = —*5500 = 2670 А.

1015 206

Короткое замыкание в точке *К-3.* В точке *К-3,* как и в точке *К-2,* также необходим учет активного сопротивления.

Результирующее индуктивное сопротивление цепи к. з, с учетом сопротивления, определенного для точки к. з. *К-2,*

^2 =1 78+ 2,44 = 4,22.

Результирующее активное сопротивление цепи к. з. с учетом сопротивления, полученного для точки к. з. *К-2,*

= 1,04 + 8,43 = 9,47.

Полное результирующее сопротивление

= 'К9,47Ч-4,222 = 10,35. \*

Ток к з. в точке *К-3*

= 5500 = 530 А>IV, ОО

Короткое замыкание в точке *К-4.* Результирующее сопротивление цепи к. з, с использованием сопротивления до точки *К-2*

’ х 2 = 1,78 + 8,72= 10,5.

Активное сопротивление не учитываем, поскольку

1  
*Г* V —— д\*

*‘ jf.h ♦*

Ток к. з. в точке *К-4,* приведенный к стороне высшего напря- женеия 10,5 кВ трансформатора п/ст. 5,

/ю?5 = 75у-5500 = 524 А.

*Пример 17.* Определить токи трехфазного к. з. на шииах 37 и 6,3 кВ п/ст. *А,* шинах 6,3 кВ п/ст. *Б* и шинах 6,3 и 0,4 кВ п/ст. *В* (рис. 18, а).

Выбираем базовые величины Se=100 МВ-А, £7б = 115 кВ и как производную величину

100 000 „ ,

/б = *~ZZ* = 502 А,

*V* 3-115

затем рассчитываем сопротивления. Энергосистема. Исходя из (61)

502  
ж -—\_—= 0,0576.  
8700

ВЛ 1 10 кВ. На основании (31)

100  
х\*, = 12-0,4 = 0,0363.

\*2 ’ 1152

ВЛ 3 5 кВ. Пересчитав базовое напряжение С7б = 115 кВ по О

(32) к ступени 37 кВ, получим П5=37 кВ, после чего по (36) нахо­дим сопротивление ВЛ

100  
х„5 = 0,4-10 —= 0,292.

К а бе льна.я линия 6 кВ После приведения базового О напряжения 1?б = 115 кВ к рассматриваемой ступени получим *Ue=* = 6,3 кВ; поэтому

100  
х = 0,08-2 ■ = 0,403,

\*8 ’ 6,32

100  
т\*8 — 0,33-2 —-1,66.

6,32

Трехобмоточный трансформатор п/ст. *А.* Приве­дем относительные номинальные сопротивления к базовым услови­ям по (43):

100  
х\*з I — x\*4,i = 0,11 jq =1,1;

100  
\з,п = х,4,п — °>06 10 —0,6.

Двухобмоточный трансформатор п/ст. *Б*

100

*х\*л = x\*i* = 0,065 -у-£- =4,06.

Двухобмоточный трансформатор п/ст. *В*

100  
*х^ =* 0,055—— = 13,75.

\*9 04

Короткое замыкание в точке *К-1.* Результирующее сопротивление цепи к. з.

1,1 4-0,6

*х* у = 0,0576 + 0,0363 + • ■ — = 0,944.

2

Базовый ток на ступени 37 кВ по (33)

Уз-37

Ток к. з. в точке *К-1* по (60)

/<3) = \_! 1560 \_ !650 А.

37 0,944

Короткое замыкание в точке *К-2.* Суммарное со­противление трехобмоточных трансформаторов

\з,4= М/ОЛ + 2-0.6) =0,745.

Результирующее сопротивление цепи к. з.

*х* у = 0,0576 + 0,0363 + 0,745 = 0,839.

Базовый ток на ступени 6,3 кВ

Уз-6,3

Ток к. з. в точке *К-2*

= 9160 = 10 900 А.

6’3 0,839

Короткое замыкание в точке *К-3.* Результирую­щее сопротивление цепи к. з. с использованием ранее определенно­го сопротивления для точки *К-1*

4,06

*х* у = 0,944 + 0,292 + — « 3,27.

2

Ток к. з. в точке *К-3*

*= -9160 = 2800 А.*

Короткое замыкание в точке К-4 Результирующее Индуктивное сопротивление цепи к. з. с использованием сопротивле- ния до точки *К-2*

= 0,839 + 0,403 « 1,24.

Активное сопротивление цепи к. з. r\*s=l,66.

Учет активного сопротивления при к. з. в точке К-4 необходим, так как ^2>-LX(is> О

Полное результирующее сопротивление цепи к. з.

*= У*1,662 + 1,242 = 2,07.

Ток к. з. в точке К-4 по (59)

= 9160 = 4420 А.

6,3 2,07

Короткое замыкание в точке *К-5.* При к з, в точ­ке *К-5* учитывать активное сопротивление цепи не требуется.

- Результирующее сопротивление цепи к. з. с учетом сопротивле­ния до точки К-4

х<2 = 1,24+ 13,75 = 14,99.

Ток в точке К-5, приведенный к первичному напряжению 6,3 кВ трансформатора п/ет. *В*

'S-Trs9166-6'1 А-

1. ВЫЧИСЛЕНИЕ УДАРНОГО ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

При расчетах токов трехфазного к. з. для выбора ап­паратов и проводников принято считать, что максималь­ное мгновенное значение тока к.з., или ударный ток, наступает через 0,01 с с момента возникновения корот­кого замыкания.

Для схем с последовательно включенными элемента­ми ударный ток подсчитывается на основании (4) по вы­ражению

! 0.Q1 \

= /Т (1 + е~ J /27$ йуд, (64) где Га — постоянная времени затухания апериодической составляющей тока к. з.; *kyn —* ударный коэффициент для времени /=0,01 с.

Постоянная времени *Та* в (64) определяется в соот­ветствии с (3):

*Та = ,* (65)

сог2

где *xs* и rs — соответственно суммарное индуктивное и активное сопротивления схемы от источника питания до места к. з.

При составлении расчетной схемы для определения *Та* необходимо учитывать, что синхронные машины вво­дятся в схему индуктивным сопротивлением обратной последовательности *Х2* и активным сопротивлением ста­тора *rs.*

Для разветвленной схемы ударный ток к. з. вычисля­ется по

/ 0,01 \

*= V2* /$ Ь + *е~ ),* (66)

где — эквивалентная постоянная времени затухания апериодической составляющей тока к. з.

Постоянная времени Та,э определяется как где xs и г г —соответственно суммарное индуктивное и суммарное активное сопротивления, полученные из схе­мы замещения, составленной из индуктивных и актив­ных сопротивлений, поочередным исключением из нее сначала всех активных, а затем всех индуктивных сопро­тивлений.

Так же, как в предыдущем случае, синхронные ма­шины вводятся в расчетную схему индуктивным сопро­тивлением %2 и активным *г„.*

Характерные соотношения *х/r для* элементов элект­рической системы приведены ниже:

Турбогенераторы мощностью: '

*х!г*15—85  
100—140

40—60 60—90

7—17 20—50

15—70  
40—80  
2-8

0,2—0,8

до 100 МВт ................

100—500 МВт . .

Гидрогенераторы:

с демпферными обмотками ..........

без демпферных обмоток

Трансформаторы мощностью:

5—30 МВ-А

60—500 МВ-А

Реакторы 6—10 кВ:

до 1000 А

1500 А и выше

Воздушные линии

Трехжильные кабели 6—10 кВ с медными и алюминие­выми жилами сечением 3X95—3X185 мм2 . . . .

Ударный ток электродвигателя, как синхронного, так и асинхронного, определяется следующим образом:

4д.д = ^2\* /п,0,д &уд, (68)

где &уд — ударный коэффициент цепи двигателя.

Если сопротивление внешней цепи электродвигателя невелико (0,14-0,2)хд и его учитывать не требу­

ется, &уД берется в готовом виде по данным [4]; если же внешнее сопротивление подлежит учету £уд следует оп­ределять аналитически по формулам [4].

Если расчетная схема в результате преобразования может-быть представлена как две или несколько незави­симых генерирующих ветвей, ударный ток в месте к. з. определяется как сумма ударных токов этих ветвей.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ

СЛАГАЮЩЕЙ ТОКА ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ДЛЯ МОМЕНТОВ ВРЕМЕНИ ДО 0,5 с

Известно, что при питании к. з. от энергосистемы в результате неизменности напряжения на шинах системы амплитуды периодической слагающей тока короткого замыкания во времени не изменяются и ее действующее значение в течение всего процесса к. з. также остается неизменным

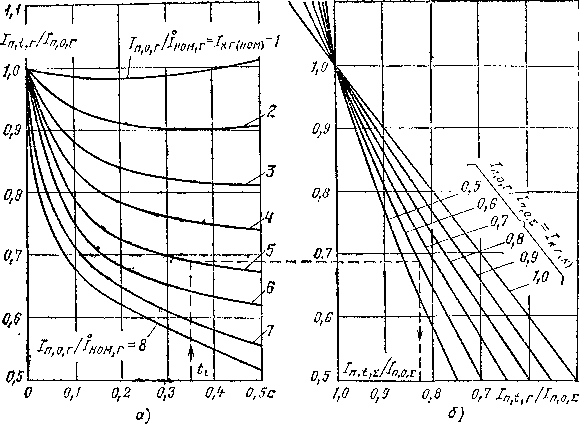


Рис. 24. Кривые изменения во времени тока к. з. синхронной маши­ны при разных удаленностях точки к. з.

*а* — при питании к. з. от генератора; б — при питании к. з. от генератора и системы.

Следовательно, определение периодической слагаю­щей в данном случае для любого момента времени к з. должно производиться по тем же расчетным выражени­ям (51) и (52), которые приведены в § 9 для вычисления начального значения тока.

При питании к. з. от генератора с автоматическим ре­гулятором возбуждения (АРВ) или без него амплитуды и действующее значение периодической слагающей в процессе к. з. изменяются по значению.

Для практических расчетов периодической слагаю­щей в различные моменты к. з. обычно используют гра­фоаналитический метод с применением расчетных кри­вых, иначе — метод расчетных кривых.

Расчетные типовые кривые рис. 24, *а* разработанные на кафедре электрических станций МЭИ, представляют собой зависимость от времени периодической слагаю­щей тока трехфазного к. з. синхронной машины, отнесен­ной к начальному току к. з., при разных удаленностях точки короткого замыкания.

Удаленность фиксируется отношением

**= / Г(НОМ)** (69)

/ном,г

или начальным ' относительным током к. з. генератора для заданной расчетной схемы.

Рассматриваемые кривые рис. 24, *а* являются унифи­цированными и построены для расчета токов к.з. от турбогенераторов, гидрогенераторов и синхронных ком­пенсаторов, независимо от типа, параметров и конструк­тивных особенностей машин.

Графоаналитический метод определения периодичес­кой слагающей тока генератора /п,/,г по кривым рис. 24, а применительно к одному источнику питания сводится к вычислению тока к. з. в начальный момент времени /п,о,г> отношения полученного тока к номинальному току ге­нератора, т. е. /п,о,г//иом,г, и нахождению по кривым рис.

О

24, *а* на основании /п,о,г//ном,г относительного тока /п,/,г//п,о,г Для времени *t.*

Искомый ток в месте к. з. определяется по найден­ному относительному току, как

**1 П,0?Г**

Большое значение при вычислении токов по расчет­ным кривым имеет удаленность генератора от точки к. з.

Критерием удаленности, как уже отмечалось, служит отношение /п,о,г//ном,г. Для семейства кривых рис. 24, а это отношение изменяется в пределах /п,о,г//ном,г= 1-4-8, что в пересчете на сопротивление в относительных номи­нальных единицах пропорционально[[6]](#footnote-7)

*X\** (ном)расч = О,125 — 1.

При различных удаленностях генерирующих источ­ников создаваемые ими токи /п>/,г в зависимости от вре­мени изменяются неодинаково, например:

а

для кривой /п,о,гЛном,г=8[[7]](#footnote-8) относительный ТОК = *=Iti,t,r/In,o,r* изменяется в пределах /\*0=1; /\*о,2=О,62; /\*о,5=О,52, т. е. при х\*(ном)расч,тт, соответствующем к. з. на выводах генератора, перепады токов особенно велики;

для кривой /п,о,г//ном,г=1 диапазон изменения токов составляет /\*о = 1; /\*о,2=О,98; /\*0,5= 1,01, т. е. при л:\*<ном)Расч,тах> соответствующем повреждению, намного более удаленному, чем к, з. за главным трансформато­ром станции, периодическая слагающая для всех момен­тов времени изменяется незначительно.

Следовательно, если в питании к. з. участвуют источ­ники, существенно различающиеся по удаленности (я\*(нОм)расч) от места к. з., расчет токов к. з. с примене­нием кривых по результирующему сопротивлению схе­мы и суммарной мощности обобщенного источника мо­жет привести к недопустимым погрешностям. В подоб­ных случаях определение токов необходимо производить с учетом удаленности генерирующих источников. Для этого путем преобразований схемы замещения из обще­го числа источников выделяются те источники или груп­пы их, которые по своей удаленности находятся в резко несходных условиях с остальными по отношению к мес­ту к. з.

В отдельную группу должны выделяться генераторы, непосредственно питающие к. з.

Обособленно должна рассматриваться цепь энергоси­стемы.

Деление источников на группы должно выполняться таким образом, чтобы в результате оказалось не более двух-трех групп или генерирующих ветвей. Вычисление токов по расчетным кривым для каждой такой ветви ПРОИЗВОДИТСЯ ОТДеЛЬНО ИСХОДЯ ИЗ ОтНОШеНИЯ /п,о,г//ном,г ветви. Выделение большего числа групп или ветвей на практике себя не оправдывает, так как усложняет рас­чет, не повышая, по существу, его точности.

Если имеется несколько однотипных генераторов, одинаково расположенных по отношению к месту к. з., их целесообразно объединить в эквивалентный источник питания (генератор).

В случае действия совместно генератора (одного или нескольких) и энергосистемы генераторы, при значи­тельной удаленности от места к. з., объединяются с энер-

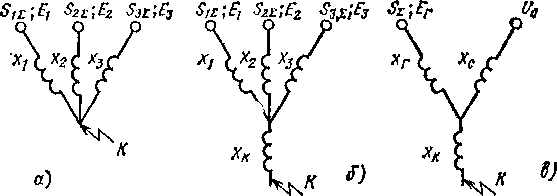


Рис. 25. Схемы различного включения источников питания.

*а —* при непосредственной связи с точкой к. з.; *б, в —при* питании к. з через общее сопротивление в месте к з.

госистемой, и расчет токов к. з. производится при напря­жении энергосистемы.

Каждая из генерирующих ветвей может быть связана с точкой к. з. непосредственно (рис. 25, *а)* или через ин­дуктивное сопротивление, общее для всех ветвей (рис. 25,*б* и *в).*

При непосредственной связи источников с местом к. з. вычисление токов в начальный момент времени про­изводится в соответствии с § 9. По найденным значени­ям /п,о,г//ном,г с помощью кривых рис. 24,а определяют искомые токи /п,«,г для заданного момента времени *t.*

При наличии нескольких источников питания (гене­раторов и энергосистемы), соединенных с точкой к. з. через общее сопротивление, схема преобразуется и при­водится к виду генератор — система (рис. 25, *в)*; затем методом наложения или другими способами расчета то­ков при наличии разных э. д. с. определяют токи к. з. в начальный момент времени: ток от генератора /n,oi и суммарный ток /я,0,2 .

Если отношение тока генератора к общему току в месте к. з. Лт,о,г//п,о,2^0,5 определить ток в месте к. з. через время *t* можно путем совместного использования кривых

7 п / г \_\_ Ц /п f,r *— f [*

/дог /дог \ /П,О,2

(рис. 24,*а* и *б* соответственно).

Графически это показано стрелками на рис. 24, а и *б.*

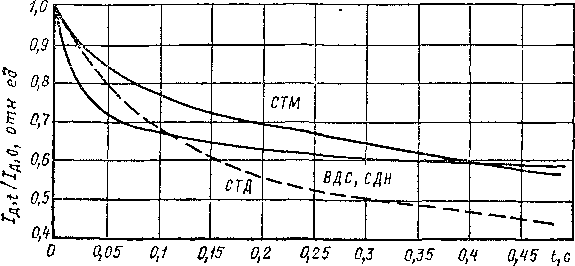


Рис 26 Расчетные кривые для определения тока к. з от синхрон­ного двигателя.

Кривые рис. 24,5 построены для разных значений от­ношения

-Г^=4г(к). (70)

'п,0,2

Расчет токов с применением кривых рис. 24, *а* и *б* вы­полняется следующим образом:

вычисляются значения /П,о,г//Ном,г и /по,г//п,о,2 для на­чального момента времени;

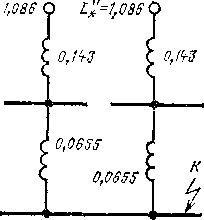
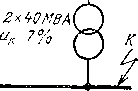
по кривой /п<,г/7п,о,г=/(О (рис. 24, а) исходя из *1П* о г/Люм.г для времени *t* определяется отношение (орди­ната) 7п,«,г//п,о,г и по нему для соответствующей кривой на рис. 24,6 /п,о,г//п>о,2 находится Zn,f,s //по s;

по /n<,s//no,2 и ранее найденному току /п,о,2 опре­деляется искомый ток /п,«,2 .

На абсциссе графика 24,5 помимо /n,^//n,oz можно также получить значение /п <,г//п,о,2, вычитая из *In,t,* 2 /7г о,2 отношение тока системы к суммарному току *In Jin* 0,2.

Используя абсциссу рис. 24, *б* вместо ординаты рис. 24, *а* для работы одного генератора, когда /п 0 r//n,o,s — 1 и *la t* г//ц о £=Л1*1* г//п,о г, z , можно получить на ней относи­тельные значения изменений во времени тока генератора.

Если отношение /п,о г//п o,s<O,5 (что означает доста­точно большую удаленность к. з. для генератора или



*E% = 1,08B*

*2\*30МВт*

*COS If 0,8*

*6,3kB*

Рис 27 Схемы к примеру 18.

*а —* расчетная схема сети, б —схема замещения.

сравнительно небольшую мощность источника), то гене' ратор следует объединить с энергосистемой во избе­жание погрешностей при расчете тока к. з. от генера­тора.

При необходимости учесть подпитку к. з. синхронны­ми электродвигателями напряжением выше 1000 В нуж­но пользоваться кривыми рис. 26, которые построены для синхронных двигателей разных типов.

*Пример 18* Определить ток трехфазного к з на шинах 37 кВ электростанции (схема рис 27, *а)* для момента времени /=0,1 с.

Сопротивления в схеме замещения указаны в относительных единицах па основании § 7 и 8 исходя из базовых условий Se = = 37,5 МВ-А и Щ = 37 кВ Номинальный ток генератора при на­пряжении 37 кВ, а также базовый ток

о 37 500

Люм — ' 585 А.

У 3-37

Так как оба генератора расположены одинаково по отноше­нию к месту к з, рассматриваем их совместно

Результирующее сопротивление схемы

0,143 + 0,0655

= 0,10425.

Ток от генератора 2x30 МВт при трехфазном к. з. на шинах 37 кВ в начальный момент времени

\* 1,086

И3) = ! 585 = 6100 At

°-r’s 0,10425

Отношение тока обобщенного генератора при трехфазном к. з. к номинальному току по (69)

\_ 6100 \_

/ v ” 585-2 - '

'ном,г,2

По кривым рис. 24, *а* находим:

= 0,7825.

Определяем ток трехфазного к. з. от обобщенного генератора через 0,1 с:

/$г2 = 0,7825-6100 = 4780 А.

*Пример 19.* Определить токи трехфазнрго к. з. /0,1 в точке *К-1* и /о,а в точке *К-2* схемы рис. 28, *а[[8]](#footnote-9) [[9]](#footnote-10).*

Сопротивления схемы замещения выражены в относительных единицах (см. § 7 и 8) и приведены к базовой мощности

*Se* = 450 МВ-А.

Номинальные токи генераторов ТЭЦ *А* (базовые токи) равны: при 17=115 кВ

о 450

/ном— .— —2,26 кА;

*V* 3-115

при 17=6,3 кВ

450

7 ном — .— — 41,2 кА.

У 3-6,3

Короткое замыкание в точке *К-1.* Результирую­щее сопротивление схемы

0,8935-1,76

== = 0,593.

Ток трехфазного к. з. от объединенного источника 5Н0М=» =525 МВ-А в начальный момент времени

1,17

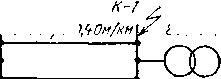
/0 г s = т • 2,26 = 4,46 кА.

u’r,ij 0,593

Относительный номинальный ток от объединенного источника на базе (38)

, ' 525

^ov.r.s,- 450 - 1,167[[10]](#footnote-11).



*Х;0,2№ 115 КВ*

*ТЭЦ В*

*8ОМВА*

*ТЭЦА*

*Shc^IKOKB-A*

*UK=10,S7o 115кВ*

*К-2*

*75МВ-К*

*x’fca,fS5*

*\_ Е'^1,17*

*Et3KB*

*К-Т*

*К-2*

*т*

*0,2935*

*2*

*О, в*

*0,53*

Рис 28, Схемы к примеру 19.

*а —* расчетная схема сети, б — схема замещения.

Отношение тока к. з. объединенного источника к номинальному току по (69) применительно к расчету в относительных единицах: -^\_=—1^=1,69.

^ном,г,2» 0,593.1,167

Применяя кривые рис 24, *а,* находим:

Л), 1г, 2^0, г, s = 0,953.

Ток к. з. от объединенного источника в ..точке *К-1* через <=0,1 с составит:

/0,и = 0,953-4,46 = 4,25 кА.

.Короткое замыкание в точке *К-2.* Прн к. з. в точ­ке *К-2* генератор 75 МВ-А ТЭЦ *Б* должен быть выделен, н поэто­му оба источника рассматриваем независимо.

Суммарное сопротивление ветви ТЭЦ *А* до точки к. з.

=0,2935 + 0,6 + 0,59 = 1,484

Сопротивление генератора'ТЭЦ 5

хь=1,17.

Токи трехфазного к. з. в точке *К-2* в начальный момент време^ ни от источников:

1,17

ТЭЦ Л: /01Г1Л = -^—.41,2 = 32,5 кА;  
1, 4о4

1,17

ТЭЦ *Б- 1О,Г,Б =* -41,2 = 41,2 кА.

Отношение тока трехфазного к. з. при / = 0 к номинальному току по (69)

1,17

ТЭЦ *А:*

ном.г.Л\*

ТЭЦ *Б: Z°'-— -*^ном.г.в»  
450

— = 0,788;

1,484 ’

1,17

1,17-0,167 ~’6’

75

Где Люм.г.А»- 450 — 1[[11]](#footnote-12) и /йоМ’Г’В\* — 450 —0,167\*.

В связи с тем, что для ТЭЦ *А* короткое замыкание в точке *К-2* является весьма удаленным с током к. з. менее номинального, а при таких удаленностях амплитуда переменной составляющей тока к. з. не изменяется, считаем:

Л),2г,А ~ Л),г,А = 32>5 кА1

Для ТЭЦ *Б* по кривым рнс. 24, *а* находим:

\_ 0 682.

0,г,Б

Ток к. з. в точке *К-2* для /=0,2 с равен:

/0 22 = 32,5 + 0,682-41,2 = 60,6 кА.

Если в данном случае расчет произвести для объединенного ис­точника,

х2 = 1,484^1,17 = 0,655.

Ток к. з. в начальный момент в точке *К-2*

1,17

у = -1 .41,2 = 73,7 кА.

°'г’2 0,655

Отношение тока к з. к номинальному току

1,17

. == ! 53.

ZHOM,r,s» 0,655-1,167

/0 2г X

По кривым рис. 24, *а* находим: —~: = 0,944 и определяем

'О.г.Х

искомый ток /012г.2 = 0,944-73,7 == 69,5 кА.

Погрешность при этом для /=0,2 с равна:

69,5 — 60,6

- -100=14,7%, т. е. значительна.

60,6

*Пример 20.* Вычислить ток трехфазного к. з. для *t*=0,1 с в точ­ках *К-2* и *К-3* и для времени /—0,2 с в точке *К-1* схемы рис. 29, а.

Сопротивления в схеме замещения рис. 29, *б* приведены к на­пряжению 115 кВ. Подсчет сопротивлений произведен на основании § 6 и 8.

Номинальный ток генератора 100 МВт, приведенный к напря­жению 115 кВ, составляет:

о 100-10» .

*7ном,с ~ ,—* —590 А,

*V* 3-115-0,85

Расчет токов к. з. в точках *К-1* и *К-2* для начального момента времени производим методом наложения.

Короткое замыкание в точке *К-1.* Результирующий ток от генератора 100 МВт (рис. 29, *в, г)* в начальный момент к. з. /к = 0

/0>г = 1480 — 745 ==735 А.

То’же от энергосистемы

/0= 1350 —813 = 537 А.

Ток в месте к. з.

/0,2 = 667 4- 605 = 1272 А.

Отношение тока генератора к суммарному току к. з.

Ai\_ = J3L.^0,68.

'о.г 1272

**О**

Отношение тока к. з. генератора к номинальному току /ном,г по (69)

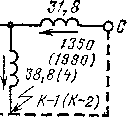
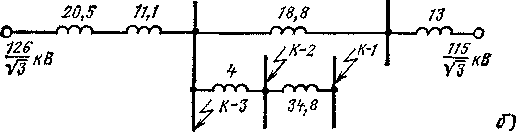
*1* ном,г

Для определения токов при /к=0,2 с используем совместно кри­вые рис. 24, *а и б.* Вначале находим координаты точки на соответ­ствующей кривой рис. 24, *а* по заданному времени и отношению О

\*о,г//ном,г = 1,25, затем по кривым рис. 24,6 по (70), исходя из о

Д.гД o,s = O,58 определяем изменение суммарного тока к. з. для *t—* =0,2 с:

^0,22^ Л),2 = 0»98.



*IISkB*

*1/5кВ*

*100МВт*

*10,5 кВ*

*125MBA*

*ВЛ 67км x=d,60m/km*

*COS<f=0,85*

*Х’^0,183*

*Е"=126кВ*

*К-2 К-1*

*£ 1^5,1кА*

*К-3*

*10,5кВ*

*60 МВ-А и^Ю,57о*

*Г 31,6 31,8*

*) 1680* 1 *813*

1 745

*1 (212)*

1 *005*

*’ (1668)*

\,гтЛ^т

*(1838) \^К-1(К-2)*

Рис 29. Схемы к примеру 20.

*а* — расчетная схема сети; *б —* схема замещения; в, г — схемы токораспреде- лення условных режимов при j£> з в точках *Ki* и *Ki it* к“0).

Суммарный ток к. з. в точке *К-1,* приведенный к напряжению 115 кВ,

/0122115 = 0,98-1272 = 1247 А.

То же на напряжении 10,5 кВ:

115

^0,2210,5 ~ 1 >247 *яа* 13,7 кА.

1 v, О

Короткое замыкание в точке *К-2.* Результирующий ток от генератора 100 МВт в начальный момент к. з. для 1к=0 (рис. 29, *в, г)*

70Г = 2070 — 212 = 1858 А.

То же от энергосистемы:

/с= 1880 — 232 = 1648 А.

Ток в месте к. з. (

70s = 1838 + 1668 = 3506 А.'\*

О

Отношение тока к. з. генератора к току /ВОм,г по (69)

Люм.г

О

Определение спада тока через 0,1 с: по отношению Л.гДиом.г^ =3,15 для 1 = 0,1 с на .кривой рис. 24, а определяем ординату /п,(,г//п,о,г и по ней для кривой рис. 24,6 /о,гДо,л = 1858/3506=0,53 на­ходим суммарный ток к. з. в точке *К-2:*

■Z°,1S - = 0,942, откуда /01s = 0,942-3506 = 3300 А.

A),S

Короткое замыкание в точке *К-3.* Токи к. *з. в* мо­мент времени 1к=0:

генератора /0 г = 2300 А;

системы *I<• —* 2090 А.

/0 г 2300 Отношение :— = ———

= 3,9.

9 590

■"hom.г

Определение токов к. з. через 1=0,1 с производим по кривым рис. 24, *а:*

-^£- = 0,8375, откуда 701р = 0,8375-2300 = 1930 А. Л>.г

Ток в месте к. з.

/0ЛЕ = Z0,lr + *le = 1930 + 2090 = 4020 А'-*

*Пример 21.* Определить ток трехфазного к. з. через 0,1 с в точ­ке *К* схемы (рис. 30, а). ,

Сопротивления в схеме замещения рис. 30, *б* выражены в омах и приведены к напряжению базовой ступени £7д = 37 кВ.

Оба генерирующих источника — энергосистему и электродви­гатели — рассматриваем самостоятельно.

Сопротивления непосредственной связи источников с точкой к. з. *хе* и %7 вычисляем как стороны эквивалентного треугольника по (25), определив перед тем сопротивления схемы до точки объедине­ния ветвей:

хс 0= 1,855 + 7,2 = 9,055 Ом;

хд.о = 54,7 + 6 = 60,7 Ом;

2-9 055

*хв* = 2 + 9,055 Н ’ „ ■ = 11,35 Ом;

60,7

60,7.2

х, = 60,7 + 2Н : = 76,1 Ом.

’ 9,055



ВЛ  
хЫЗД-ОмРкм 0М/км

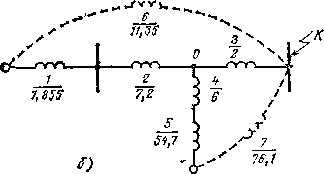
ISxn I 5км

37КВ

37НВ 16тыс кВ Л

Рис. 30 Схемы к примеру 21.

*и —* расчетная схема сети; *б —* схема замещения.



*Синхронные SSuetmiiu СДНВ^НтыскВА (д)*

*а)*

За неимением данных условйо принимаем,, что система является мощным энергетическим объедине­нием. Тогда при сопротив­лении ветви х6= 11,35 Ом ток к. з., создаваемый энер­госистемой в точке *К,*

/с = = =1,88 кА.

Кз-11,35

Для синхронных электродвигателей типа СДН сначала опреде­ляем ток в момент времени *t—О,* по кривым рис. 26—соотношение токов для времени /=0,1 с, затем, исходя из найденных значений, вычисляем ток в точке *К* для *I* = 0,1 с:

/0„ =—1г = 0,281 кА; -у^- = 0,675;

Кз-76,1 '°’д

/01Д = 0,675-0,281 =0,19 кА.

Искомый ток в точке *К* составит:

*Jq* 12 = 1 >68 + 0,19 = 2,07 кА.

1. ОБЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

К несимметричным к. з. относятся двухфазное, двух­фазное на землю и однофазное к. з. (рис. 1,6—*г).*

Для несимметричных к. з. характерны неодинаковые значения фазных токов и напряжений и различные углы сдвига между токами, а также между токами и соответ­ствующими напряжениями.

Эта особенность несимметричных к. з. существенно усложняет их расчет. Действительно, при расчетах трех­фазных к. з. мы исходили из предположения полной сим­метрии трех фаз рассматриваемой схемы, что позволяло составлять схему замещения и вести расчет для одной из фаз.

Поскольку при несимметричных к. з. токи и напряже­ния в разных фазах различны, для выполнения расчета обычным способом потребовалось бы составлять схему замещения для всех трех фаз рассматриваемой сети с учетом взаимоиндукции между фазами. Это чрезвычайно усложнило бы расчет даже в случае сравнительно про­стых схем.

Для упрощения расчетов несимметричных к. з. пред­ложен метод симметричных составляющих, сущность ко­торого состоит в замене несимметричного режима трех­фазной сети симметричным режимом или замене несим­метричного повреждения условным трехфазным коротким замыканием.

По этому методу любая несимметричная трехфазная система может быть однозначно разложена на три сим­метричные системы, или последовательности — прямую, обратную и нулевую:

*Na ~ Nai + Na> + Nao’,* (71)

*Nb ~ Nbi + Nm + Nbo',* (72)

*No — Nci + Nc2 + Neo.* (73)

Понятие о векторах и теории комплексных чисел. При расчете коротких замыканий, анализе электрических схем необходимо сопоставлять различные токи, напряжения и т. п., складывать или вычитать их, определять углы

\* Точка над буквой означает, что данная величина изменяется по синусоидальному закону.между ними и т. д. Пользоваться в этом *случае* синусои­дами, подобными приведенной на рис. 31, неудобно, по­скольку построение кривых тока и напряжения занимает много времени и не дает простого и наглядного'резуль­тата. Поэтому для упрощения принято изображать токи и напряжения в виде отрезков прямых линий, имеющих определенную длину и направление, так называемых век­торов.

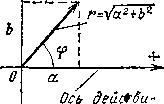
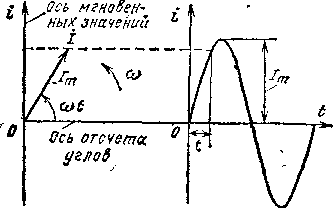
Модуль или длина вектора в принятом масштабе со­ответствует амплитудному значению изображаемой ве­личины, например *Im, Um к* т. д.

Рис. 31. Векторное изображение дальнего тока t=/ksin®/=/.

**I** *Ось мнимых / .значений*

*тельных значений*

синусов- Рис. 32. Векторное изображение комп­лексного числа a-f- +/&.

Аргумент или угол поворота вектора относительно оси отсчета углов *^ — a>t=2nft* соответствует моменту времени *t* на графике синусоиды, построенной в коорди­натах i, *t* для тока, координатах *и, t* для напряжения и т. п. Проекции вектора на ось, перпендикулярную оси отсчета углов, дают мгновенные значения электрической величины (рис. 31).

Векторные диаграммы синусоидально изменяющихся величин — магнитных потоков, напряжений, токов и т. п.— наглядно показывают, каковы соотношения меж­ду ними по значению и по фазе, и значительно облегча­ют понимание режимов в цепях переменного тока. Но в связи с тем, что при графических способах точность не всегда достаточна и графические построения сложны для разветвленных цепей, для расчетов числовых значений электрических велич’ин в большинстве случаев применя­ются аналитические способы вычислений: так, в частно­

сти, в методе симметричных составляющих используется теория комплексов, или комплексных чисел.

Комплексные числа позволяют выражать электриче­ские величины как в виде векторов, так и аналитически: в алгебраической, тригонометрической и показательной формах, а таже легко переходить от одной формы изоб­ражения к другой.

Комплексное число представляет собой сумму чисел

V—1 *b =a,-\-jb,* где *а* и *b* являются действительными числами, *j= V—*1 называют мнимой единицей. Из усло­вия *j= V—*1 вытекает основное свойство комплексного числа: *j2=—*1.

Комплексное число *a-\-jb* можно представить в виде вектора с модулем *r=* }^a2-j-b2 и углом поворота, или аргументом, *q>,* который характеризуется tg (рис. 32).

При этом число *а* называется абсциссой комплексного числа и откладывается по оси действительных значений, число *Ь —* ординатой и откладывается по оси мнимых значений.

Чтобы произвести суммирование комплексных чисел, следует сложить в отдельности их действительные и мнимые части; следовательно, сумма комплексов а+/& и «1+/61 выразится как (fl+J^) + (ai+/&i) = («+«:)+,

При умножении комплексов используется алгебраи­ческое правило умножения многочленов. Таким образом, произведение тех же двух комплексов *a+jb* и *ai-^jbj* бу­дет равно:

*(а + jb) (аг + jbj = (ааг — ЬЬг) + j (аЬг + аф).*

В тригонометрической форме комплексное число вы­ражается через модуль *г* и аргумент комплекса ф:

*а = г* cos <р и *b = г* sin ф;

*а + jb — г* (cos ф + *j* sin ф).

Показательная форма комплексного числа определя­ется выражением cos ф+jsin *q>=el<t>.* Из приведенного равенства следует, что *a + jb = re1(f.* Множитель *е,ч>* опре­деляет угол поворота вектора с модулем *г* относительно оси действительных величин.

Если комплексы выражены в тригонометрической или показательной форме

*а + ]Ь = г* (cos ф +■ / sin ф) — *ге!<»* и

«х + А== *rt* (cos Ф1 + /sin Ф1) = *rie!V' ’*

то при умножении модули их перемножаются, а аргумен­ты складываются, т. е.

*г* (cos ф + / sin ф) гх (cos фх + / sin *= rt\* [cos (ф + фх) +

+ / sin (ф + фх)] и

*re^r^' ^rrte,(^\*

В частном случае умножение комплекса, представ­ленного в виде вектора, на величину cos ф+fsin ф=Шф равносильно повороту вектора на угол ф в сторону по­ложительного отсчета углов; умножение того же векто­ра на так называемый сопряженный комплекс cos ф—■ *—j* sin ф = е~зФ соответствует повороту вектора на угол ф В обратном направлении; например, если дан вектор /■е-’11’, то в показательной форме умножение его на е±^ф записывается как

*re^e№ = гем+,()* и *ге^е-^^ге^-^.*

В заключение укажем, что изображение синусоидаль­но изменяющейся величины, например тока в комплекс­ной форме, выглядит следующим образом; /=/m(cos otf-f- +/sin®/). Мгновенное значение тока *i=Imsm(£>t* равня­ется мнимой части комплекса без множителя / или про­екции вектора *I,* вращающегося со скоростью и, на ось мнимых значений также без множителя /.

Метод симметричных составляющих. Выше уже гово­рилось, что метод симметричных составляющих состоит в замене любой несимметричной системы суммой трех симметричных систем или последовательностей: прямой, обратной и нулевой [см. (71) — (73)].

Векторы системы прямой последовательности равны по значению и сдвинуты относительно друг друга на 120° в направлении прямого чередования фаз *А, В, С.* Векто­ры системы обратной последовательности имеют равйые значения и сдвинуты на 120° в направлении обратного чередования фаз *А, С, В.* Векторы системы нулевой по­следовательности совпадают по направлению и одинако­вы по значению.

Пользуясь методом комплексных чисел, можно, при­няв одну из фаз за основную, остальные симметричные составляющие выразить через векторы этой фазы. Так, если принять за основную фазу то векторы в уравне­ниях (72) и (73) определятся как

*NBt = Nai e'2i0°, Nb2 = Naz e’™°, Neo* = Мдо; (74)

jVci *= Nai* e7-120 , *Nc2 = Nao* 6/24° , *Neo = Nao.* (75)

Комплекс ез120° называется фазным множителем, или оператором, и для сокращения математической записи обозначается буквой *а.* Оператор *а* позволяет выражать векторы симметричной системы через вектор какой-либо одной фазы. Умножение вектора на оператор *а* означает поворот вектора на 120° в положительном направлении, т. е. против часовой стрелки, умножение на *а2—* поворот на 240° в том же направлении.

Таким образом, с помощью фазного множителя *а* со­отношения (74) и (75) можно записать следующим об­разом;

*Nst = N во — oNa2, Nbo — Nao',* (74а)

*— ciNai, Nc2 = ct Nao, Nco — Nao,* (75a)

где *a* = e/120° = cos 120° + / sin 120° = i- + *j ;*

= £/240° cos 240° + *j* sin 240° = — / .

2 2

Подставляя соотношения (74a) и (75a) в (72) и (73), получим:

*N в — ct N ах + ctN a2 + Nao',* (76)

*Nc = gNai + ci2Na2 + Nao.* (77)

Решая совместно (71), (76) и (77), определим значе­ния составляющих *NAt, Nao'u Nao* через векторы фазных величин *Na, Nb* и *Nc-*

*NAt — ~— {Na + a Nb + ct^Nc)',* (78) *О*

*Nao—— (Na + c^Nb + ctNc\,* (79)

*О*

*Nao = ~{Na + Nb + Nc).* (80)

V

На рис. 33, *а* графически определены составляющие /аь /аз и /ао системы токов /а, Ав, *1с* в соответствии с (78) — (80) и затем по найденным векторам снова полу­чены исходные фазные токи *1а, 1в, 1с* (рис. 33,6).

Системы прямой и обратной последовательности сим­метричны. И поскольку векторы той и другой системы в сумме равны нулю, эти системы одновременно являются уравновешенными:

*Nai + N bi + Nc\ ~ Nai* (1 + а2 + а) = 0;

*N А2 + N В2 + N С2 ~ NА2* (1 + *й.* + а2) = 0,

где

1 , . 2 1 I . . Кз 1 .Кз п

1 т fl a — 1 —г / *1* = 0.

2 ' 2 2 2

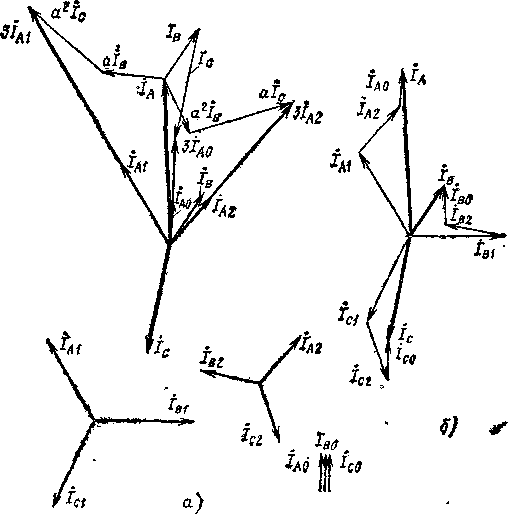


Рис. 33. Разложение несимметричной трехфазной системы на сим метричные составляющие (а); суммирование составляющих для пс лучения исходной схемы (б).

Система нулевой последовательности симметрична, но не уравновешена:

*Nao + NgO + NcO =* ЗУ ДО 0.

Следовательно, векторы любой неуравновешенной трехфазной системы величин в сумме равны утроенной слагающей нулевой последовательности на основании (80):

*Na N в + Nc =* **ЗЛ2до.**

Теория симметричных составляющих позволяет рас­сматривать режим к. з. по отдельным последовательно­стям для одной фазы, так как системы фаз симметричны.

Для каждого участка или элемента расчетной схемы в соответствии с законом Ома можно написать:

**Д(71 =** *Kjx^*

*NU2 =* /2/х2;

**Д27о = /0До>** где Xi, *Xi* и х0— сопротивления элемента при прохожде­нии токов соответствующих последовательностей или со­противления прямой, обратной и нулевой последователь­ности.

В тригонометрической и показательной формах *j* можно выразить как /=cos 90°+/sin 90°=е^90°.

Умножение вектора тока на / или е-'90'5 соответ­ствует повороту его на 90° против часовой стрелки и оз­начает, что напряжение в индуктивной цепи опережает ток на 90°.

Напряжение в месте к. з. при несимметричном к. з. не равно нулю, как при трехфазном металлическом к з., и определяется для последовательностей при помощи следующих уравнений:

*UK,i = Ё—* /к,1 *jxi,s;* (81)

Йк,2 ~ 0 — /к,2/Х2,Х‘, (82)

Йк,о ~ 0 — /к,о /Хо.2, (83)

где *Е —* результирующая или эквивалентная э. д. с. ис­точников питания.

Поскольку для каждого генератора трехфазная сим­метричная система э. д. с. статора является системой -

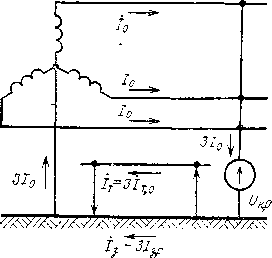
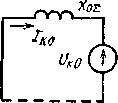
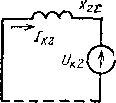
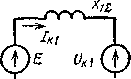


Рис. 35. Схема прохождения то­ков нулевой последовательности.

прямой последовательности, в схемах обратной и нуле­вой последовательности э. д. с. источников отсутствуют.

Создаваемые в схемах симметричных составляющих э. д. с. самоиндукции от прохождения токов прямой, об­ратной и нулевой последовательности учитываются в ви­де падений напряжения с обратным знаком в сопротив­лениях *xi,*X, x2,s и %o,s (рис. 34).

Чтобы определить результирующие сопротивления %1,х, х2,хи х0,х для расчета несимметричного к. з., со­ставляются схемы замещения прямой, обратной и нуле­вой последовательности.

Рис 34. Результирующие схемы замещения.

я— прямой последовательности, *б —* обратнее в —нулевой; *Е* и^к—синусов дально изменяющиеся величины.

Схема замещения прямой последова­тельности составляется аналогично схеме замеще­ния для расчета трехфазных к. з., так как токи трехфаз­ного к. з. являются токами прямой последовательности; система токов трехфазного к. з. симметрична, уравнове­шена и имеет прямое чередование фаз.,

Для всех элементов расчетной схемы Xi=x(3>, т. е. со­противление прямой последовательности соответствует индуктивному сопротивлению при симметричном режиме установки и определяется по § 8.

Схема замещения обратной последова­тельности составляется из тех же элементов, что и схема прямой последовательности, так как пути прохож­дения тока для обеих последовательностей одинаковы; э. д. с. генераторов в схеме принимаются равными нулю.-

Синхронные машины имеют разные сопротивления прямой и обратной последовательности. В расчетах мож­но принимать следующие значения: *х2 — 1,22х"* для ма­шин с демпферными обмотками и *х2=* 1,45V для машин без демпферных обмоток. Для приближенных расчетов можно принимать *x2^xi^x".*

Для асинхронных двигателей сопротивление обратной последовательности можно считать равным *х2—х".*

Сопротивление обратной последовательности любой обобщенной нагрузки, отнесенное к ее полной мощности и к среднему номинальному напряжению ступени транс­формации, в месте ее присоединения, принимается рав­ным Х2\* = 0,35.

Для неподвижных элементов (трансформаторов, ре­акторов, линий) изменение порядка чередования фаз не оказывает влияния на взаимоиндукцию с сосед­ними фазами и поэтому Х2 = Х].

Схема \_ замеще­ния нулевой по­следовательности. Слагающие нулевой по­следовательности в систе­мах тока и напряжения возникают при несиммет­ричных к. з. на землю (рис. 35). Токи нулевой последовательности, в су­щности, представляют со­бой однофазный ток, раз­ветвленный между тремя фазами. Возвращение токов 3 /0 происходит через зем­лю, а если линия защищена тросом^ — по тросу и земле.

Для составления схемы замещения нулевой последо­вательности выявляются контуры, по которым могут про­ходить токи, имеющие одинаковое направление во всех фазах. В точке к. з., где фазы условно закорочены и приложено напряжение Дк,о, контуры объединяются, и поэтому составление схемы целесообразно начинать с этой точки. Чтобы получилась замкнутая цепь для про­хождения токов нулевой последовательности, в схеме должна быть, по крайней мере, одна заземленная ней­траль. Если таких нейтралей несколько, то полученные цепи включаются параллельно.

В схему замещения элементы вводятся своими сопро­тивлениями нулевой последовательности.

*Трансформаторы.* Значение сопротивления нулевой по­следовательности %о зависит от конструкции и схемы соединения обмоток трансформатора.

7—206 97

Эквивалентная электрическая схема замещения трансформато­ра, представленная на рис. 36, *б,* выполнена без учета активных со­противлений и в предположении, что все параметры вторичной об­мотки приведены к первичной. Ток намагничивания в схеме /Ц1 на­зываемый иначе током холостого хода /0, равен векторной разности токов Л—/ы—/.. . Током создается основной, общий для обеих м- м-

обмоток трансформатора поток Фц или Фо, который приводит к воз­никновению в обмотках *I* и *II* противо-э. д. с. *Е1 = Ец,*

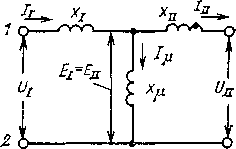
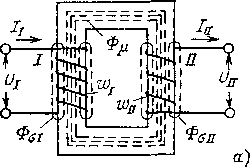


Рис. 36. Двухобмоточный трансформатор (а) и его полная схема замещения (б).

Значение тока характеризуется реактивностью намагничива­ния хц, включенной параллельно или шунтом к цепи вторичной об­мотки трансформатора.

Токами *h* и *1ц* создаются потоки рассеяния первичной и вто­ричной обмоток Фог и Фоы, определяемые индуктивными сопротив­лениями рассеяния xoi=xi и хоц=хц.

Применительно к трехфазным трансформаторам назовем за­жим *1* схемы замещения фазным, зажим *2 —* нулевым или ней­тральным.

При симметричном режиме, например при трехфазном к з., при­ложенное к зажимам *1* и *2* схемы напряжение прямой последова­тельности *lit* затрачивается на преодоление падения напряжения от тока той же последовательности Д в результирующем сопро­тивлении трансформатора *хг.*

Х1 = *Х1 +*

ХП Хц1

ХП + ХЦ1

где — сопротивление намагничивания для тока прямой после­довательности.

Поскольку сопротивление во много раз больше сопротив­ления хи, ответвлением тока в шуит намагничивания обычно пре­небрегают и считают, что сопротивление прямой последовательно­сти трансформатора, определяемое опытом к. з. (§8), равно:

*Х! ~ Х1* + ХП.

Если при симметричном режиме ток проходит только в фазном проводе схемы рис. 36, *б,* то при однофазном к. з. цепь тока нуле­вой последовательности проходит от фазного зажима *1* к зажиму *2* или нейтрали и поэтому в ряде случаев сопротивление нулевой последовательности *ха* может отличаться от сопротивления *Xt* тран­сформатора.

Под действием напряжения *Uo,* приложенного к тран­сформатору со стороны обмотки, соединенной в звезду без заземления нейтрали или в треугольник, токи /0 по обмотке проходить не будут, так как при указанных схе­мах соединения обмоток исключается протекание токов /0. Следовательно, сопротивление нулевой последова­тельности трансформатора со стороны обмотки, соеди­ненной в звезду без заземления нейтрали или в тре­угольник, равно бесконечности х0 = °о.

Конечное значение сопротивления *ха* может быть только со стороны обмотки, соединенной в звезду с за­земленной нейтралью.

На рис. 37 приведены схемы замещения нулевой по­следовательности для некоторых исполнений .трансфор­маторов.

При соединении обмотокУ0/Д (рис. 37, а) цепь тока нулевой последовательности заканчивается обмоткой *II,* что отражено в схеме замещения подключением сопро­тивления хц к нулевому выводу. Поскольку сопротивле­ние Хц,о значительно превосходит по значению xn, дей­ствие шунта Л'ц,э не учитывается. Таким образом, сопро­тивление *х0* для схемы соединения обмоток Уо/Д неза­висимо от конструкции трансформатора равняется со­противлению прямой последовательности *xf.*

*Хо* Л/ Х[ ~Ь Хц = *хг.*

При соединении обмоток У</У (рис. 37, б) ток ну­левой последовательности по обмотке // проходить не может, отсюда

*х0 =* Xi + Хц.о.

Значение Хц,о зависит от конструкции трансформато­ра. Для группы однофазных, трехфазных четырехстерж­невых и броневых трансформаторов Хц,в = оо,

Для трехфазных трехстержневых трансформаторов Хц,о =0,34-1 (в относительных единицах).

При соединении обмоток У0/у/Д трехобмоточного трансформатора (рис. 37,*в),* учитывая, что ток нулевой последовательности по обмотке *С* не проходит, и прене­брегая, как и в первом случае (рис. 37,а), отсосом тока в шунт намагничивания, имеем х0=Хв-1-Хн=х вн

*Воздушные линии электропередачи.* Основываясь на том, что токи нулевой последовательности возвращаются

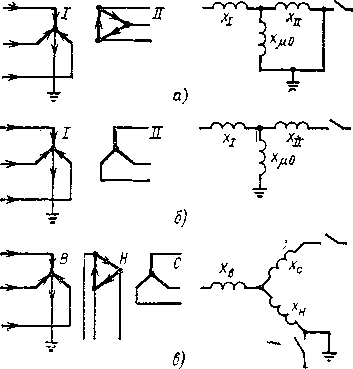


Рис. 37. Схемы заме­щения трансформа­торов для токой ну­левой последователь­ности.

через землю, воздушную ВЛ трехфазного тока можно за­менить эквивалентной схемой из трех двухпроводных ли­ний провод — земля. Отсюда сопротивление нулевой последовательности ВЛ определится как сумма сопротив­лений самоиндукции *xL* линии провод—земля и взаимо­индукции ее *хм* с соседними фазами; учитывая одинако­вое направление токов /0 по фазам ВЛ, имеем *xq=Xl-\-* -|-2хм.

Индуктивные сопротивления *xl* и *Хм* зависят от удельной проводимости земли и частоты тока; кроме то­го, *xl* зависит от радиуса провода, а *хм —* от расстоя- яния между проводами ВЛ (см. [3]).

Для ВЛ без тросов или со стальными тросами *х0~* = 3,5 Xi = 1,4 Ом/км. Для ВЛ с тросами из хорошо про­водящих металлов xo=2xi=O,8 Ом/км.

Если в симметричных системах прямой и обратной последовательностей взаимоиндукция фазы, принятой за основную, с соседними фазами уменьшает индуктивное сопротивление линии, так как токи в соседних фазах в сумме противоположны току данной фазы, то в системе нулевой последовательности взаимоиндукция приводит к возрастанию магнитного потока фазы, чем в основном и объясняется увеличение сопротивления х0 по сравнению С X] и *х2.*

Наличие на линии хорошо проводящего заземленно­го троса, например медного, сталеалюминиевого, умень­шает сопротивление *х0, так* как токи в тросе направлены противоположно токам в линии (рис. 35). Стальной трос незначительно уменьшает *х0,* поэтому с его влиянием можно не считаться, и- такие ВЛ допустимо рассматри­вать как линии без тросов.

Двухцепные ВЛ. При наличии двух параллель­ных цепей и к. з. за пределами линии или на концах це­пей сопротивление нулевой последовательности каждой цепи увеличивается в результате взаимоиндукции с со­седней цепью. Увеличение сопротивления происходит за счет совпадения по фазе токов нулевой последовательно­сти во всех фазах двухцепной ВЛ.

В случае одинакового выполнения цепей схема заме­щения нулевой последовательности двухцепной ВЛ при к. з.’одной из ее цепей изображается, как показано на рис. 38, *б.* В схеме принято, что относительное расстоя­ние *п* изменяется от нуля до единицы при перемещении к. з. от шин *Б* до шин *А.*

Значения сопротивлений Xj, *х2* и х3 находятся путем преобразования из треугольника в звезду д выражаются следующим образом:

*Ху—* (х0 *Хм,0)>*

*х2 =* п(1~— (х0 — *Хм,о),* (84)

Х3 = (хо *Хм,о).*

На рис. 38, в и г даны схемы замещения нулевой по­следовательности при к. з. на линии у шин *Б* и *А.* Эти схемы являются частными случаями схемы рис. 38,6 и получаются при подстановке вместо *п* его значений = 0 и и—1 соответственно для шин *Б и А.*

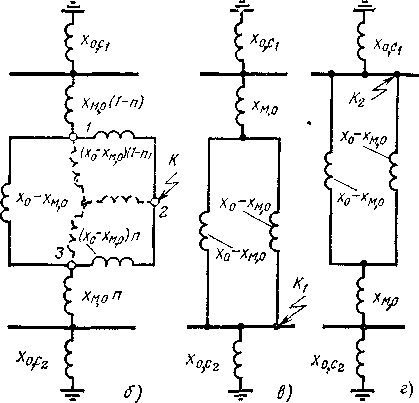
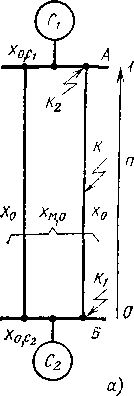


Рис. 38. Схемы замещения нулевой последовательности двухцепной ВЛ.

*а —* исходная схема; б — схема замещения при к з в любой точке ВЛ; *в, г —* то же при к. з в конце и начале ВЛ

Исходя из схемы замещения рис. 38, в (г), сопротив­ление нулевой последовательности двухцепной ВЛ равно:

**" , ХО"~ХМ.О хо + \*м,о**

*х<>* = хм.ол ~;

одной цепи двухцепной ВЛ с учетом взаимоиндукции другой цепи: Хо=хо+хм,о;

одной цепи двухцепной ВЛ при отключении другой цепи: х0' = х0, где *х0 —* индуктивное сопротивление одно­цепной ВЛ. ,

Индуктивные сопротивления ВЛ *х0* и взаимоиндук­ции *Хм,о* ориентировочно можно принимать следующие: для ВЛ без тросов или со стальными тросами:

*х0* « 3,5%! (для одноцепных ВЛ),

*Хм,о* » 2х,;

для ВЛ с тросами из хорошо проводящих металлов:

х0я^2х1 (для одноцепных ВЛ), *XM,o~xlf*

считая X] равным в среднем 0,4 Ом/км.

Схемы замещения нулевой последовательности при к. з. на линии вблизи шин и каскадном отключении линий легко получаются из схем 38, в и г отсоединением сопро­тивления линии с к. з. от шин *А* или *Б* в зависимости от места повреждения.

В схеме блоков линия — трансформатор рис. 39, а трансформатор по сопротивлению нулевой последова­тельности рассматривается как продолжение линии или элемент линии, и поэтому схема замещения блоков рис. 39,6 строится по аналогии со схемой параллельных ли­ний рис. 38, *б.*

Отсюда сопротивления эквивалентной звезды *Ху Хз* для схемы блоков равны:

\_ (1 - *п)* (х0- .

*Xi — ' у*

*2*

*х = ~ (хо~* \*м,о) [га(хо~хм,о) +\*о,т] . /85)

2(ХО-Хм,о + Хо,т)

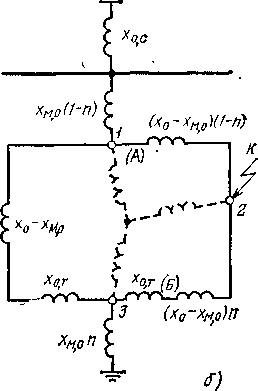
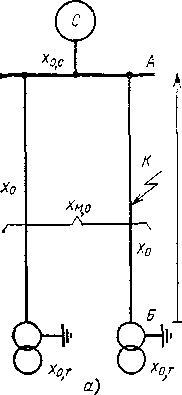


Рис. 39. Схема замещения нулевой последовательности двух блоков ВЛ — трансформатор.

<2 — исходная схема; б — схема замещения в любой точке ВЛ.

*Кабели.* Сопротивление нулевой последовательности кабелей принимают в пределах *ха—* (3,54-4,6) %i в зави­симости от возвращения токов нулевой последовательно­сти только по оболочке кабеля или по оболочке и земле.

*Реакторы.* В реакторах взаимоиндукция между фа­зами сказывается незначительно, из-за чего в расчетах обычно принимают *хо^х^.*

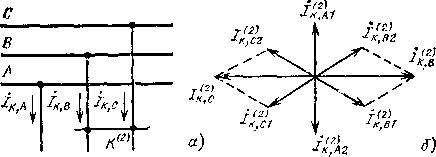


Рис. 40. Двухфазное к. з. (а) н векторная диаграмма токов в месте повреждения (6).

Токи и напряжения в месте несимметричного к. з. Для расчетов указанных величин предварительно долж­ны быть составлены схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательности и определены результиру­ющие сопротивления Xi,s, Хг,2. \*о,2 и результирующая э. д. с. *Е.*

В качестве положительного принимаем направление токов к месту короткого замыкания.

*Двухфазное к. з.* Двухфазное к. з. между фазами *В* и *С* (рис/ 40) характеризуется следующими условиями:

г(2) л. г(2) г(2) Z/(2) п

*Ка* **= 0; /к,***в —— 1к.с, Ук,в — —*

Так как сумма фазных токов равна нулю, то систе­ма является уравновешенной и, следовательно, /кд=0.

По (71) произведем разложение тока’ фазы *А* на симметричные составляющие:

И2) \_ *;(2) , М2) \_ п*

*J-K.A — JK.A1* Т *1к,А2 —* О,

откуда

Г(2) \_ /(2)

(86)

*Jk.AI — Jk,A2.*

Исходя из условия » и рассматривая

его совместно с (76) и (77), можно убедиться в том,

= 17^2.

*(87)*

Из (87), (81) и (82) вытекает равенство

*Ёа /к,А1* /Х1,2 = — */к,А2 JX2S,*

заменив в котором — 7^2 на , согласно (86) лучим расчетное выражение для определения тока двухфазном к. з.:

по­

при

(88)

что

}(2) \_\_ *ЁА*

1 к, *А1 = .*

/ (\*1,2 + \*2,2 )

Комплексная форма выражения (88) означает, ток отстает от фазной э.д. с. на угол 90° (деление на /) и по абсолютному значению равен:

ж

к,Al r j у •

*\*1,2 X2,Z*

Токи в поврежденных фазах В и С находим по (76), (77) и (86):

*№ = а & + ai^A2* = (а2 - а) & = - / *УЗ* 7^Л1; (90)

№ — (а — с2) & = / *УЗ 1™ди (91)*

Абсолютное значение полного тока при двухфазном к.з. определится из (89) — (91):

*УГр*

*/G)=* . (92)

\*1,2 'I' \*2,2

На основании (92) для момента возникновения к. з.

W *е"*

*Ц2Г^ —*, (93)

*У*з *У.2* + \*2.2) \*1.2 + \*2,2

где *Е" —* сверхпереходная междуфазная э.д.с. 8—206 105

В случае питания к. з. от энергосистемы

у(2) \_ (7ср *Ucp*

(94)

*(\*1S + x2,z)* Xl,s + X2,2

На рис, 40,6 произведено построение симметричных составляющих и полных токов для двухфазного к. з. *В-С.*

При определении напряжений в месте к. з. следует учесть следующее: для систем с заземленной нейтралью, когда сопротивление \*о,2 имеет конечное значение, на­пряжение *U* к^опри *1к,1=0* на основании (83) также рав­но нулю; для систем с изолированной нейтралью, когда *Xo,s* =оо и *0ко=—*оо-0 — неопределенность, короткие замыкания не влияют на смещение нейтрали системы ,’,(2)

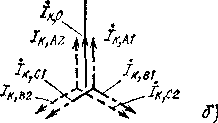


Рис. 41. Однофазное к, з. (а) и векторная диаграмма токов в месте повреждения (б).

относительно земли и Ок,о в уравнениях напряжении не рассматривается.

Симметричные составляющие напряжений *U* кл1 и *УкА2* можно определить по (81) и (82), после чего, пользуясь (71), (76) и (77) для вычисления полных зна­чений, найти напряжения в месте к. з.

*Однофазное к. з.* на землю одной из фаз, например фазы *А* (рис. 41), определяется следующими условиями: *1^в* = 0; Я1,’с = 0; (]%А = 0.

Так как токи в двух фазах отсутствуют, то очевидно, что симметричные составляющие поврежденной фазы *А в* соответствии с (78) — (80) равны:

7(1) *\_ iW* \_ /(1) \_ 1 7<1> \*к,Л1 ~ *— 'к, АО — ~ I к,А-*

V

Выражая напряжение (7к'а через симметричные со­ставляющие и их значения в (81) —(83), получим:

*й^А = й^А1* + ^(к.А2 + *и^А.* = О и далее:

*Ёа—* /(к?А1 / (-V1.S + \*2,2 + \*0,s) = О, откуда

7^А1 = — (95)

/ (х1,2 4" х2,2 4" х0,2/

Абсолютное значение полного тока к. з. равно:

*W* = 3/^1 = • (96)

\*1,2 4\* *x2,s* 4\* х0,2

Для начального момента времени

*VjJL ,*

У^3 (Х1,2 + Х2,2+ х0,х) Х1,2 + Х2,2+Х0.2

где *Е” —* сверхпереходная междуфазная э. д. с.

При питании от энергосистемы

pi) 3^р = Е2£ер . (98)

4- х2,2 4- х0,г) х1,2 + Х2,2 4--^000

При необходимости по (81) — (83) можно определить симметричные составляющие напряжений, а затем по (71), (76) и (77)—полные напряжения фаз.

Несимметричные к.з. за трансформато­рами. При переходе через трехфазный трансформатор (или трехфазную группу однофазных трансформаторов) в нормальном режиме токи и напряжения в общем слу­чае изменяются по значению и фазе, зависящей от груп­пы соединения обмоток трансформатора. В частных слу­чаях возможна трансформация только по значению или по фазе, например для трансформаторов с соединением обмоток у/у — 12 и для трансформаторов с соединением обмоток у/Д и коэффициентом трансформации *п=* 1 соответственно.

Коэффициентом трансформации *п* называется отно­шение междуфазных напряжений холостого хода пер­вичной и вторичной обмоток трансформатора:

Соотношение первичных и вторичных величин в трех­фазном трансформаторе при п>1, исходя из равенства мощностей в обмотках и в пренебрежении потерями на намагничивание, определяется следующими формулами: для понижающего трансформатора

*U\ = nUц* и *Ii — — 1ц‘,* (99)

*п*

для повышающего трансформатора

*Ui~ — Uи и Ii = п1ц,  
п*

где *Ui, Uu* и Л, *1ц—* соответственно линейные напряже­ния и токи.

В связи с тем, что симметричные системы более про­сты, для аналитических вычислений или построения век­торных диаграмм токов и напряжений, получающихся в результате трансформации в несимметричных режимах, целесообразно использование метода симметричных со­ставляющих. Поскольку при этом методе результирую­щие величины получаются путем сложения симметрич­ных составляющих, достаточно задать коэффициенты трансформации по (99\*) и углы поворота этих систем, приведенные ниже, чтобы получить действительные зна­чения и угловые смещения токов и напряжений при пе­реходе через трансформатор.\*

Смещение систем прямой и обратной последователь­ности по углу при трансформации со стороны звезды на сторону треугольника производится поворотом векторов прямой последовательности на угол 360°—30°-Л/, векто­ров обратной последовательности на угол —(360°— 30°-jV). При трансформации от треугольника к звезде знаки углов поворота меняются на обратные, соответст­венно: — (360°—30°-Л/) и 360°—30°• *N,* где *N —* номер группы соединения обмоток трансформатора.

Токи нулевой последовательйости вследствие совпа­дения по модулю и фазе не выходят за пределы обмот­ки, соединенной треугольником, и в линейных проводах треугольника отсутствуют.

Однако на практике редко прибегают к аналитическо­му или векторному решению задач по трансформации симметричных составляющих, учитывая одновременно

-\* Имеется в виду применение для симметричных составляющих комплексных коэффициентов трансформации (см. [2]). коэффициент трансформации и угловые смещения си­стем. Чаще решение производится в два приема[[12]](#footnote-13):

для заданной группы соединений трансформатора и *rt=l* выясняются соотношения токов (напряжений) со стороны питания по отношению к токам (напряжениям) в месте к. з.;

затем для конкретных условий вычисляется ток в месте к. з., и по формулам приведения § 6 и соотноше­ниям, полученным выше, определяются действитель­ные токи (напряжения) на обеих сторонах трансфор­матора.

Зная из предыдущего текста, как оперировать сим­метричными составляющими, при прохождении через трансформатор, рассмотрим случаи несимметричных к. з. за трансформаторами.

На рис. 42—44 приведены векторные диаграммы то­ков к. з. для трансформаторов с наиболее распростра­ненными группами соединения обмоток Y/Д -11 и Yo/A -11 и коэффициентом трансформации п=1. Для такого рода трансформаторов число витков в обмотках, соединенных в треугольник, вф^З раз превышает число витков обмоток,соединенных в звезду: п = дау|/’з/ауд = 1.

Полные токи в обмотках трансформаторов и на их выводах получены при помощи сложения симметричных составляющих токов к. з.

Двухфазное к.з. на стороне треуголь­ника (рис. 4 2). Рассмотрение начнем с места к.з.

В связи с тем, что токи к. з. в фазах *В'* и *С'* равны по значению и противоположны по направлению (рис. 42,г), составляющие нулевой последовательности при данном виде к. з. отсутствуют.

При переходе с линейных выводов в фазы треуголь­ника *а, Ь, с,* что в данном случае соответствует фазам звезды, система токов прямой последовательности (рис. 42, б) поворачивается на угол —30°, токов обратной по­следовательности (рис. 42, *в) —* на угол +30 °.

Токи к. з. протекают по всем трем фазам треуголь­ника, поскольку распределяется между одной фазой и двумя обратно пропорционально их сопротивлениям —

2 r(2) 1 Я2)

как ~з к и ~з к '

На стороне звезды изменения систем токов по фазе не происходит, но по значению токи возрастают в К3 раз за счет соотношения витков, шу */w* д = 1/*У~3.*

В результате трансформации в фазах зве\_зды будут протекать токи (рис. 42,г): в фазе *С 2!<к2)/}/Г3* и в фазах *А иВ* /<2)/з.

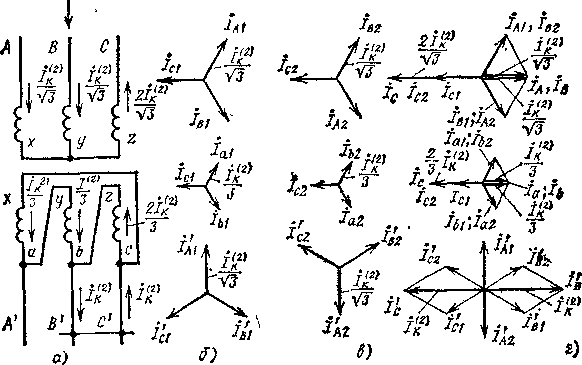


Рис 42. Двухфазное к. з. на стороне треугольника за трансформа­тором с группой соединения обмоток Y /Д-11.

*а* — исходная схема; векторные диаграммы: токов прямой последовательности (6), обратной последовательности (в); полных токов к. з. (г).

При к. з. между фазами *СА* и *АВ* максимальное зна­чение тока к. з. со стороны звезды будет циклически пе­ремещаться в фазы *А и В.* Токи к. з. со стороны звезды при равных сопротивлениях в схемах прямой и обратной последовательности соответствуют току трехфазного к. з.

2 *VT*

ь одной фазе [см. (104)] *В^тах =—*и половине Кз 2

этого тока в двух других фазах.

Двухфазное к.з. на стороне звезды. Си­стемы токов прямой и обратной последовательности (рис. 43,6 и е) при трансформации со стороны звезды в фазы треугольника уменьшаются в К 3 раз за счет большего в /3 раз числа витков в обмотках, соединен­ных в треугольник.

Ток к. з. протекает только по двум фазам треуголь­ника, соответствующим поврежденным фазам на сторо­не звезды.

При переходе в линейные провода треугольника си­стема токов прямой последовательности (рис. 43,6) по­ворачивается на угол +30°, токов обратной последова­тельности (рис. 43, *в)* на угол —30°.

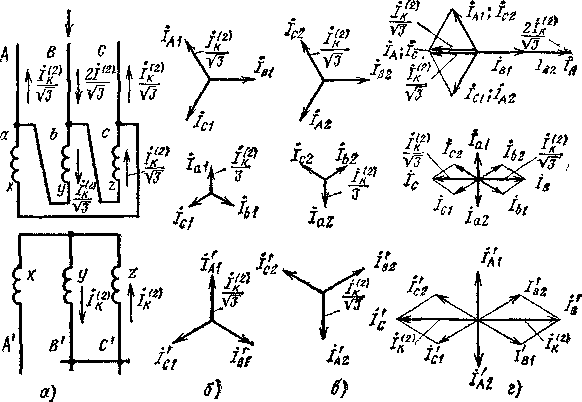


Рис. 43. Двухфазное к. з. на стороне звезды за трансформатором с группой соединения обмоток Y Д/-11.

о — исходная схема; векторные диаграммы: токов прямой последовательности (б); обратной последовательности (s); полных токов к. з. (г).

Аналогично предыдущему случаю к. з. токи в линей­ных проводах -Треугольника (рис. 43, г) составляют: в фазе *В 21^/^^,* в фазах *А и С* 3, и при цикличес­ком изменении фаз к. з. максимальное значение тока также перемещается. Если сопротивления схем прямой и обратной последовательности равны, то ток в одной из фаз со стороны треугольника составит /<.3) в двух других /2.

Однофазное к.з. на стороне звезды (рис. 44). Системы токов прямой, обратной и нулевой после­довательности (рис. 44, б, *в, г)* трансформируются в фа- зы треугольника без изменения направления, уменьша­ясь в КЗ раз (см. предыдущий случай к. з.).

Ток к. з. протекает только в одн«й фазе треугольни­ка, соответствующей фазе к. з.

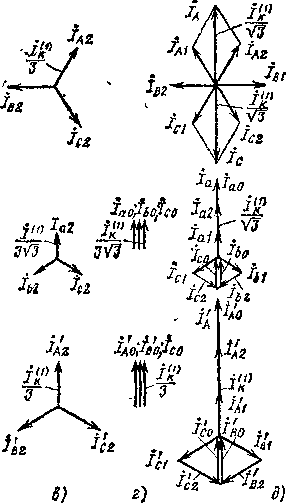
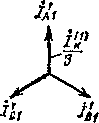
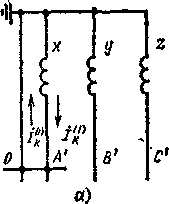
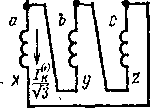
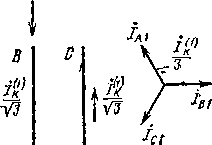


Рис. 44. Однофазное к. з. на стороне звезды за трансформатором с группой соединения обмоток То/Д-11.

*а —* исходная схема; векторные диаграммы: токов прямой последовательности (б), обратной последовательности (а); нулевой последовательности *(г);* пол­ных токов к. э. (б).

Углы поворота систем токов прямой и обратной по­следовательности при выходе из фаз треугольника такие же, как при двухфазном к. з. на стороне звезды.

Результирующие токи в линейных проводах треуголь­ника (рис. 44, *д)* протекают по двум фазам, *А и С, и* рав­ны /к^Р^З. При циклическом изменении фазы к. з. про­текание токов в линейных выводах треугольника изме­няется аналогично.

Обобщение формул для определения токов несимметричных к.з. Из (92) и (96) для полных токов в месте к. з. следует, что по абсолютному значению ток несимметричного к. з. пропорционален току прямой последовательности при данном виде к. з.: *1^=пгм1^1,* (100) где — коэффициент пропорциональности, значение которого зависит от вида к. з. (для трехфазного к. з. т<3)=1, для двухфазного к. з. /n(2)=jK 3, для однофаз­ного к. з. т(1)=3); 7кл—ток прямой последователь­ности для данного вида к. з.

В общем виде выражение для определения тока *1$* можно записать как

(101)

\*1,2 + [[13]](#footnote-14)Д0п

где сопротивление прямой последовательности для данного вида к. з., характеризующее удаленность точки короткого замыкания; *х*—дополнительное индуктив­ное сопротивление, зависящее от вида к. з. (для трехфаз­ного к. з. \* доп = 0, для двухфазного к. з. х<^п=х22, для однофазного к. з. *х^п* = x2<s + xoz).

На основании (101) ток прямой последовательности определяется как ток трехфазного к. з. в точке, удален­ной от действительной точки к. з. на дополнительное со­противление *х$п .*

Соотношение токов двухфазного и трех­фазного к.з. дляначального момента вре- мени и ударный ток двухфазного к.з. На практике, как правило, принимают После за­

мены *х* 2,s на *х* 1,2 выражения (93) и (94) для определе­ния тока двухфазного к.з. в начальный момент времени приобретут следующий вид:

**/<2)’** (102)

*2х*

**1,2**

*jw^dlsv—'* (ЮЗ)

2xj s

Обозначив начальное значение тока через /п,о и поде­лив (102) на (50), а также (103) на (52), получим иско­мое соотношение токов для двухфазного и трехфазного К. 3,

XL = \_LL (io4)

2

где /<2>и /<3^ -г соответственно действующие значения периодической слагающей тока двухфазного и трехфаз­ного к. з. для *t=0.*

Поскольку при определении тока прямой последова­тельности двухфазное к. з. можно условно представить как некоторое трехфазное за сопротивлением хцх+хг.х, ударный ток двухфазного к. з. можно выразить по анало­гии с (64) как

= (Ю5)

Ударный коэффициент определяют в зависимости от вида расчетной схемы на основании выражения (64) или (66), применяя для расчета Т^2’увеличенные по сравне­нию с трехфазным к. з. значения *х s* и *г* s соответственно на Дх=Л2,хи Дг=Г2,х.

Исходя из условия х12 = х2>2 и заменяя в (105) в соответствии со (104), получим:

**,•(2) \_\_** *£,<2> У3* Г<3>

**‘УД —** *т* **^УД “ Г п,о.**

При равенстве ударных коэффициентов ударный ток трехфазного к. з. [см. (64), (66)] превосходит по зна­чению ток двухфазного к. з., причем соотношение токов составляет:

**\*УД**

**;(2)**

**\*УД**

-±\_ = 1,15.

Гз

Определение токов несимметричных к. з. для различных моментов времени. Для вычисления тока прямой последовательности несим­метричного к. з. пользуются расчетными кривыми (§ 11) на основании положения, что ток прямой последователь­ности соответствует току некоторого трехфазного к. з. за индуктивным сопротивлением

Аналогично изложенному в § 11, по току прямой по­следовательности для генерирующих ветвей вычисляют отношения /1п,о,г//ном,г,, а при необходимости также /1п,о,г/Лп,о, х и затем, пользуясь кривыми рис. 24, *а* или *б* находят /1п,/,гД1п,о,г или /ш,г s/Дп,о, s •

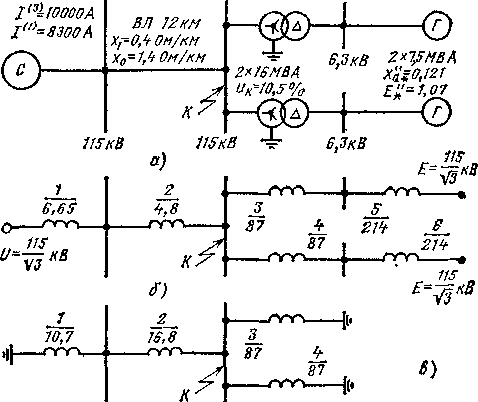


Рис 45. Схемы к примеру 22.

*а* —. расчетная схема сети; *б, в —* схемы замещения.

По найденным относительным токам прямой после­довательности, пользуясь коэффициентами пропорцио­нальности в (100) и зная токи прямой последовательно­сти для *t==0,* определяют полные токи несимметричного к. з. для заданных моментов времени.

*Пример 22.* Определить ток к. з. в начальный момент времени для трехфазного, двухфазного и однофазного к. з. в точке *К* (рис. 45, *а).*

На шинах 115 кВ связи с энергосистемой заданы токи трех­фазного к. з. /<3>= 10000 А и однофазного к. з. /Р>=3/о=8300 А.

Решение начинаем с составления схем замещения.

Схема замещения прямой последовательности составляется аналотчно схемам замещения для расчета токов трехфазного к, з. и дополнительных пояснений не требует. Так как в данном случае для всех элементов принято, что Xi = x2, схема замещения обратной последовательности по сопротивлениям получается такой же, как и схема прямой последовательности, но только не содержит э. д. с. Обе схемы на рис. 45, *б* условно совмещены.

В каждом трансформаторе 16 МВ-А токи нулевой последова­тельности замыкаются в обмотке, соединенной в треугольник, так что в цепи генераторов токи нулевой последовательности не про­ходят, и сопротивления генераторов в схему нулевой последова­тельности не вводятся.

Заданный ток 7(1) = 3/о со стороны энергосистемы свидетельст­вует о том, что в системе также имеются трансформаторы с зазем­ленными нейтралями, которые (т. е. нейтрали) удалены от точки к. з. на суммарное сопротивление системы х[[14]](#footnote-15) и *ВЛ .*

Таким образом, по числу заземленных нейтралей — трансфор­маторов 16 MB-А и энергосистемы — в схеме нулевой последова­тельности получим три ветви, объединенные в точке к. з. (рис. 45, в).

За расчетную ступень напряжения принимаем (7в=И5 кВ.

Для, упрощения из-за малой мощности генераторов *(Еяк —* «=1,00577) принимаем их приведенные э. д. с. равными напряжению энергосистемы.

На схемах замещения проставляем значения сопротивлений в соответствии со следующими подсчетами.

Схема замещения прямой (обратной) после­довательности:

Кз-юооо

Х].2 = 0,4-12 = 4,8 Ом;

115а

х,., = *х,..* = 0,105 = 87 Ом;

1,4 16

1152

х1;5 = Х1;6 — 0,121 = 214 Ом.

Схема замещения нулевой последовательно­сти Поясним, как определяется сопротивление нулевой последо­вательности системы:

Если согласно (98)

*Ucp*

3 2х1;1 + х0;1 \*

*Узис„* /з-115-103 п

то \*o;i — ~—2xi;i — ggQQ 2-6,65 — 10,7 Ом;

х0;2 = 1,4-12= 16,8 Ом;

х0;3 = х0;4 = 87 Ом.

Трехфазное к. з. Сопротивление цепи энергосистемы до точки к. з.

\*i;i + \*i;2 = 6,65 + 4,8= 11,45 Ом.

Сопротивление цепи генераторов до точки к .з.

Хрз + Хрг 87 + 214

1|5 = —4 = 150,5 Ом.

2 2

Результирующее сопротивление схемы

Х]\_2= 11,45/150,5= 10,64 Ом.

Ток трехфазного к. з. в точке *К* составит:

115 000  
;(3) = == 6240 д.

/3-10,64

Двухфазное к. з. На основании (104) ток двухфазного к. з. в точке *К*

*Уз*

*1™= —*— -6240 = 5400 А. 2

Однофазное к. з. Результирующее сопротивление схемы нулевой последовательности

87  
л02 = (10,7+ 16,8)/“ = 16,85 Ом.

Расчетное сопротивление для определения тока /0

= 2xls+ x0,s= Ю,64-2+ 16,85 = 38,13 Ом.

Ток однофазного к. з. в точке *К* согласно (98) составит: 115-3-103 Л .

/<»> = 3/0 = —— = 5220 А.

УЗ-38,13

*Пример 23.* На втулках 115 кВ трансформатора отпаечиой подстанции в точке *К* (рис. 46, *а)* произошло однофазное к. з. Тре­буется определить ток к. з. для начального момента времени.

Сопротивления схем замещения (рис. 46, *б, в)* таковы: прямой (обратной) последовательности:

115 000 „

хР1 = —— = 7,45 Ом;

*V* 3-8900

х1;2= 0,4-48 = 19,2 Ом;

х' = хрз = 9,6 Ом;

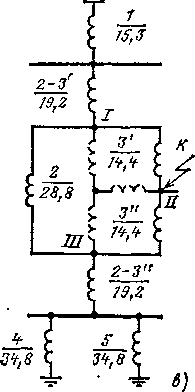
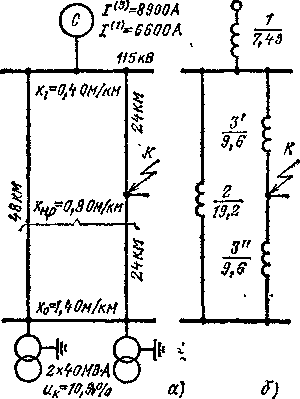


Рис. 46. Схемы к примеру 23.

*а —* расчетная схема сети; б, *в —* схемы замещения: прямой (обратной) и ну­левой последовательностей. Штрихами помечены доли сопротивления повреж­денной ВЛ и взаимоиндукции между ВЛ.

нулевой последовательности (рис. 38):

011 6600

х0.2 = (1,4 — 0,8)-48= 28,8 Ом;

хо;3= \*о;3= 14>4 Ом;

х0;2—з ~ х0;2—3 ~ 0,8-48-0,5 = 19,2 Ом;

115\*

—34,8 Ом.

В соответствии с (84):

*х0* I ~ 0,25-28,8 = 7,2 Ом;

*х0,*II ~ 0,25-0,5-28,8 = 3,6 Ом;

*хо* ill = 0,25-28,8 = 7,2 Ом.

Результирующее сопротивление схемы прямой (обратной) по­следовательности

х12 = 7,45 + (19,2 + 9,6)/9,6 = 14,65 Ом.

Результирующее сопротивление схемы нулевой последователь­ности

\*о,2 = (15,3+ 19,2 + 7,2)/(17,4+19,2 + 7,2) +3,6 й 25 Ом.

Расчетное сопротивление для определения тока /0

х\*,1» = 2-14,65 + 25 = 54,3 Ом.

Ток в месте повреждения

/(1) = 3/o = 3J^

= 3670 А.

*V* 3-54,3

*Пример 24.* Вычислить ток к. з. в точках *К-1* и *К-2* схемы рис.

47, *а* для трехфазного и однофазного к. з. в момент времени *1=0.*

Данные пр сопротивлениям схем замещения (рис. 47, б, в, г) получены следующие.

Сопротивления схем замещения прямой (обратной) последова­тельности:

П5 000  
t —z =5,54 Ом;

**X,**

*Уз-*12000

хр2 = 0,4-30 = 12 Ом.

Сопротивления схем замещения нулевой последовательности (см. рис. 39):

x0;2 = x0>3 = (1,4 — °,8)-30 =18 Ом;

Xq-2-з = 0,8-30 — 24 Ом;

x0;4 = x0;S = 0,105 ’ = 22 Ом.

Ou

На основании (85):

18 18-22 , „ „

~ = 9 Ом; Чп =- 2 (18+— = 4,95 Ом;

***X,***

22

**хо,ш = 2 = 0м'**

Короткое замыкание в точке *К-1*

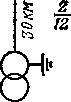
*xpOfiOufyM*

*Н5кв*

*It3L.12000A l',}=10000k*

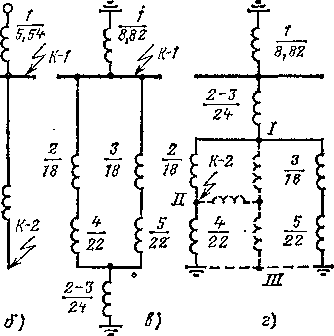
*Хмп=0,80м/км*

Г... л

*КхБЗМВ-К*

*UK=Wr57a*

*а)*

Рис. 47. Схемы к примеру 24.

*К-1*

а —расчетная схема сети; б — схема замещения прямой (обратной) последо- вательности; в, *г —* то же — нулевой последовательности.

Трехфазное: -

/О) = 12 000 А.

Однофазное!

xo,S = 8,82^44 = 7,35 Ом;

4° =2-5,54 + 7,35 = 18,43 Ом;

/С) = з/0 = з —~~1~~~~15~~ ~~000~~— = Ю 800 А.

Кз-18,43

Короткое замыкание в точке *К-2* Трехфазное:

X; 2 = 5,54 + 12 = 17,54 Ом;

115 000

/(3) = — = зуда а.

Кз-17,54

Однофазное:

xos = (8,82 + 24 + 9J//11 + 4,95 = 13,65 Ом;

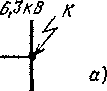
4f) =2-17,54+ 13,65 = 48,73 Ом;

115 000

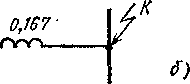
*lw* = з/о = з - = 4090 А.

Кз-48,73

*Пример 25.* Определить ток двухфазного к. з. на шинах 6,3 кВ за трансформатором 25 MB-А и токи при этом повреждении со сто­роны обмотки высшего напряжения 115 кВ данного трансформато­ра (рис. 48, *а).* Схема соединения обмоток трансформатора Y/A-11.

7/5Л5

*25МВ-А*———(3®~  
*. Ul^w,5'>/O*



*D,t№*

Рис. 48. Схемы к примеру 25.

*а —* расчетная схема сети; *б —* схема замещения прямой (обратной) последо­вательности.

Решение начинаем с составления схем замещения прямой (об­ратной) последовательности, которые условно совмещаем (см. рио, 48, б).

В качестве базового выбираем напряжение (7б=6,3 кВ.

Ток двухфазного к. з. на шинах 6,3 кВ определяем по (94) t

/(2) \_

'6,3 ~•

6300

2-0,207

= 15 200 А.

На основании рис. 42 с учетом коэффициента трансформации по (19) на стороне 115 кВ трансформатора при двухфазном к. з, на 6,3 кВ будут протекать токи: в одной фазе

Л\_ ?(2). 5(3)

*у~— ‘б.з1* в двух других 2 'б.з'

6 3 2

~ 2(5(5 | <к — = 960 А и /п|(2ф,зф) = 480 А.

110 Из -

*Пример 26.* В режиме опробования схемы рис. 49, *а* при от­ключенной энергосистеме вычислить токи трехфазного, двухфазного и однофазного к. з. на стороне 115 кВ трансформатора блока 80 МВ-А Yo/Д-П и токи со стороны генератора 60 МВт, 10,5 кВ при указанных видах к. з.

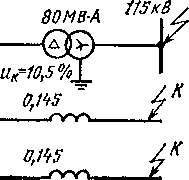
Схемы замещения см. рис. 49, *б, в, г.*

В качестве основной ступени напряжения принимаем [7б = Ю,5 кВ.

*75МВ-А \\_ Х^0,1ЧбСг) \*2 = 0,178 Е\*=1,088*

**О ■■ ■**

*0,21\**

*Е’^кВ  
VJ 0,262*

*10,5кВ*

*а)*

*fi)*

*б)*

*г)*

Рис. 49. Схемы к примеру 26.

а — расчетная схема'сети; схемы замещения: *б —* прямой; *в —* обратной; *г—•* нулевой последовательности.

Вычисления токов к. з. на стороне 115 кВ трансформатора про­изводим: трехфазного по (50) и (19); двухфазного по j(93) и (19) и однофазного по (97) и (19):

11,45 10,5

гйГ = 1’68 кА;

УЗ-0,359 110

,9. 11,45 10,5

*/ = ТтУт* “ТТ = 1 >365 кА;

115 0,766 115

(1. 11,45 *Уз* 10,5 , \_ .

ПГ = ьда “А-

Ток трехфазного к. з. в цепи генератора равен:

'S« = ]/--45— “|8'4 кА-

*V* 3-0,359

Токи двухфазного и однофазного к. з. в схеме генератора оп­ределяем, исходя из произведенных расчетов, а также на основании рис. 43—44

**И 2)**

**х10,5(1ф> —**

/(2) —

'10,5(2ф,Зф) —

2 1Ь,45  
1^3 0,766’  
1 11,45  
|/у0,766  
11,45 "Из

*17,3* кА;

= 8,65 кА;

/<1) = \_1

10,5 Кз 0,911

= 12,6 кА

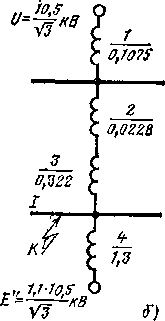
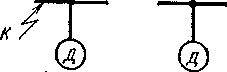
1. ПРОВЕРКА АППАРАТОВ И ПРОВОДНИКОВ ПО ТОКАМ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Ознакомившись с расчетами токов к. з., используем получен­ные знания для проверки аппаратов и проводников на подстанции.

*Пример 27.* На существующей подстанции с двумя трансформа­торами типа ТРДН мощностью 40 МВ-А и некомплектным распре­делительным устройством 10 кВ произведена замена трансформа­торов на трансформаторы того же типа мощностью 63 МВ-А.

Требуется определить ток трехфазного к. з. и ударный ток на секции шин 10 кВ в новых условиях схемы рис. 50, *а* и проверить электродинамическую и термическую стойкость оборудования высо­кого напряжения, ошиновки, а также термическую стойкость ка­бельных вводов в ячейках присоединений 10 кВ.

В качестве расчетной ступени напряжения принимаем *Щ =* = 10,5 кВ.



*715к8*

*Taf0fi25c*

*11? = 5,15кА*

*Uк ГV? %*

*ТРДН 63 МВ-А 72кпГ18,4%*

*70,5\*8 [ I д 10,5) кв*

*Зе,ц-17МВ-А Sz,r14,6M8-A*

*Е'^1,1-,КП=5 £4=1,1-, KfS а)*

Рис. 50. Схемы к примеру 27. *а —* расчетная схема сети; *б* — схема замещения.

Сопротивления элементов расчетной схемы: 10,5 10,5

*Ь =* ~~.к~~~~=~~ ~~°’~~~~1075 Ом}~~

0,013-10,5®  
 о 0228 Ом;  
а 63  
0,184-10,5®  
= — = 0,322 Ом;

63  
0,2-10,5®  
*х, = =*

1,3 Ом.

4 17

§ 5 электродвигатели секции сопротивление энергосистемы

В связи с тем что на основании *Л* не учитываются, результирующее при к. з. на секции / равно:

х2 = 0,1075+ 0,0228+ 0,322 « 0,452 Ом.

Ток к. з. от энергосистемы в месте к. з. на секции *1* 10500 /0 = ——

= 13,4 кА.

Ток от синхронных электродвигателей *I* секции в месте к. з.

1,1-10500 „ ,

/д = —— — 5,13 кА.

Кз-1,3

Определение ударного тока /уд. Расчет выполняем по (64), (65) и (68).

*Ударный коэффициент от энергосистемы на шинах 10,5 кВ:*

Активное сопротивление заданной энергосистемы 115 кВ

(Аи5=5,15 кА) вычисляем по постоянной времени Ta,cii5=0,025 с.

Активное сопротивление энергосистемы[[15]](#footnote-16)

0,1075 Г1 = — = 0,0137 Ом.

1 314-0,025

Активное сопротивление питающего трансформатора ваем, исходя из соотношения х/г«26,4 [4]:

подсчиты-

0,345  
*гг + г3* = '"'б 4 = 0,0131 Ом.

Суммарное активное сопротивление

г2 = 0,0W7 4- 0,0131 = 0,0268 Ом.

схеме эа- сопротив-

Постоянная времени апериодической составляющей тока к. *з.* энергосистемы на шинах 10,5 кВ

0,452  
Га,сю,5- 314.0,0268 -°’0538 с-

*Ударный коэффициент от тока к. з, энергосистемы*

0,01

6уДС = 1+е 0,0538 = 1,83.

*Ударный коэффициент от тока к. з. синхронных двигателей.* Для синхронных двигателей типа СДН при усредненной единич­ной мощности 3,5 МВт ударный коэффициент равен йуд,д=1,87 [4].

Исходя из найденного ударного коэффициента йуд>д=1,87 по­стоянная времени затухания апериодической составляющей тока к. з. двигателей Га,д по (64) определяется как

0,01

]g0,87=— —; Ige; Га;Я = 0,0723 с.

Га.д

Ударныйток от энергосистемы и электродви­гателей

1уд = ]/~2\13,4-1,83 + 5,13-1,87) = 48,2 кА.

Определение импульса квадратичного тока Вк. Расчет производим по (7), (12) и (13).

Исходные данные:

/п,с = 13,4 кА;

Га,сю,5 — 0,0538 с;

Га,д = 0,0723 с;

кА;

Гд=0,333 с [4]—для двигателей типа СДН РСр = 3,5 МВт.

Время отключения К. 3. ^отк [см. (12), (13)] в данном случае складывается из времени действия защиты *t3* и времени отключения выключателя *tB: tojK—ts+ts.*

По каталогу время отключения fB=0,I с, отсюда при заданном <3=0,74-1,3 с максимальное время <Отк = 1,4 с;

/ 2-1,4\

Вкп= 13,42-1,4 + 2-13,4-5,13-0,333\1 — *е 0,333 ) +*

7 2-1,4\

— = 251 + 45,7 + 4,38 яз 301 кА2-с.

+ 0,5-5,132-0,333\1 — е 0,333 /

В соответствии с (14)

0,0538-13,4 +0,0723-5,13  
т = . = 0,0589 с;

а,ск 13,4 + 5,13

**/ 2-1,4 \**

Вк,а= (13,4 + 5,13)2-0,0589 \1 — *e* °'0589/« 20 kA®-c;

BK = 301 + 20 = 321 kA2-c.

Проверка оборудования подстанции по то­кам короткого замыкания. На отходящих присоедине­ниях 10 кВ установлены выключатели типа ВМП-10 с номинальным током 630 А, разъединители типа РВ-10/630 с номинальным током 400 и 630 А, трансформаторы тока ТПЛ-10 300/5 и 400/5; иа отхо­дящих линиях используются кабели марки ААБ-150 и ААБ-185,

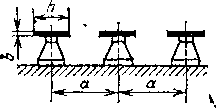


Рис. 51. Расположение шин на опорных изоляторах.

А, А\*

*ь*

Ошиновка ячеек выполняется алюминиевыми полосами сечени­ем 50X5 мм2, расположенными на изоляторах плашмя с расстояни­ем между осями фаз 35 см и между изоляторами 1 м (рис. 51). На подстанции применены изоляторы типа ОФ-10-375.

а) *Выключатели.* Сравним паспортные данные выключателя ВМП-10 с полученными расчетными значениями.

1. Номинальный ток отключения (наибольшее действующее зна­чение периодической составляющей отключаемого тока) при напря­жении 10 кВ /отк,ном=20 кА.

Проверка тока отключения производится с учетом в отключае­мом токе апериодической слагающей для времени отключения т.

В соответствии с [4] время отключения т определяется как сум­ма собственного времени' отключения выключателя (по каталогу) и условного времени срабатывания релейной защиты А = 0,01 с.

В данном случае т=0,1+0,01 =0,11 с.

Выключатель проходит по отключающей способности, если

2 /п,т + 1а,т < отк,ном\*

Преобразуя неравенство и записывая его ддя конкретных усло­вий получим:

Kf/n,cU + е *г\*’010’6)* + /2 /п,0Л *(-Г2- + е ) <*

\ 1 п.о.д /

"И 2 /отк,ном»

где /п.с = 13,4 кА;

^a.cio.s = 0,0538 с;

- т — 0,11 с;

/ц,□,д — 5,13 кА;

/тд = 0,67-5,13 кА (см. рис. 26);

Та д = 0,0723 с.

Подставив числовые значения, убеждаемся о том, что выклю­чатель по данному пункту удовлетворяет заводским требованиям: / о,и \ / о,и \

Кз’иЗ^Ь+е °’0538/-ьК2-5,13\0,67-Ье °-0723 ) < *У~2-20;*

1/2-13,4(1 +0,13) + К^-5,13 (0,67+ 0,219) =

= Кг-19,71 <1/2-20.

1. Мгновенное значение номинального тока электродинамичес­кой стойкости

1'дин(ном) ~ кА > 48,2 кА.

1. Ток термической стойкости восьмисекундный

Агер(ном) 20 кА.

Па основании заданных значений допустимый импульс квадра­тичного тока по (6) при неизменном за время /тор действующем значении тока /тер составит:

5к,доп = 4ер % = 202-8 = 3200 кА2-с.

Максимальный импульс квадратичного тока при ликвидации к. з. на линиях 10 кВ равен Вк=321 кА2-с.

Следовательно, условие термической стойкости Вк,дои>Вк для вы­ключателя выдерживается; 3200 кА2-с>321 кА2-с.

Заключение. Установленные выключатели удовлетворяют токам к. з. в новом режиме.

б) *Разъединители.* Произведем сравнение паспортных данных разъединителей РВ-10/630 с результатами расчета токов к. з.

1. Мгновенное значение номинального тока электродинамичес­кой стойкости для разъединителей:

при /нои = 400 А /дин(ном) = 50 кА > 48,2 кА;

при /н0« = 630 А 1дин(нои) = 60 кА > 48,2 кА.

1. Ток термической стойкости, четырехсекуидный;

ПРИ /ном = 400 А Агер(ном) = 16 кА=  
162-4= 1024 кА2-с>321 кА2-с;

”РИ 'ном = 630 А Лгер(ном) = 20 кА‘

202-4= 1600 кА2-с>321 кА?-с.

Заключение. Разъединители динамически и термически стойки.

в) *Трансформаторы тока.* Находящиеся в эксплуатации транс­форматоры тока ТПЛ-10 характеризуются следующими коэффици­ентами электродинамической йДИн(ном) и термической стойкости **^тер(ном) При /тер = 4 CI**

*К?...* 300/5

400/5  
165

^дин(ном)• • • 175

35

^тер(ном) ’ • • 45

Проверка на электродинамическую стойкость. Действительная кратность максимального тока к. з. составляет:

для трансформаторов тока с 7G = 300/5

»уд 48,2-103\*дин = = ~= == 114 < 175,

И2/ном *V* 2-эоо

т. е. меньше допустимого значения;

для трансформаторов тока с *Ki* = 400/5

48,2-103

Адин— - = 85,2 <С 165.

Г2-400

Проверка на термическую стойкость. Ток терми­ческой стойкости определяется как /тер <ном) = /пом Атер (ном>, отсю­да допустимый импульс квадратичного тока:

' ®к,доп = (/ном Атер(ном))2 /тер-

Термическая стойкость выдерживается, если ДЛдоп^Вк!

для трансформаторов тока с *Кт* = 300/5

3002-452-10-6-4 = 729 кАа-с > 321 кА2-с;

для трансформаторов тока с *Кт* = 400/5

40О2-352-10-М = 784 кА2-с>321 кА2-с.

Заключение. Установленные трансформаторы тока удовлет­воряют условиям электродинамической и термической стойкости.

г) *Кабели.* Проверка проводников на термическую стойкость может выполняться тремя способами [[16]](#footnote-17).

Рассмотрим два из них: по допустимой температуре нагрева или по минимальному сечению.

1. Первый способ является значительно более точным, но достаточно сложным, и прибегать к нему следует для уточнения, если более простой второй способ не дает желаемого результата.

Проверкой определяется конечная температура нагрева провод­ника токами к. з. Ок и сравнивается с допустимой температурой ОдОП.

В процессе определения нагрева используется промежуточная функция *f* и семейство кривых О = *f (/)* для различных значений *а0 = г0/х 2 ,* где го — активное сопротивление данного проводника при 0°С; —суммарное индуктивное еопротивление до места к. з.

При *а0* = 0 расчет производится без учета, при <Jo^O,2 с уче­том теплового спада.

Конечное значение функции *fK* зависит от ее начального значе­ния fB, прямо пропорционально импульсу квадратичного тока *Вк* **и** обратно пропорционально квадрату сечения проводника [4].

Начальное значение функции *fB* определяется по кривым Ф = *= f (f)* исходя из Он начальной температуры нагрева проводника. В свою очередь Он зависит от температуры окружающей среды, длительно допустимой температуры при нагрузке кабеля и от отно­шения квадратов рабочей и длительно допустимой нагрузки про­водника [4].

По расчетному значению /к -с помощью кривых О = *f* (/) нахо­дится конечная температура 0к.

Когда время отключения к. з. превышает некоторое критическое время /Отк>/кг, температура нагрева кабеля снижается введени­ем коэффициента т)<1, учитывающего теплоотдачу [4].

1. Минимально допустимое сечение проводника по условию термической стойкости при приближенных расчетах определяется как

*Ят1п — q >*

где Вк— импульс квадратичного тока А2-с; *С—*коэффициент, зна­чение которого составляет для кабелей с алюминиевыми жилами

6 кВ 08

ю кВ ....... 100

с медными жилами

6 кВ 147

10 кВ 150

Для имеющихся на подстанции кабелей минимальное сечение

по условию термической стойкости равно:

KHl -103 . „ „

***Qmin*** 1^9 ММ »

179 мм2 > 150 мм2

179 мм2 < 185 мм2.

Заключение. Кабели ААБ-185 термически стойки, кабели ААБ-150 — нестойки.

Для кабелей ААБ-150 была произведена дополнительная про­верка по конечной температуре Ок (здесь не приводится), которая показала также, что кабели не проходят по термической стойкости. На электродинамическую стойкость кабели не проверяются.

д) *Ошиновка*

Проверка на электродинамическую стойкость Предварительно подсчитывается частота собственных колебаний шинной конструкции, Гц [4]

3,56 */~ЁГ*

/Ш — „ I/ >

*Е V т*

где *I —* длина пролета шин, м; *Е —* модуль упругости материала шии, Па; *J —* момент инерции поперечного сечения шины относи­тельно нейтральной оси сечения, перпендикулярной плоскости коле- / Ыг8 \ ,

баний, м41-— I; *т —* погонная масса шины, кг/м;

/

7-10lo-5-50«-10~12 „

ii^r- = 262 r«-

При )ш>200 Гц расчет производится иа статическую нагрузку без учета колебаний при к. з. В этом случае максимальное механи­ческое напряжение материала однополосных шин, Па, на основании (5) при = 1 равно

^расч —

10-’,

где /И)—-ударный ток трехфазного к. з., A; W — момент сопро­тивления сечения, м3; £—'—коэффициент, равный 10 для крайних пролетов и 12 для остальных.

Для проверяемых шин прямоугольного сечения момент сопро­тивления, м3,

Ьй2 5-502

JJ7 =  10—2 2,08-10-».

6 6

Механическое напряжение при к. з.

48,22-10e-10-7

~~~1^.2,О8.1О-о~~ ~~= 55~~~~’~~~~3~~~~-~~~~108 Па~~~~<~~~~82~~~~’~~~~3 МШ~~~~-~~

Проверка на термическую стойкость. При опреде­лении минимального сечения шины следует исходить из позиций, изложенных в ц, «г» данного параграфа, не учитывая явлений по­верхностного эффекта и эффекта близости, поскольку ^Шия = = 250 мм2 <300 мм2; *qm.n =* 179 мм2, что меньше фактического се­чения *q* = 250 мм2.

Заключение. Ошиновка удовлетворяет условиям электроди­намической и термической стойкости.

е) *Изоляторы.* Установленные изоляторы типа ОФ-Ю-375 ха­рактеризуются допустимым усилием 7ДОп = 2205 Н.

Расчетное усилие на изолятор при к. з. в рассматриваемом слу­чае

,/—( 'уд)2 1 *ч/~* 48.2М0»

^расч = К 3 10—’ = *V* 3 - 10-’ = 1150Н <2205Н.

*CL* V ? 5D

Заключение. Изоляторы динамически стойки.

Выводы. Произведенная проверка показала, что после заме­ны трансформаторов с 40 на 63 МВ-А установленное на подстанции оборудование пригодно для работы в новых условиях.

Однако отходящие кабели ААБ'-150 оказались термически не­стойки в изменившемся режиме.

Наиболее простым выходом из создавшегося положения явля­ется снижение выдержек времени на защитах отходящих линий 10 кВ с кабелями ААБ-150 путем настройки или дополнительной установки отсечек, действующих с собственным временем 0,05— 0,15 с и отстроенных по току срабатывания от шин потребителя.

ПРИЛОЖЕНИЕ ’

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ Э. Д. С. И ИНДУКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ НАЧАЛЬНОГО МОМЕНТА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ**

Чтобы яснее себе представить физический процесс в момент воз­никновения к. з., обратимся к некоторым положениям из курса фи­зики и электрических машин.

По закону электромагнитной индукции Фарадея изменение маг­нитного потока через площадь, ограниченную йроводником, приво­дит к возникновению в этом проводнике электродвижущей силы (э. д. с.) индукции, значение которой зависит от скорости изменения магнитного потока.

В замкнутых контурах под действием наведенной э. д. с. возни­кают индукционные токи.

Ток, проходящий по проводнику, в свою очередь создает соб­ственный магнитный поток, и поэтому всякое изменение тока вызы­вает изменение потока и наведение в проводнике э. д. с. и индукти­рованного ей тока. Наведение в проводнике э. д. с. за счет изменения проходящего в нем тока носит название самоиндукции. Значение

э. д. с. самоиндукции пропорционально скорости изменения тока и коэффициенту самоиндукции.

Направление индукционного тока устанавливается законом Ленца. По этому закону возникающий в замкнутом контуре индук­ционный ток имеет такое направление, при котором его магнитное поле противодействует изменению магнитного потока, вызвавшего этот ток.

Применительно к переходным процессам в электрических ма­шинах закон Ленца иногда называют законом постоянства потоко- сцеплений. Напомним, что потокосцеплением, или магнитным сцеп­лением, Ч\*' называется произведение магнитного потока Ф на число витков обмотки *w,* которую пронизывает этот поток: Ч\*'=и>Ф.

Магнитная связь между обмотками статора и ротора приводит к тому, что всякое изменение тока в одной из обмоток вызывает индуктированный ток в другой обмотке, который стремится поддер­жать потокосцепление данной обмотки постоянным.

Рассмотрим вначале, какова физическая картина магнитного поля в синхронной машине для установившегося режима, с тем что­бы далее выяснить, как изменяются магнитные потоки при коротком замыкании.

Основной или полезный поток машины ФД см. рис. ПЛ, о), на\* правленный по продольной оси полюсов, Ьоэдается током обмотки возбуждения. При холостом ходе машины потоком Фа создается

э. д. с. холостого хода обмотки статора *Ед.* Магнитная цепь, по ко­торой замыкается основной поток, проходит по стали ротора, воз­душному зазору машины и ярму статора. Некоторая часть потока полюсов не проникает в статор, а замыкается в воздушном про­странстве н стали полюсов. Эта часть потока возбуждения имену-

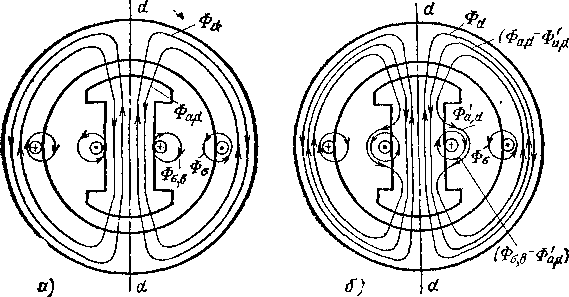


Рис. П1. Трехфазное к. з. в симметричной цепи.

•л — магнитные потоки синхронной машины для установившегося режима; б — распределение потоков для определения расчетной э. д с

ется потоком рассеяния ротора ФО(В Полный поток возбуждения Фв равен сумме потоков Фй и Фо в .

В режиме нагрузки по обмотке статора (якоря) проходит ток, вызывающий образование магнитного поля якоря. Воздействие поля якоря иа основное поле обмотки возбуждения называют реакцией якоря.

В зависимости от угла сдвига между э. д. с. и током статора дей­ствие реакции якоря на поле машины будет различным. В частном случае при угле сдвига <f«90°, принятом для изображения магнит­ных полей на рис. П-1, током статора создается продольный магнит­ный поток реакции якоря Фа.к, направленный встречно основному потоку Фа.

Помимо потока реакции якоря, обмоткой статора создается по­ток рассеяния Фо , ие попадающий в полюсы и сцепленный только с обмоткой статора.

Основной магнитный поток Фа, поток рассеяния ротора Фо в и поток реакции якоря Фа,а в сумме составляют результирующий маг­нитный поток, пронизывающий обмотку возбуждения Фв. Очевидно, что Фв=Фа+Фа1В— Фа,а (рис. П.1, а).

Магнитный поток, сцепленный с обмоткой статора Фа—Фа,а, рав­ный потоку в воздушном зазоре машины Фй, создает в обмотке ста­тора э. д. с. *Е&.* При условии пренебрежения активным сопротивле­нием обмотки статора э. д. с. *Е6* больше напряжения на зажимах генератора на значение падения напряжения от тока статора в ин­дуктивном сопротивлении рассеяния статорной обмотки *ха.*Индук­тивное падение напряжения в обмотке статора пропорционально потоку рассеяния статора Фа.

Рассмотрим процесс возникновения к. з. и взаимодействие по­токов статора и ротора при нарушении режима.

Однако предварительно отметим, что при анализе учитывается только одна слагающая действительного тока к. з. — периодическая. Как известно (§ 2), другая слагающая — апериодическая в момент к. з. обеспечивает значение тока в цепи равным току предшествую­щего режима. Раздельное рассмотрение слагающих тока к. з. допу­стимо при отсутствии насыщения магнитной системы синхронной ма­шины (см. § 5).

В момент возникновения к. з. за счет увеличения периодического тока статора возрастает поток реакции якоря Фа,а, действующий встречно по отношению к основному потоку Фа.

Но поскольку обмотка ротора обладает индуктивностью, то мгновенного изменения потока, сцепленного с ней, произойти не мо­жет. По закону постоянства потокосцеплений в цепи возбуждения под влиянием э. д. с. самоиндукции возникает свободный апериоди­ческий ток, направленный согласно с током обмотки возбуждения. Этот ток создает добавочный магнитный поток, усиливающий по­лезный поток полюсов Фа, и, кроме того, вызывает увеличение пото­ка рассеяния ротора Фо в. В сумме приращения потоков Фа и Фа в составляют увеличение полного потока возбуждения Фв, которое, равняется приращению потока реакции якоря Фа,а. Обозначив при­ращение греческой буквой Д, получим:

ДФВ = Д (Ф<2 + Фо,в) = ДФа,<г- (ПЛ)

В итоге результирующий поток обмотки возбуждения Фв (см. выше) остается без изменения.

Благодаря рассеянию ротора поток в воздушном зазоре маши­ны Ф в =Фа—Фо,а и создаваемая им э. д. с.

*Е 6* уменьшаются по сравнению с предшествующими значениями так как приращение потока ДФа по выражению (П 1) меньше при­ращения ДФа.а на величину ДФа в.

Поскольку первоначальной причиной уменьшения потока Ф6 и э. д. с. £6 является воздействие реакции якоря на поле машины при к. з., то это свидетельствует о зависимости э. Д. с. от иско­мого тока повреждения. Таким образом, э. д. с. *Е6* и индуктивное сопротивление рассеяния статора *хане* могут быть использованы в качестве расчетных величин для определения тока к. з., и поэтому возникает необходимость введения других специальных расчетных понятий.

Картина магнитных потоков для определения расчетной э. д. с. показана на рис. П.1,б. Здесь поток реакции якоря Фа,й условно разделен на две составляющие: поток Фа,й—Фа</, проникающий в ротор, и поток Ф а d, замыкающийся по пути прохождения основно­го потока и путям рассеяния обмотки возбуждения. Результирую­щие потокосцепления статора и ротора при этом остались неизмен­ными.

Как видно из рис. П.1,б поток Фай сцеплен только с обмоткой статора. Величина потока Фа пропорциональна периодическому току статора и индуктивным сопротивлениям основного потока *ха,л* и рассеяния ротора *хд* в, сложенным параллельно:

*х„ ,, х„ „*

*' а,а* о,в

Полезный поток ротора Фй и часть потока реакции якоря Фа,й— *—Фа,а* образуют результирующий поток ротора *Фа ,* пронизываю­щий обметку статора, и дают потокосцепление со статором равное =4^—(Ч'ой—*Ч’ ),* сохраняющее свое значение при

нарушениях режима. Постоянство потокосцепления V' определяет­ся тем, что приращение потока реакции якоря Д(Ф0,а—®'ad) полно­стью возмещается приращением полезного потока возбуждения ДФа т. е.

Д(ФЛ<г-Фи = Дф4- (П-2)

Из (П.1) следует, что Д(Фо,а—Ф0В)=ДФа; сравнивая левые части равенств (П2) и полученное из выражения (П.1), видим, что ДФ^=ДФов. Отсюда следует, что Д(®а в—Ф'^)=0, т. е- ПРИ изменении режима приращение потока рассеяния ротора (см. рис. П.1,б) равно нулю и не сказывается на значении потокосцепления . Значит, при заданных условиях обеспечивается независимость потокосцепления Чг ' от рассеяния ротора.

Из курса электротехники известно, что э. д. с. пропорциональна потокосцеплению. Электродвижущую силу, создаваемую в обмотке статора потокосцеплением Чг' , также сохраняющую свое значение

\* Ввиду достаточной сложности доказательство равенства не приводится.

при нарушениях режима, называют переходной э. д. с. (э. д. с. пере­хода от одного режима к другому). Неизменность э. д.с. в мо­мент нарушения режима позволяет связать предшествовавший ре­жим с новым, внезапно возникшим режимом машины.

Путем математических преобразований, которые не входят в рамки данной книги, доказывается, что

%M + ZHoMXdsin(P''- <П-3)

где' *Е* '—переходная фазная э. д. с. (действующее значение); *UB0M —* номинальное фазное напряжение; /Ном — номинальный ток; *x'd —* переходное индуктивное сопротивление, значение которого не­сколько больше индуктивного сопротивления рассеяния статора *ха* за счет добавления к потоку рассеяния статора потока @'a d; *xd* является параметром машины.

Исходя из *Eg, х d и* внешнего сопротивления цепи, можно оп­ределить начальное действующее значение периодического тока или переходный ток *I'.*

Для машин с демпферными обмотками на роторе рассмотрен­ные выше значения э. д. с. и сопротивления генератора для началь­ного момента к. з. иосят названия сверхпереходной э. д. с. £’ и сверхперех одного индуктивного сопротивления *х’^.* Дело в том, что в машинах с демпферными обмотками иа роторе при увеличении ре­акции якоря индуктируются апериодические токи как в обмотке возбуждения, так и в демпферной обмотке. Процесс к. з., характе­ризующийся наличием тока в демпферной обмотке, принято назы­вать сверхпереходным; отсюда и происходят наименования величин.

Выражение для э. д. с. *Е’* аналогично (П.З), но переходные ве­личины в нем заменены сверхпереходными:

^ном + 'номМ^Ф- (П-4)

Сверхпереходное индуктивное сопротивление «’так же, как х' является параметром машины.

Поскольку «"меньше по значению, чем х' , для получения наи­большего начального значения периодической слагающей тока к. з. нужно исходить из сверхпереходных величин *Е’* и х" т. е. исполь­зовать (П.4).

\* Напряжение и ток в (П.З) являются величинами предшеству­ющего режима машины и обычно обозначаются *U* |0| и /|0|. При­данные им номинальные значения, удобные для расчетной практи­ки, следует отнести к частному случаю к. з. в номинальном ре­жиме.

Действующее значение периодической слагающей тока к. з. дли начального момента времени называется сверхпереходным током к. з. *I"* и определяется по э. д. с. *Eq, х d* и внешнему сопротивлению цепи. Амплитуда периодической слагающей тока к. з. для того **же** момента времени вычисляется как

**^п.п.О ^п,т,0 ™ *I •***

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы. — М.: Энергия, 1970.— 520 с.
2. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы в элек­трических системах. — М.. Энергия, 1964. — 704 с.
3. Ульянов С. А. Короткие замыкания в электрических систе­мах.— М.: Госэнергоиздат, 1952. — 280 с.
4. Руководящие указания по расчету коротких замыканий, выбо­ру и проверке аппаратов и проводников по условиям короткого за­мыкания. (Первая редакция). — М.: МЭИ, 1976.
5. Баптидаиов Л. Н., Тарасов В. И. Электрооборудование электрических станций н подстанций. — М.: Госэнергоиздат, 1960.— 408 с.
6. Электрическая часть станций и подстанций/Под ред. А. А. Ва­сильева — М.: Энергия, 1980. — 608 с.
7. Будзко И. А., Захарин А. Г., Эбин Л. Е. Сельские электричес­кие сети. — М.: Госэнергоиздат, 1963. — 263 с.

**35 к.**

\* Упрощенное выражение можно использовать, если *towlTi* = 1ч-2.

1. Обычно слово «эквивалентная» опускается. [↑](#footnote-ref-2)
2. **12 Н" \*23 + \*31** [↑](#footnote-ref-3)
3. Для чисто индуктивных цепей. [↑](#footnote-ref-4)
4. Мощность 5„ом.Н1О12) =0,5 5 ном В

   ЭД [↑](#footnote-ref-5)
5. В точке К-2 учет активного сопротивления трансформаторов 2X6,3 МВ-А не обязателен; учет произведен для аналогии с расче­том в точке К-1. [↑](#footnote-ref-6)
6. Ток от генератора, пользуясь относительными величинами, *р*

   МОЖНО выразить как /п,0,г = /„ом,г, отсюда Х\*(яом)расч =

   (иом)расч *ъ*

   = — ом’г Д^ном); приближенно считая *Е\* (ном)* = const, /п,о,г о

   \_\_ ‘ном,г

   д\*(иом)расч— , •

   zn,0,I> [↑](#footnote-ref-7)
7. Для турбогенераторов небольшой мощности. [↑](#footnote-ref-8)
8. , 2 2,6535 [↑](#footnote-ref-9)
9. Поскольку токи определяются только для трехфазного к з., индекс (3) везде опущен. [↑](#footnote-ref-10)
10. Токи заменены мощностями. [↑](#footnote-ref-11)
11. Токи заменены мощностями. [↑](#footnote-ref-12)
12. Такой подход означает разделение комплексного коэффици­ента трансформации на два множителя и поочередные действия^ с ними. [↑](#footnote-ref-13)
13. Имеется в виду использование для приближенных расчетов в качестве сопротивления обратной последовательности сопротивле­ние гег торов . [↑](#footnote-ref-14)
14. Первая цифра индекса означает последовательность, вторая— порядковый номер элемента. [↑](#footnote-ref-15)
15. Индексация активных сопротивлений выполнена по мещеиия рис. 50, б аналогично индексации индуктивных леиий. [↑](#footnote-ref-16)
16. Средний по точности способ проверки по минимальному се­чению не описывается (см. [4]). [↑](#footnote-ref-17)