

Белорусский национальный технический университет

Энергетический факультет
Кафедра Электрические станции

**ЭЛЕКТРОННЫЙ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ
КОМПЛЕКС ПО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ**

Электромагнитные переходные процессы

для специальностей

1-43 01 01 – Электрические станции,

1-43 01 02 – Электроэнергетические системы и сети,

1-43 01 03 – Электроснабжение (по отраслям),

1-43 01 09 – Релейная защита и автоматика.

Составители: к.т.н., проф.СилюкС.М., к.т.н., доцент Булат В.А., к.т.н., доцент Губанович А.Г.

Минск 2022

Перечень материалов

I. Теоретический раздел

1. Булат В.А., Губанович А.Г., Силюк С.М. Электромагнитные переходные процессы. Пособие.- Минск, БНТУ, 2020.- 214 с.

II. Практический раздел

2.1. «Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах». Лабораторный практикум в двух частях. Часть 1. Схемы замещения. Составители: Бобко Н.Н., Булат В.А., Булойчик Е.В., Губанович А.Г. – Минск, БНТУ, 2017. -51 с.

2.2. «Электрамагнітныя пераходныя працэсы у электраэнергетычных сістэмах». Лабараторны практыкуму двух частках. Частка 2. Разлік несіметрычных кароткіх замыканняў. Укладальнікі: Губановіч А.Р., Булойчык А.В., Булат В.А., Бобка М.М. – Мінск, БНТУ, 2020.- 47 с.

2.3. Силюк С.М., Булойчик Е.В., Булат В.А. Сборник задач по дисциплинам «Электромагнитные переходные процессы» и «Переходные процессы в электроэнергетических системах».- Минск: БНТУ, 2010.-71 с.

2.4. Силюк С.М., Свита Л.Н. «Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах». Методическое пособие к курсовой работе по дисциплине «Переходные процессы в электроэнергетических системах».- Минск, 2004.-103 с.

III. Контроль знаний

3.1. Экзаменационные вопросы к дисциплине

IV. Вспомогательный раздел

4.1. Типовая учебная программа дисциплины

Пояснительная записка

Цели создания ЭУМК: повышение качества подготовки инженеров по специальностям 1-43 01 01 «Электрические станции», 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети», 1-43 01 03 «Электроснабжение» (по отраслям), 1-43 01 09 «Релейная защита и автоматика» и эффективности организации учебного процесса путем рационального распределения бюджета учебного времени между лекциями, практическими и лабораторными занятиями и самостоятельной работой студентов.

Особенности структурирования и подачи учебного материала: для каждого вида учебной нагрузки ЭУМК предусматриваются учебно-методические пособия, указания и практикумы.

В связи с этим ЭУМК содержит четыре раздела: теоретический, практический, контроля знаний и вспомогательный.

В теоретическом разделе приводится учебное пособие по дисциплине.

В практический раздел входят лабораторный практикум в 2-х частях, методические указания по курсовой работе, темы практических занятий, сборник задач. Особенностью методики выполнения лабораторных работ является одновременное фронтальное выполнение всех работ, предусмотренных учебной программой бригадами студентов по 3-4 человека. В практикуме по лабораторным работам содержится краткий теоретический материал, достаточно подробное описание лабораторной установки, порядок выполнения работы, контрольные вопросы. Защита выполненных лабораторных работ студентами осуществляется на следующем занятии после их выполнения. Практические занятия направлены на закрепление теоретического материала дисциплины и привязаны к конкретным этапам выполнения курсовой работы и курсового проекта. На каждом занятии преподаватель индивидуально проверяет выполнение предыдущего раздела работы, дает ответы на вопросы студентов, кратко разъясняет методику выполнения следующего раздела.

В разделе контроля знаний приводится перечень контрольных вопросов, выносимых на экзамен. Контроль знаний по выполненной курсовой работе (проекту) осуществляется в процессе защиты работы (проекта) перед комиссией, состоящей из руководителя курсовой работы и преподавателя, назначаемого заведующим кафедрой. Оценка знаний на экзамене и защите курсовой работы (проекта) осуществляется по десятибалльной шкале.

Вспомогательный раздел включает в себя типовую учебную программу дисциплины.

Рекомендации по организации работы с ЭУМК: Практическое использование студентами данного учебно-методического комплекса рекомендуется начинать с проработки учебного пособия. Для более углубленного освоения отдельных разделов дисциплины потребуется

изучение материала изложенного в учебном пособии для вузов. Затем полученные теоретические знания необходимо закрепить выполнением лабораторных работ, решением типовых задач на практических занятиях, выполнением курсовой работы и курсового проекта (для специальности «Релейная защита и автоматика»).

Оглавление

I. Теоретический раздел -	
Электромагнитные переходные процессы. Пособие.	12
Введение.....	12
1. Общие сведения об электромагнитных переходных процессах	14
1.1. Основные понятия и определения.....	14
1.2. Причины возникновения переходных процессов и их последствия.....	17
1.3. Назначение расчетов и требования к ним.....	19
2. Общие указания к выполнению расчетов.....	20
2.1. Основные допущения.....	20
2.2. Система относительных единиц.....	21
2.3. Составление схемы замещения.....	23
2.4. Методы преобразования схем замещения.....	32
3. Установившийся режим трехфазного короткого замыкания	40
3.1. Основные характеристики синхронной машины в установившемся режиме трехфазного короткого замыкания	41
3.2. Аналитический расчет установившегося режима короткого замыкания.....	44
3.3. Расчет установившегося режима трехфазного короткого замыкания в сложных схемах.....	50
3.4. Влияние и учет нагрузки в установившемся режиме короткого замыкания.....	52
3.5. Определение остаточного напряжения в установившемся режиме короткого замыкания.....	54
3.6. Внезапное трехфазное короткое замыкание в простейшей электрической цепи.....	56
3.7. Ударный ток короткого замыкания.....	62
3.8. Действующее значение тока короткого замыкания и его составляющих.....	62
3.9. Внезапное трехфазное короткое замыкание в цепи с трансформаторами (неподвижная магнитосвязанная цепь)	63
3.10. Переходный процесс при включении трансформатора на холостой ход.....	65

4. Переходный процесс при внезапном коротком замыкании в подвижных магнитосвязанных цепях.....	69
4.1. ЭДС и сопротивление синхронной машины в начальный момент переходного процесса	69
4.2. Параметры синхронной машины	75
4.2.1. ЭДС синхронной машины	75
4.2.2. Индуктивности (сопротивления) синхронной машины	76
4.3. Составляющие тока короткого замыкания синхронной машины без успокоительных обмоток...	77
4.4. Составляющие тока короткого замыкания синхронной машины с успокоительными обмотками	81
5. Влияние и учет нагрузки в начальный момент короткого замыкания	86
6. Учет системы бесконечной мощности при расчете переходных процессов	89
7. Практические методы расчета переходных процессов	92
7.1. Метод расчетных кривых	92
7.2. Порядок расчета переходных процессов по расчетным кривым	94
7.2.1. Расчет по общему затуханию.....	94
7.2.2. Расчет с учетом индивидуальных	96
коэффициентов затухания.....	96
7.3. Расчет токов короткого замыкания по методу типовых кривых.....	99
8. Расчет переходных процессов при несимметричных коротких замыканиях	104
8.1. Особенности несимметричных коротких замыканий	106
8.2. Появление высших гармоник при несимметричных коротких замыканиях	107
8.3. Сопротивления элементов для токов различных последовательностей.....	109
8.3.1. Прямая последовательность	109
8.3.2. Обратная последовательность	109
8.3.3. Нулевая последовательность	111
8.4. Составление схем замещения для токов различных последовательностей.....	124

8.4.1. Схема замещения прямой последовательности	124
8.4.2. Схема замещения обратной последовательности	124
8.4.3. Схема замещения нулевой последовательности	125
9. Однократная поперечная несимметрия. Токи и напряжения при различных видах несимметричных коротких замыканий	129
9.1. Двухфазное короткое замыкание	129
9.2. Однофазное короткое замыкание	132
9.3. Двухфазное короткое замыкание на землю	136
10. Соотношения между токами трехфазного короткого замыкания и токами несимметричных коротких замыканий	141
11. Учет переходных сопротивлений в месте повреждения при несимметричных коротких замыканиях	143
11.1. Двухфазное короткое замыкание	143
11.2. Однофазное короткое замыкание	144
11.3. Двухфазное короткое замыкание на землю.....	145
12. Правило эквивалентности прямой последовательности (правило Щедрина) и его применение в расчетах	146
13. Аналитический расчет несимметричных коротких замыканий	149
14. Расчет несимметричных коротких замыканий по расчетным кривым	150
15. Распределение и трансформация токов и напряжений различных последовательностей при несимметричных коротких замыканиях	152
16. Комплексные схемы замещения для исследования различных видов несимметричных коротких замыканий	154
17. Расчет переходного процесса при продольной несимметрии	157
17.1. Разрыв одной фазы	160
17.2. Разрыв двух фаз	162
18. Порядок расчета однократной продольной несимметрии	164
19. Общий порядок расчета сложных видов повреждений	164
20. Простое замыкание на землю в сети с изолированной нейтралью	168
21. Расчет токов короткого замыкания в установках напряжением до 1000 В	171

22. Расчет переходных процессов с учетом качаний синхронных машин.....	173
23. Качество электромагнитных переходных процессов	176
24. Способы и технические средства ограничения токов короткого замыкания	180
Библиографический список.....	183
II – Практический раздел.....	185
2.1 «Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах».	
Лабораторный практикум в двух частях. Часть 1.	185
Введение.....	185
Лабораторная работа № 1	189
Исследование распределения токов короткого замыкания и остаточных напряжений при коротких замыканиях.....	189
Лабораторная работа № 2	197
Переходный процесс в простейшей трехфазной цепи при внезапном коротком замыкании.....	197
Лабораторная работа № 3	205
Замыкание фазы на землю в сети с изолированной и резонансно-заземленной нейтралью	205
Лабораторная работа № 4	218
Определение СОПРОТИВЛЕНИЙ трансформаторов для токов нулевой ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ.....	218
Литература	228
2.2. «Электрамагнітныя пераходныя працэсы у электраэнергетычных сістэмах». Лабараторны практыкуму двух частках. Частка 2. Разлікі несіметрычных кароткіх замыканняў.	229
Лабараторная работа № 5	229
Пабудова схем замяшчэння нулявой паслядоўнасці.....	229
Лабараторная работа № 6	236
Даследаванне несіметрычных кароткіх замыканняў	236
Лабораторная работа № 7	243
Праграма ТК315 для разліку токаў кароткага замыкання на ЭВМ	243
Бібліяграфічны спіс	265

2.3. Сборник задач по дисциплинам «Электромагнитные переходные процессы» и «Переходные процессы в электроэнергетических системах»	266
Введение.....	266
1. Составление схем замещения и их преобразование	266
1.1. Параметры элементов электрических систем	266
1.2. Переход от магнитных связей к эквивалентным электрическим.....	270
1.3 Преобразование схем замещения	276
2. Расчет начального и установившегося токов короткого замыкания	278
3. Практические методы расчета симметричных КЗ	292
3.1. Порядок расчета периодической составляющей тока КЗ с помощью расчетных кривых по общему изменению тока	292
3.2. Порядок расчета периодической составляющей тока КЗ с помощью расчетных кривых по индивидуальному изменению тока	299
3.3 Порядок расчета токов КЗ методом типовых кривых	303
4. Расчет переходного процесса при однократной поперечной несимметрии	309
4.1. Определение токов несимметричных КЗ для различных моментов времени по типовым кривым	311
Литература	326
2.4 «Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах». Методическое пособие к курсовой работе по дисциплине «Переходные процессы в электроэнергетических системах».	327
Введение.....	327
Пояснения к курсовой работе	327
1. Общие сведения о переходных процессах.....	327
2. Общие сведения о коротких замыканиях.....	328
3. Задание на курсовую работу и график ее выполнения.	329
4. Содержание и оформление пояснительной записки	336
Глава 1. Методы расчетов тока трехфазного короткого замыкания.	338

1.1. Назначение и порядок выполнения расчетов. ..	338
1.2. Составление схем замещения в относительных единицах.	339
1.3. Преобразование схем замещения	345
1.4. Аналитический расчет установившегося режима короткого замыкания.	351
1.4.1. Расчет при отсутствии в схеме генераторов с АРВ.....	352
1.4.2. Расчёт при наличии в схеме генераторов с АРВ	353
1.5. Вычисление начального сверхпереходного и ударного токов короткого замыкания	356
1.6. Расчет переходных процессов по расчетным кривым	358
1.6.1. Расчет по общему изменению тока.....	361
1.6.2. Расчет по индивидуальному изменению тока	362
Глава 2. Расчет переходных процессов при несимметричных КЗ	369
2.1. Общие положения	369
2.2. Составление схем замещения для токов прямой, обратной и нулевой последовательностей.	372
2.3. Аналитический расчет аварийных токов и напряжений при несимметричных повреждениях	380
2.3.1. Двухфазное короткое замыкание	380
2.3.2. Однофазное короткое замыкание.....	382
2.3.3. Двухфазное короткое замыкание на землю.	383
2.4. Правило эквивалентности прямой последовательности и его применение в расчетах	385
2.5. Расчет несимметричных КЗ по расчетным кривым	387
Глава 3. Расчет токов короткого замыкания в электросетях 0,4-35 кВ.....	390
3.1. Особенности расчетов токов КЗ в распределительных сетях	390
3.2. Расчет токов короткого замыкания в сетях напряжением до 1000 В.....	392
Литература	405
III. Контроль знаний.....	406
3.1. Экзаменационные вопросы к дисциплине	406
IV. Вспомогательный раздел	409
4.1. Типовая учебная программа дисциплины	409
Тема 1. Введение	417

Тема 2. Общие положения к расчету электромагнитных переходных процессов	417
Тема 3. Переходный процесс в простейшей цепи и неподвижных магнитосвязанных цепях	417
Тема 4. Электромагнитный переходный процесс в подвижных магнитосвязанных цепях	417
Тема 5. Практические методы расчета короткого замыкания. Применение ЭВМ для расчета токов короткого замыкания	418
Тема 6. Особенности расчета переходных процессов при нарушении симметрии трехфазной цепи. Параметры элементов системы для токов различных последовательностей.....	418
Тема 7. Однократная поперечная несимметрия.....	418
Тема 8. Однократная продольная несимметрия	419
Тема 9. Сложные виды повреждений.....	419
Тема 10. Переходные процессы в сетях с изолированной нейтралью	419
Тема 11. Электромагнитные переходные процессы в распределительных сетях и в особых условиях	419
Тема 12. Уровни мощностей и токов короткого замыкания. Методы и средства ограничения токов короткого замыкания	419
Список литературы.....	420

I. Теоретический раздел - Электромагнитные переходные процессы. Пособие.

Введение

Дисциплина «Электромагнитные переходные процессы» является одной из профилирующих для всех электроэнергетических специальностей. Она возникла в 30-е годы прошлого столетия – в годы реализации плана ГОЭЛРО. Основателями данного курса явились в СССР – Горев А. А., Ульянов С. А., Круг К. А., Щедрин Н. Н., Мамиконянц Л. Г., Маркович И. М., за рубежом – К. Парк, Э. Кларк, Р. Рюденберг, Р. Эванс.

Переходные процессы (ПП) возникают в электроэнергетических системах как при нормальной эксплуатации (включение/отключение нагрузок, источников питания, отдельных частей электроэнергетической системы (ЭЭС)), так и в аварийных условиях (короткое замыкание (КЗ), обрыв нагруженной цепи, выпадение электрических машин из синхронизма).

Переходные процессы в ЭЭС – процесс перехода от одного установившегося режима работы электроустановки к другому.

Все переходные процессы в ЭЭС существенно влияют на выбор структуры схемы, выявление условий работы ЭЭС в аварийных режимах, выбор средств управления, регулирования, защиты и противоаварийной автоматики.

Электрооборудование, предназначенное для работы в электроустановках, выбирается в два этапа. Первый этап – по параметрам длительного режима, включая допустимые перегрузки. Второй этап – проверка выбранного оборудования по условиям его работы при электромагнитных переходных режимах, определяющими из которых являются *короткие замыкания*.

Целью изучения электромагнитных переходных процессов является:

- формирование необходимых знаний о причинах возникновения и физической сущности этих процессов;
- разработка практических методов их количественной оценки;
- предвидение опасных последствий и умение заранее их предотвратить.

При любом переходном процессе изменяется электромагнитное состояние элементов системы и нарушается баланс между механическим моментом на валу каждой вращающейся машины и электромагнитным моментом, то есть некоторые машины тормозятся, а некоторые ускоряются.

Из сказанного следует, что переходные процессы можно разделить на две составляющие:

- электромагнитный ПП;
- электромеханический ПП.

Они взаимосвязаны и представляют единое целое.

В силу большой инерции вращающихся частей машин начальная стадия ПП характеризуется преимущественно электромагнитными изменениями.

При относительно малых возмущениях (например, КЗ за большим сопротивлением или, как говорят, при большой удаленности КЗ) весь переходный процесс практически можно рассматривать только как электромагнитный, то есть в этом случае при большой электрической удаленности представляется возможным и целесообразным рассматривать только одну сторону переходного процесса, а именно явления электромагнитного характера.

Электромагнитный переходный процесс характеризуется изменением значений только электромагнитных величин электроустановки (тока, напряжения, частоты и т. д.)

При возникновении ПП в ЭЭС, он одновременно протекает в источниках питания, электрических сетях, нагрузках. При этом в источниках питания приходят в действие автоматические регулирующие устройства, например, автоматическое регулирование возбуждения (АРВ), и поэтому напряжения всех источников питания являются переменными величинами.

Материал данного курса используется при изучении специальных дисциплин: «Электрические системы и их устойчивость», «Электрическая часть электрических станций и подстанций», «Релейная защита и автоматика» (РЗА), «Электроснабжение». В свою очередь при изучении первой части данного курса используется материал, изученный в курсах высшей математики, теоретических основ электротехники (ТОЭ), электрических машин, электрических сетей.

Практические задачи, при решении которых инженер-энергетик сталкивается с необходимостью количественной оценки тех или иных величин при электромагнитных ПП, разнообразны, но они объединены целью обеспечения надежности работы отдельных элементов и всей электроэнергетической системы в целом.

Теоретические разработки и практические методы расчета всегда требуют экспериментальной проверки. Помощь в экспериментах и проверке новых теоретических разработок оказывает математическое и физическое моделирование. Применение персональных компьютеров значительно расширяет возможности математического моделирования.

1. Общие сведения об электромагнитных переходных процессах

1.1. Основные понятия и определения

Нормальный режим работы электроэнергетической системы характеризуется балансом мощностей и постоянством параметров режима (напряжений, токов, частоты, углов сдвига фаз) или незначительным их отклонением в допустимых пределах, регламентируемых нормативными документами.

Переходный процесс (аварийный режим) характеризуется значительными изменениями параметров режима, а также значительным изменением скорости изменения режимных параметров.

Чаще всего такое состояние в ЭЭС возникает при КЗ.

Коротким замыканием является всякое не предусмотренное нормальными условиями работы замыкание между фазами, а в системах с глухозаземленной нейтралью (или четырехпроводной) – замыкание одной или нескольких фаз на землю (или на нулевой провод).

В сетях с изолированной нейтралью или нейтралью, заземленной через специальные компенсирующие устройства, замыкание одной из фаз на землю называют *простым замыканием*. В этом случае в сети протекает не ток КЗ, а ток замыкания на землю, величина которого в основном обусловлена емкостью сети по отношению к земле.

В месте КЗ, как правило, горит *электрическая дуга*, которая характеризуется некоторым активным сопротивлением R_d , величина которого зависит от величины тока и длины дуги. С уменьшением тока и увеличением длины дуги ее сопротивление возрастает.

В ряде случаев эти сопротивления могут быть столь малы, что ими практически можно пренебречь. КЗ, при которых $R_d \rightarrow 0$, называют *металлическими*.

В этом случае имеет место наибольшее значение тока КЗ при прочих равных условиях.

В трехфазных системах имеют место следующие виды КЗ:

– трехфазное $K^{(3)}$;

– двухфазное $K^{(2)}$;

– однофазное $K^{(1)}$;

– двухфазное на землю, то есть замыкание между двумя фазами с одновременным замыканием этой точки на землю $K^{(1,1)}$.

Первые два вида КЗ (рис. 1.1, *a–z*) имеют место как в сетях с глухозаземленной нейтралью, так и в сетях с изолированной нейтралью. Трехфазное КЗ является симметричным, так как все фазы электроустановки находятся в одинаковых условиях.

Остальные повреждения являются несимметричными, так как при них фазы находятся в неодинаковых условиях.

Виды повреждений, которые сопровождаются многократной несимметрией (замыкание различных фаз в различных точках одновременно или замыкание фазы и обрыв другой), называют *сложными* видами повреждений. Следует отметить, что в процессе развития аварии первоначальный вид КЗ переходит в другой вид КЗ. Так, в трехжильных кабельных сетях несимметричные КЗ или простые замыкания часто переходят в трехфазное КЗ, так как образовавшаяся в начале электрическая дуга в месте повреждения разрушает изоляцию между жилами кабеля.

Несимметричные КЗ представляют собой различные *виды поперечной* несимметрии.

Нарушение симметрии какого-либо элемента трехфазной цепи (отключение или разрыв одной или двух фаз ЛЭП) называют *продольной* несимметрией.

Установлено, что большая часть возникающих повреждений носит проходящий характер, то есть повреждения самоустраняются и поэтому если отключенную часть схемы включить обратно, то восстанавливается нормальный режим работы системы. В соответствии с этим широкое применение нашло *автоматическое повторное включение* (АПВ) цепей и особенно воздушных линий.

Короткие замыкания характеризуются не только резким увеличением тока, но и снижением напряжения во всех точках схемы. Особенно резко снижается напряжение в точке КЗ.

С целью поднятия напряжения до нормального значения даже в аварийном режиме сети на генераторах устанавливаются специальные устройства *автоматического регулирования возбуждения*.

Переходный процесс в электрической сети, в которой установлены генераторы с АРВ, отличается от переходного процесса при КЗ в сети с генераторами без АРВ. Здесь на переходный процесс, обусловленный КЗ, накладывается переходный процесс в системе возбуждения синхронного генератора (СГ).

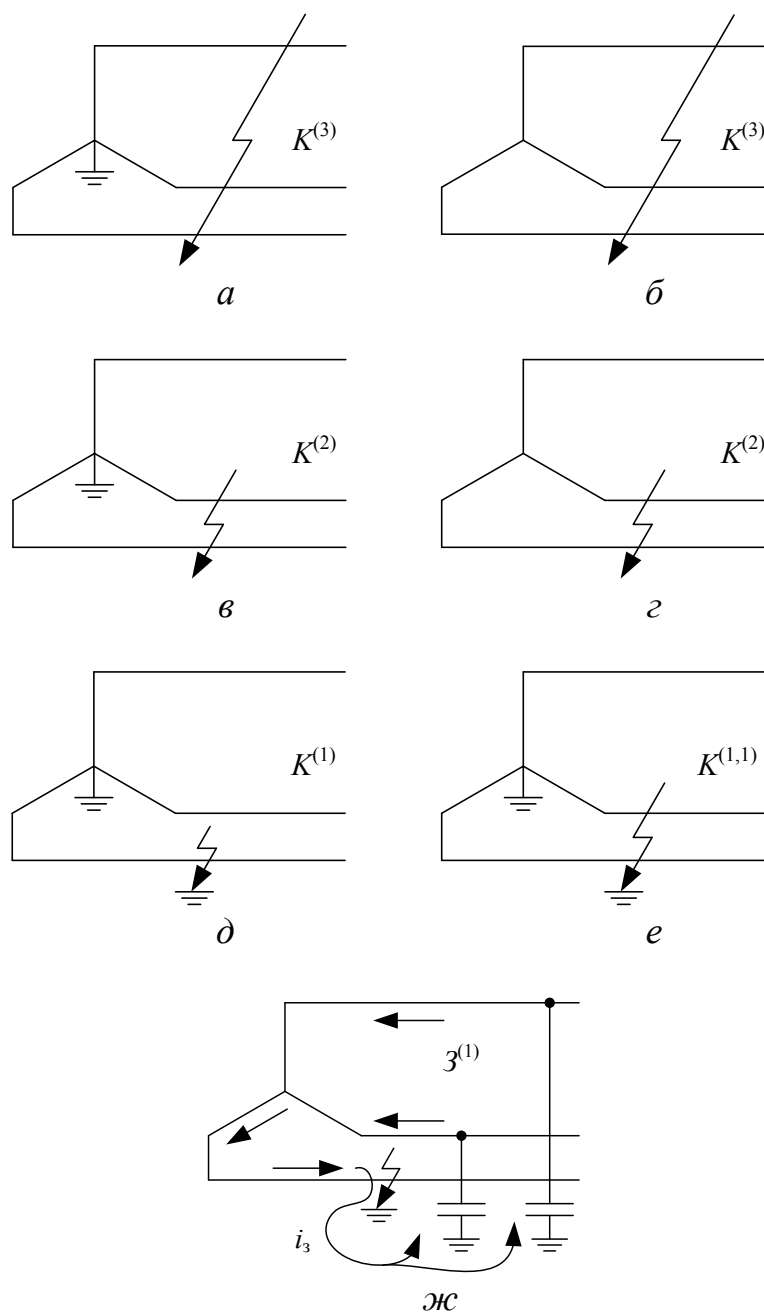


Рис. 1.1. Виды замыканий в трехфазной системе

Ток возбуждения синхронной машины системой АРВ не может подниматься бесконечно. Он ограничен предельным или потолочным значением. Связано это с температурным режимом обмотки возбуждения и исчезновением эффекта регулирования за счет насыщения магнитной системы генератора.

Для современных турбогенераторов кратность предельного тока возбуждения $I_{*в пр} \approx 4$, для гидрогенераторов $I_{*в пр} \approx 3-3,5$.

Для иллюстрации КЗ рассмотрим типичные осциллограммы тока при отсутствии и наличии АРВ (рис. 1.2).

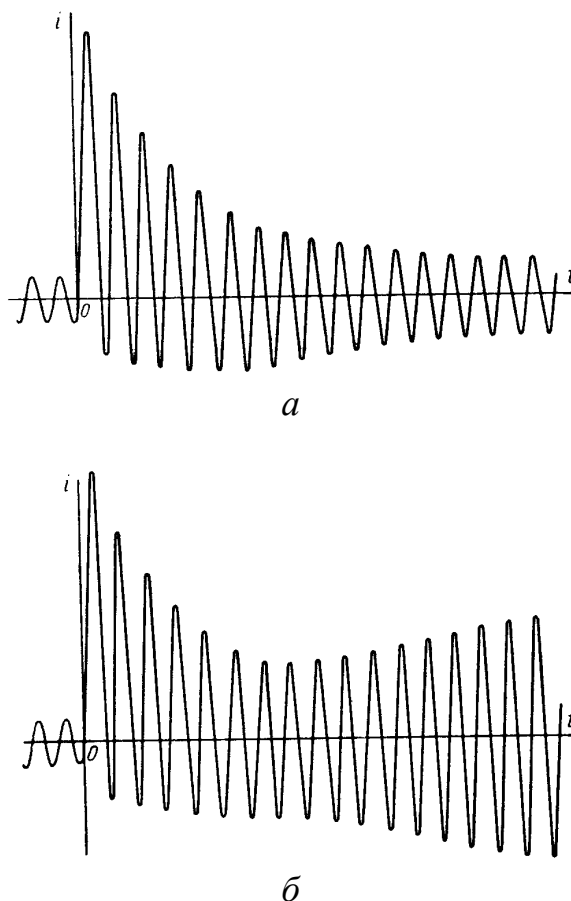


Рис. 1.2

В начальной стадии переходного процесса обе осциллограммы практически одинаковы, так как их характер определяется только лишь затуханием свободных токов, а увеличение тока возбуждения от действия АРВ в силу магнитной инерции практически отсутствует.

В дальнейшем при отсутствии АРВ, по мере затухания свободного тока, кривая переходит в синусоидальную нового установившегося режима.

При наличии АРВ амплитуда тока вновь возрастает, стремясь к установившемуся режиму, который естественно будет больше, чем при отсутствии АРВ.

1.2. Причины возникновения переходных процессов и их последствия

Причинами переходных процессов в электроэнергетических системах являются:

- включения, отключения и переключения источников электрической энергии, трансформаторов, ЛЭП, электроприемников и других элементов;
- появление несимметрии токов и напряжений в результате обрывов фаз ЛЭП, отключения отдельных фаз, несимметричных изменений нагрузки;
- внезапные набросы и сбросы нагрузки;
- форсировка и расфорсировка возбуждения синхронных генераторов;

- асинхронный ход синхронных машин после выпадения из синхронизма;
- АПВ короткозамкнутых цепей;
- атмосферно-климатические воздействия на элементы электрической системы;
- *основной причиной возникновения переходных процессов являются короткие замыкания.*

Последние, в свою очередь, являются результатом нарушения изоляции электрического оборудования.

Причинами нарушения изоляции электрического оборудования являются:

- естественное старение изоляции и потеря ею своих свойств;
- механические повреждения изоляции при производстве работ;
- возникновение КЗ за счет перекрытия изоляции перенапряжениями, возникающими при атмосферно-климатических воздействиях;
- преднамеренные КЗ, вызываемые действием установленных короткозамыкателей (рис. 1.3).

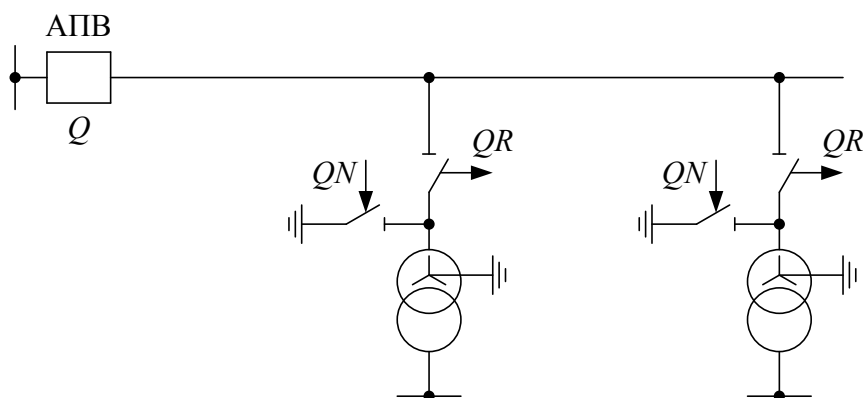


Рис 1.3

В зависимости от места возникновения и продолжительности повреждения его последствия могут иметь местный характер или, наоборот, могут отражаться на всей системе.

Основные негативные последствия КЗ:

- снижение сопротивления электрической сети и увеличение тока до максимума, снижение напряжения в узлах электрической сети;
- динамическое воздействие (механические усилия) на токоведущие части электроустановок, генераторы, электрические аппараты, нагрузки и т. д.;
- термическое воздействие на токоведущие части, электрические машины, аппараты и их изоляцию;

– нарушение бесперебойного электроснабжения потребителей. Существуют производства, которые вообще не допускают перерывов в подаче электроэнергии (1 категория);

– снижение электромагнитного момента на валу электродвигателей за счет снижения напряжения, что влечет снижение производительности машин и механизмов;

– нарушение параллельной работы генераторов энергосистемы;

– помехи в линиях связи, радио- и телепомехи при несимметричных КЗ.

Если своевременно не отключить КЗ, может произойти нарушение устойчивости электрической системы, что является наиболее опасным последствием КЗ.

1.3. Назначение расчетов и требования к ним

Под расчетом электромагнитного переходного процесса понимают определение токов и напряжений в рассматриваемой схеме при заданных условиях. В зависимости от назначения такого расчета определяют указанные величины для заданного момента времени или находят их изменение в течение всего переходного процесса.

К числу задач, для практического решения которых такие расчеты производят, относятся:

а) оценка, выбор, сопоставление схемы электрических соединений как отдельных электроустановок (электрических станций, подстанций), так и системы в целом;

б) выбор коммутационных аппаратов (выключателей, разъединителей) токоведущих частей (сборных шин, проводников) и их проверка по условиям работы при КЗ;

в) выбор, проектирование и настройка устройств релейной защиты и автоматики;

г) выбор системы форсировки и расфорсировки возбуждения, а также системы гашения поля ротора СГ;

д) расчет числа заземленных нейтралей и их мест размещения в энергосистеме;

е) выбор числа и мощности дугогасительных реакторов (ДР);

ж) расчет помех на радио- и телесвязь;

з) проектирование и проверка рабочих и защитных заземлений электроустановок;

и) выбор характеристик разрядников и ограничителей перенапряжений (ОПН) для защиты изоляции электроустановок от перенапряжений;

к) анализ причин и последствий аварий;

л) разработка мероприятий по координации и оптимизации значений токов КЗ.

Требования, предъявляемые к точности расчетов переходных процессов, зависят от назначения расчетов.

2. Общие указания к выполнению расчетов

2.1. Основные допущения

Расчет электромагнитного переходного процесса с учетом всех имеющих место условий и факторов чрезвычайно сложен и практически невозможен. Поэтому, чтобы упростить задачу и сделать ее решение практически возможным, вводят ряд допущений. Причем допущения, которые пригодны при решении одной задачи, могут быть совершенно неприемлемыми при решении другой.

Основные допущения принимают при решении большинства практических задач, связанных с определением токов и напряжений при КЗ.

К их числу следует отнести:

а) отсутствие насыщения магнитной системы генераторов и трансформаторов. Это дает возможность заменить нелинейные дифференциальные уравнения линейными;

б) пренебрежение токами намагничивания трансформаторов и автотрансформаторов. Это позволяет перейти от Т-образной схемы замещения к схеме замещения с одним сопротивлением;

в) отсутствие фазового сдвига между ЭДС генерирующих источников. Это дает возможность перейти от комплексных (векторных) величин к скалярным;

г) пренебрежение активными сопротивлениями при определении токов и напряжений в сетях 35 кВ и выше, при этом учитываются только реактивные сопротивления, то есть $Z \approx X$. В тех случаях, когда расчет производится для протяженной кабельной или воздушной сети напряжением 6–10 кВ с небольшими сечениями проводников (особенно ЛЭП со стальными проводниками), а также для электроустановок напряжением до 1 кВ, данное допущение непригодно;

д) пренебрежение емкостными проводимостями фаз по отношению к земле, за исключением случая рассмотрения простых замыканий на землю, так как в этом случае ток замыкается именно через емкостные проводимости;

е) сохранение симметрии трехфазной системы во всех точках схемы, за исключением места повреждения при несимметричных КЗ;

ж) приближенный учет нагрузок. Они учитываются приближенно, постоянными параметрами, зависящими от стадии переходного процесса;

з) отсутствие качаний синхронных машин. Однако при возникновении существенных качаний или выпадении машин из синхронизма, достаточно надежный результат может быть получен лишь с учетом такого процесса.

2.2. Система относительных единиц

Представление любых физических величин не в именованных единицах, а в относительных, безразмерных единицах, позволяет существенно упростить некоторые теоретические выкладки и придать им более общий характер. Применение системы относительных единиц в практических расчетах токов короткого замыкания придает результатам большую наглядность и позволяет быстрее ориентироваться в порядке определенных значений.

Под относительным значением какой-либо величины следует понимать ее отношение к другой одноименной величине, принятой за базисную или основную.

$$A_{*6} = \frac{A}{A_6}. \quad (2.1)$$

Если за базисный ток I_6 и напряжение U_6 принять некоторые произвольные величины, то базисная мощность системы:

$$S_6 = \sqrt{3}U_6I_6, \quad (2.2)$$

а базисное сопротивление

$$Z_6 = \frac{U_6}{\sqrt{3}I_6} = \frac{U_6^2}{S_6}. \quad (2.3)$$

Таким образом, из четырех базисных величин две могут быть выбраны произвольно, а две другие получаются из приведенных соотношений.

При выбранных базисных условиях относительные значения E, U, I, S, Z будут определяться

$$E_{*6} = \frac{E}{U_6}; \quad (2.4)$$

$$U_{*6} = \frac{U}{U_6}; \quad (2.5)$$

$$I_{*6} = \frac{I}{I_6}; \quad (2.6)$$

$$S_{*6} = \frac{S}{S_6}; \quad (2.7)$$

$$Z_{*б} = \frac{Z}{Z_б}, \quad (2.8)$$

где звездочка указывает, что величина выбрана в относительных единицах, а индекс «б» – что она приведена к базисным условиям.

Используя выражение (2.3), определение относительного сопротивления по (2.8) можно представить в ином виде:

$$Z_{*б} = \frac{Z}{Z_б} = \frac{Z\sqrt{3}I_б}{U_б} \quad (2.9)$$

или

$$Z_{*б} = Z \frac{S_б}{U_б^2}, \quad (2.10)$$

где Z – заданное сопротивление в Омах на фазу;

$I_б$ – базисный ток, кА;

$U_б$ – базисное линейное напряжение, кВ;

$S_б$ – базисная мощность, МВА.

Поскольку выбор базисных условий произволен, то одна и та же действительная величина может иметь различные значения в относительных единицах.

Обычно относительные значения параметров элементов энергосистемы (генераторов, трансформаторов, реакторов) задаются в справочниках при номинальных условиях (то есть при U_n, I_n, S_n). Их величины определяются по выражениям (2.4)–(2.10), где базисные единицы должны быть заменены соответствующими номинальными, то есть:

$$E_{*н} = \frac{E}{U_n};$$

$$U_{*н} = \frac{U}{U_n};$$

$$I_{*н} = \frac{I}{I_n};$$

$$S_{*н} = \frac{S}{S_n};$$

$$Z_{*н} = \frac{Z}{Z_n};$$

$$Z_{*н} = \frac{Z\sqrt{3}I_n}{U_n};$$

$$Z_{*н} = \frac{ZS_n}{U_n^2}.$$

Для выполнения расчета в относительных единицах необходимо все ЭДС источников питания и сопротивления элементов схемы выразить в относительных единицах при выбранных базисных условиях.

Если они заданы в именованных единицах, то необходимо воспользоваться выражениями (2.4), (2.9) или (2.10), а если они заданы в относительных единицах при номинальных условиях, то их следует пересчитать по следующим выражениям:

$$E_{*б} = E_{*н} \frac{U_n}{U_б}; \quad (2.11)$$

$$Z_{*б} = Z_{*н} \frac{I_б U_n}{I_n U_б} \quad (2.12)$$

или

$$Z_{*б} = Z_{*н} \frac{S_б U_n^2}{S_n U_б^2}. \quad (2.13)$$

При выборе базисных условий следует руководствоваться соображениями упрощения вычислительного процесса, а также наглядностью полученных результатов.

За базисную мощность удобно брать целое число, кратное десяти (1000, 100 МВА), или часто повторяющуюся в схеме номинальную мощность (или кратную ей).

За базисное напряжение рекомендуется принимать U_n или близкое к нему.

$$\text{При } U_б = U_n, E_{*б} = E_{*н}, \text{ а } Z_{*б} = Z_{*н} \frac{S_б}{S_n}.$$

2.3. Составление схемы замещения

Схема замещения электроэнергетической системы составляется на основе ее расчетной схемы для определенной стадии переходного процесса.

Для упрощения расчетов такую схему следует представить в виде эквивалентной электрической схемы замещения.

Из электротехники известно, что составление такой схемы замещения сводится к приведению параметров элементов и ЭДС источников различных

ступеней напряжений схемы к одной ступени, выбранной за основную (базисную).

Электрическая система представляет собой совокупность частей, состоящих из генераторов, линий электропередач, связанных между собой трансформаторами, то есть отдельные элементы системы связаны между собой не электрически, а магнитно (рис. 2.1).

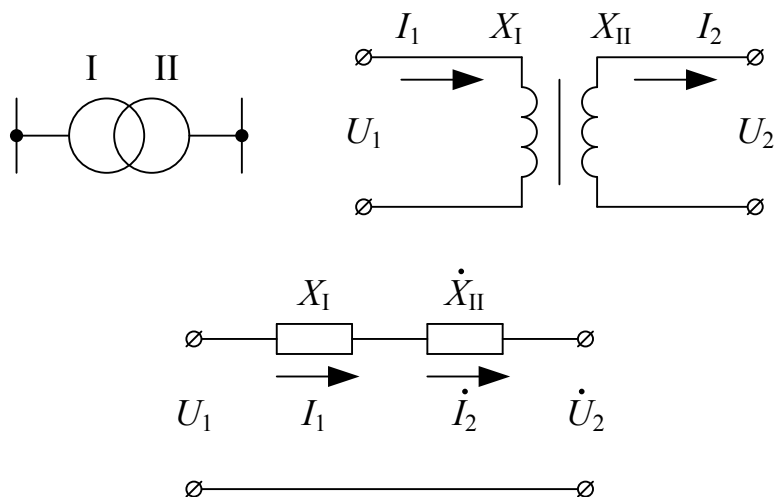


Рис. 2.1

Приведение к одной ступени напряжения осуществляется на основе соотношений, которые вытекают из известной теории трансформатора:

$$\dot{U}_2 = U_2 K_T; \quad \dot{I}_2 = \frac{I_2}{K_T}, \quad \dot{X}_{II} = X_{II} K_T^2. \quad (2.14)$$

Под коэффициентом трансформации K_T понимают отношение линейного напряжения стороны, к которой приводятся параметры, к линейному напряжению стороны, параметры которой приводятся:

$$K_T = \frac{U_1}{U_2}.$$

Существует два способа приведения параметров элементов схем к одной ступени напряжения: точный и приближенный. Рассмотрим каждый из них.

1. Точное приведение параметров в многократно связанной магнитной системе (рис. 2.2).

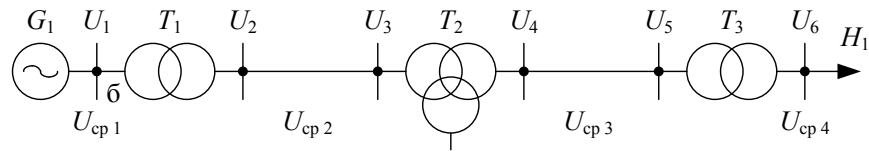


Рис. 2.2

За базисную ступень примем первую ступень $U_1 = U_6$.

Запишем, как определяются параметры нагрузки, подключенной на конкретной ступени при точном приведении их к основной (базисной) ступени.

$$\overset{\circ}{E} = EK_{T3}K_{T2}K_{T1} = E \frac{U_5}{U_6} \frac{U_3}{U_4} \frac{U_1}{U_2}; \quad (2.15)$$

$$\overset{\circ}{U} = UK_{T3}K_{T2}K_{T1} = U \frac{U_5}{U_6} \frac{U_3}{U_4} \frac{U_1}{U_2}; \quad (2.16)$$

$$\overset{\circ}{I} = \frac{I}{K_{T3}K_{T2}K_{T1}}; \quad (2.17)$$

$$\overset{\circ}{X} = XK_{T3}^2 K_{T2}^2 K_{T1}^2 = X \left(\frac{U_5}{U_6} \frac{U_3}{U_4} \frac{U_1}{U_2} \right)^2. \quad (2.18)$$

Для того чтобы выразить эти величины в относительных единицах при выбранных базисных условиях, воспользуемся выражениями (2.4), (2.5), (2.10), (2.13):

$$\overset{\circ}{E}_{*6} = \frac{\overset{\circ}{E}}{U_6} = \frac{EK_{T3}K_{T2}K_{T1}}{U_6} = \frac{E}{\overset{\circ}{U}_6}, \quad (2.19)$$

где $\overset{\circ}{U}_6 = \frac{U_6}{K_{T3}K_{T2}K_{T1}}$ – приведенное базисное напряжение,

$$\overset{\circ}{U}_{*6} = \frac{\overset{\circ}{U}}{U_6} = \frac{UK_{T3}K_{T2}K_{T1}}{U_6} = \frac{U}{\overset{\circ}{U}_6}, \quad (2.20)$$

◦ – символ означает, что данная величина является приведенной.

$$\overset{\circ}{I}_{*6} = \frac{\overset{\circ}{I}}{I_6} = \frac{I}{I_6 K_{T3}K_{T2}K_{T1}} = \frac{I}{\overset{\circ}{I}_6}, \quad (2.21)$$

где $\overset{\circ}{I}_6 = I_6(K_{T3}K_{T2}K_{T1})$ – приведенный базисный ток.

$$\overset{\circ}{X}_{*6} = \frac{\overset{\circ}{X}}{X_6} = \frac{\overset{\circ}{X} S_6}{U_6^2} = X(K_{T3}K_{T2}K_{T1})^2 \frac{S_6}{U_6^2} = X \frac{S_6}{U_6^2}; \quad (2.22)$$

$$\begin{aligned} \overset{\circ}{X}_{*6} &= \overset{\circ}{X}_{*н} \frac{S_6}{S_н} \frac{U_н^2}{U_6^2} = X_{*н} (K_{T3}K_{T2}K_{T1})^2 \frac{S_6}{S_н} \frac{U_н^2}{U_6^2} = \\ &= X_{*н} \frac{S_6}{S_н} \frac{U_н^2}{U_6^2}. \end{aligned} \quad (2.23)$$

Из приведенных выражений следует, что истинные величины должны быть пересчитаны столько раз, сколько имеется трансформаторов на пути между приводимой ступенью и принятой за основную.

2. Приближенное приведение.

В практических расчетах применяют приближенное приведение, позволяющее значительно проще и быстрее получить приближенную схему замещения. Сущность такого приведения в следующем.

Для каждой ступени напряжения устанавливают среднее номинальное напряжение $U_{cp} = U_н + 5\%U_н$, а именно 515; 340; 230; 115; 37; 24; 20; 18; 15,75; 13,8; 10,5; 6,3; 3,15 кВ, и при этом условно считают, что номинальные напряжения всех элементов, находящихся на одной ступени, одинаковы и равны соответствующим значениям по указанной шкале.

В этом случае:

$$\begin{aligned} \overset{\circ}{E} &= EK_{T3}K_{T2}K_{T1} = E \frac{U_{cp3}}{U_{cp4}} \frac{U_{cp2}}{U_{cp3}} \frac{U_{cp1}}{U_{cp2}} = \\ &= E \frac{U_{cp1}}{U_{cp4}} = E \frac{U_{cp16}}{U_{cp4н}}; \end{aligned} \quad (2.24)$$

$$\overset{\circ}{U} = U \frac{U_{cp16}}{U_{cp4н}}; \quad \overset{\circ}{I} = I \frac{U_{cp4}}{U_{cp1}} = I \frac{U_{cp4н}}{U_{cp16}}; \quad (2.25)$$

$$\overset{\circ}{X} = X \frac{U_{cp1}^2}{U_{cp4}^2} = X \frac{U_{cp16}^2}{U_{cp4н}^2}; \quad \overset{\circ}{X}_{*н} = X_{*н} \frac{U_{cp16}^2}{U_{cp4н}^2}. \quad (2.26)$$

Или в относительных единицах, приведенных к базисным условиям:

$$E_{*6} = \frac{\overset{\circ}{E}}{U_{cp16}} = E \frac{U_{cp16}}{U_{cp4н} U_{cp16}} = \frac{E}{U_{cp4н}} = E_{*н}, \quad (2.27)$$

то есть $E_{*6} = E_{*н}$;

$$U_{*6} = \frac{\overset{\circ}{U}}{U_{cp16}} = U \frac{U_{cp16}}{U_{cp4н} U_{cp16}} = \frac{U}{U_{cp4н}} = U_{*н}; \quad (2.28)$$

$$X_{*6} = \frac{\overset{\circ}{X}}{X_6} = \overset{\circ}{X} \frac{S_6}{U_{cp16}^2} = X \frac{U_{cp16}^2 S_6}{U_{cp4н}^2 U_{cp16}^2} = X \frac{S_6}{U_{cp4н}^2}; \quad (2.29)$$

$$X_{*6} = X \frac{S_6}{U_{cp}^2};$$

$$X_{*6} = \overset{\circ}{X}_{*н} \frac{S_6}{S_н} \frac{U_н^2}{U_6^2} = X_{*н} \frac{U_{cp16}^2 S_6 U_{cp4н}^2}{U_{cp4н}^2 S_н U_{cp16}^2} = X_{*н} \frac{S_6}{S_н}; \quad (2.30)$$

$$X_{*6} = X_{*н} \frac{S_6}{S_н}.$$

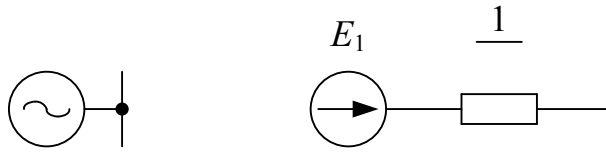
В практических расчетах чаще всего пользуются приближенным способом приведения параметров. Поэтому для представления элементов схемы замещения в относительных единицах задаются базисной мощностью S_6 , в качестве U_6 принимают U_{cp} на каждой ступени и рассчитывают $I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_{cp}}$ для всех ступеней.

Каждый элемент расчетной схемы замещается эквивалентным индуктивным сопротивлением, приведенным к базисным условиям и выраженным в относительных единицах, а для генераторов и нагрузок определяется, кроме этого, и ЭДС.

Электрическая схема замещения (далее схема замещения) расчетной схемы представляет собой однолинейную схему, в которой все элементы исходной схемы представлены своими сопротивлениями, приведенными к базисным условиям, а генераторы и нагрузки также и ЭДС.

Сопротивления на схеме обозначаются дробью, в числителе которой указывается порядковый номер сопротивления, а в знаменателе – его численное значение при принятых базисных условиях. Значения ЭДС активных элементов также наносят на схему с присвоением им порядковых номеров.

1. Генератор



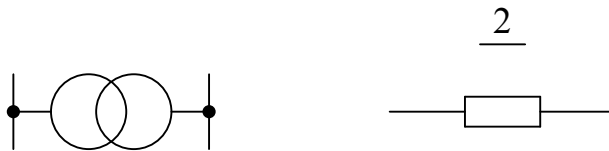
$$E_1 = E_*, \quad X_1 = X_{*г} = X_{*н} \frac{S_{г}}{S_{нТ}}. \quad (2.31)$$

Величина E_* зависит от стадии переходного процесса.

$X_{*н}$ – величина сопротивления генератора в относительных единицах при номинальных параметрах, которым он характеризуется в зависимости от стадии переходного процесса.

$S_{нТ}$ – номинальная мощность генератора, МВА.

2. Двухобмоточный трансформатор

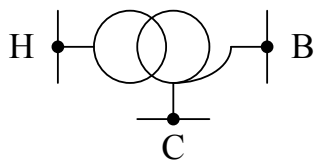
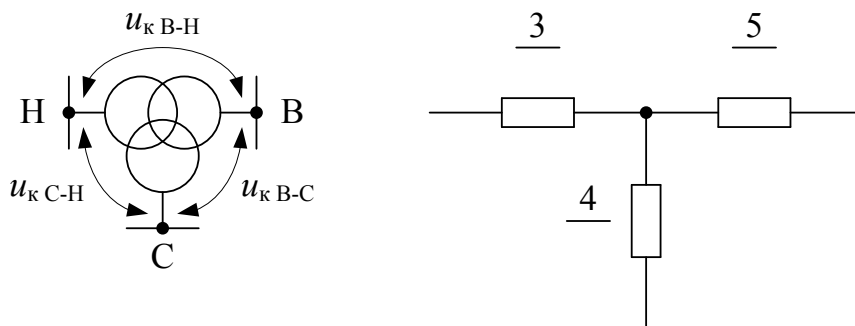


$$X_2 = X_{*г} = \frac{u_{к\%}}{100} \frac{S_{г}}{S_{нТ}}, \quad (2.32)$$

где $u_{к\%}$ – напряжение короткого замыкания, %;

$S_{нТ}$ – полная номинальная мощность трансформатора, МВА.

3. Трехобмоточный трансформатор, автотрансформатор



$$X_3 = X_{*нб} = \frac{u_{кн\%}}{100} \frac{S_{г}}{S_{н}},$$

$$X_4 = X_{*c\bar{6}} = \frac{u_{кC} \% S_{\bar{6}}}{100 S_H},$$

$$X_5 = X_{*b\bar{6}} = \frac{u_{кB} \% S_{\bar{6}}}{100 S_H},$$

т. е.

$$X_i = X_{*i\bar{6}} = \frac{u_{ki} \% S_{\bar{6}}}{100 S_H}, \quad (2.33)$$

где

$$i = H, C, B,$$

$$u_{кB} \% = 0,5(u_{кB-H} \% + u_{кB-C} \% - u_{кC-H} \%);$$

$$u_{кC} \% = 0,5(u_{кB-C} \% + u_{кC-H} \% - u_{кB-H} \%);$$

$$u_{кH} \% = 0,5(u_{кB-H} \% + u_{кC-H} \% - u_{кB-C} \%).$$

Для обмотки низшего напряжения автотрансформаторов вместо S_H подставляется значение S_{HH} – номинальная мощность нижней обмотки.

4. Реактор



В зависимости от способа задания типа реактора сопротивление реактора, приведенное к базисным условиям, определяется:

а) $X_p \%$, I_H , U_H :

$$X_6 = X_{*p\bar{6}} = \frac{X_p \% I_{\bar{6}} U_H}{100 I_H U_{cp}}; \quad (2.34)$$

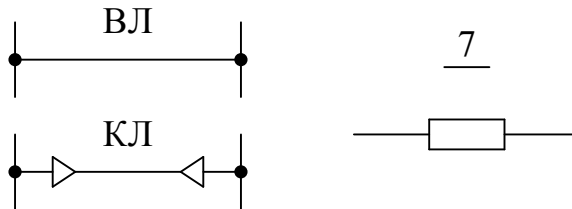
б) X_p , Ом:

$$X_6 = X_{*рб} = X_p \frac{S_6}{U_{cp}^2}, \quad (2.35)$$

где I_6 – базисный ток ступени, на которой включен реактор;

U_{cp} – среднее номинальное напряжение той ступени, на которой включен реактор.

5. Линии электропередач

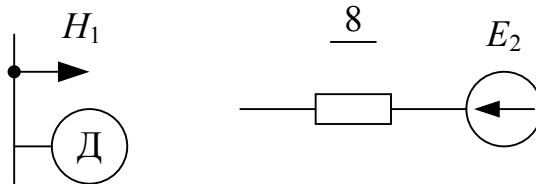


$$X_7 = X_{*лб} = X_0 l \frac{S_6}{U_6^2} = X_0 l \frac{S_6}{U_{cp}^2}, \quad (2.36)$$

где X_0 – удельное индуктивное сопротивление линии электропередач;

l – длина линии, км.

6. Нагрузка



$$X_8 = X_{*нб} = X_{*н} \frac{S_6}{S_{нн}}, \quad E_{*н} = E_2, \quad (2.37)$$

где $E_{*н}$, $X_{*н}$ – ЭДС и сопротивление нагрузки, выраженные в относительных единицах при номинальных данных, зависящие от стадии переходного процесса;

$S_{нн}$ – номинальная мощность нагрузки, МВА.

Пример составления схемы замещения

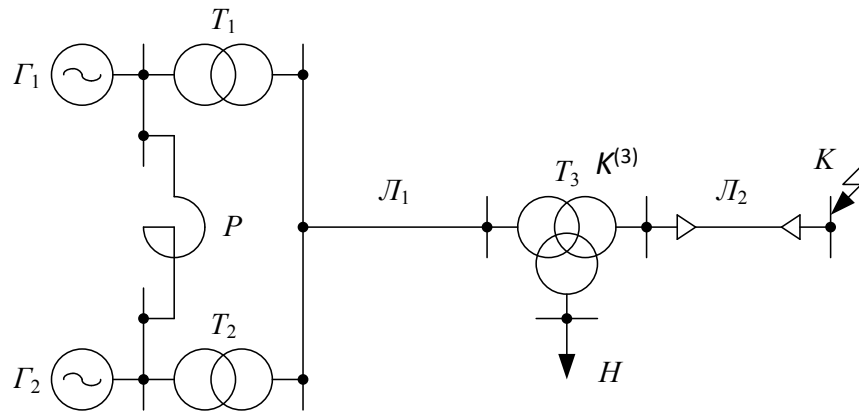


Рис. 2.3. Расчетная схема сети

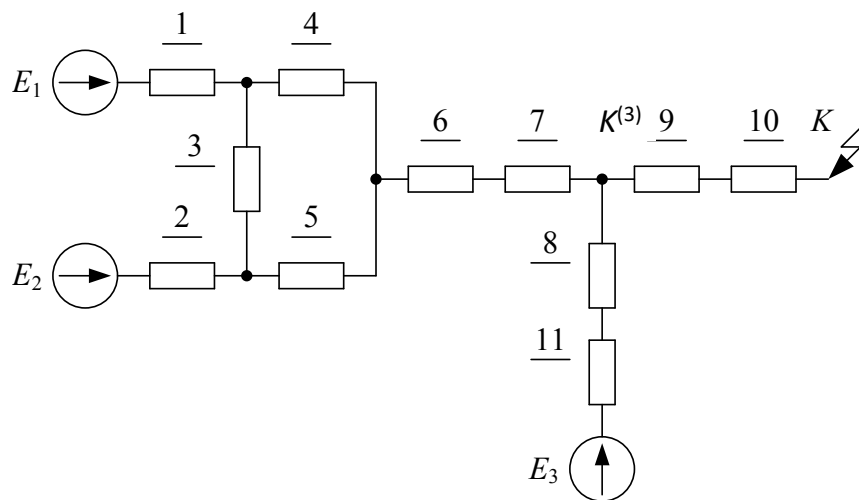


Рис. 2.4. Схема замещения

Задавшись базисными условиями S_6 , $U_6 = U_{cp}$, по приведенным выше формулам определяют сопротивления и ЭДС схемы замещения. Затем исходную схему преобразовывают к виду, изображенному на рис. 2.5.

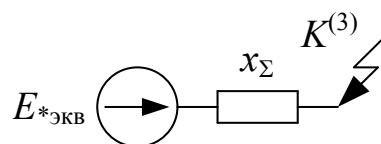


Рис. 2.5

На рис. 2.5 $E_{*_{\text{ЭКВ}}}$ – эквивалентная (суммарная) ЭДС схемы, а x_{Σ} – суммарное сопротивление схемы.

2.4. Методы преобразования схем замещения

В процессе преобразования схем замещения к простейшему виду используют следующие методы:

1. Последовательное сложение сопротивлений.
2. Параллельное сложение сопротивлений.
3. Преобразование треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду и наоборот:

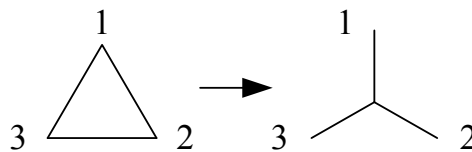


Рис. 2.6

$$X_1 = \frac{X_{12}X_{13}}{X_{12} + X_{13} + X_{23}};$$

$$X_2 = \frac{X_{12}X_{23}}{X_{12} + X_{13} + X_{23}}; \quad (2.38)$$

$$X_3 = \frac{X_{13}X_{23}}{X_{12} + X_{13} + X_{23}}.$$

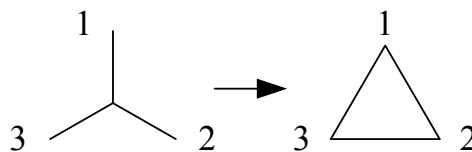


Рис. 2.7

$$X_{12} = X_1 + X_2 + \frac{X_1X_2}{X_3};$$

$$X_{13} = X_1 + X_3 + \frac{X_1X_3}{X_2}; \quad (2.39)$$

$$X_{23} = X_2 + X_3 + \frac{X_2X_3}{X_1}.$$

4. Метод эквивалентных ЭДС.

Данным методом пользуются в тех случаях, когда свободные токи в ветвях затухли или же когда постоянные времени затухания свободных токов в каждой ветви одинаковы.

При преобразовании схемы на рис. 2.8, а в схему на рис. 2.8, б исходят из того, что напряжение в точке А в обоих случаях одинаково, соответственно одинаков ток I в общем сопротивлении. На основании первого закона Кирхгофа для узла А можно записать:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n.$$

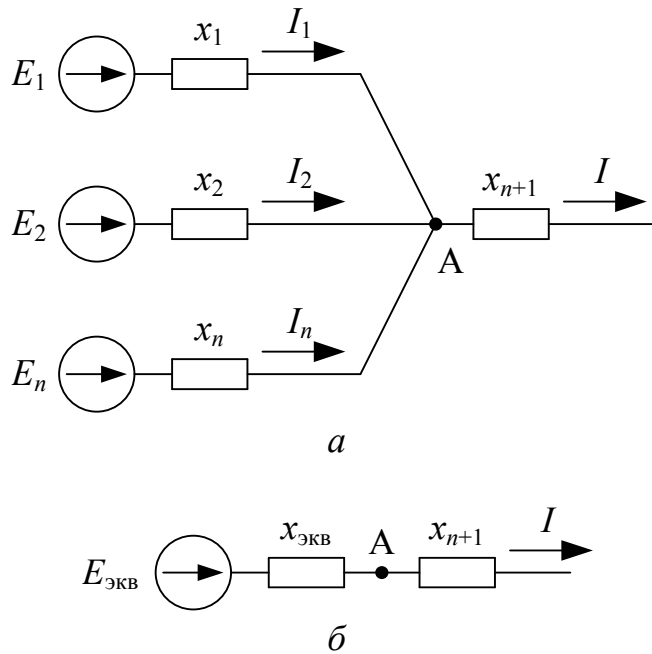


Рис. 2.8

Эти токи можно представить как:

$$I = \frac{E_{\text{ЭКВ}} - U_a}{X_{\text{ЭКВ}}}, \quad I_1 = \frac{E_1 - U_a}{X_1}, \quad I_2 = \frac{E_2 - U_a}{X_2}, \quad I_n = \frac{E_n - U_a}{X_n},$$

тогда

$$\frac{E_{\text{ЭКВ}} - U_a}{X_{\text{ЭКВ}}} = \frac{E_1 - U_a}{X_1} + \frac{E_2 - U_a}{X_2} + \dots + \frac{E_n - U_a}{X_n}.$$

Заменим сопротивления на соответствующие проводимости:

$$E_{\text{ЭКВ}} y_{\text{ЭКВ}} - U_a y_{\text{ЭКВ}} = E_1 y_1 + E_2 y_2 + \dots + E_n y_n - U_a (y_1 + y_2 + \dots + y_n),$$

где

$$y_{\text{ЭКВ}} = y_1 + y_2 + \dots + y_n, \quad E_{\text{ЭКВ}} = \frac{E_1 y_1 + E_2 y_2 + \dots + E_n y_n}{y_1 + y_2 + \dots + y_n}.$$

Из последнего уравнения получим:

$$E_{\text{ЭКВ}} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i y_i}{\sum_{i=1}^n y_i}, \quad (2.40)$$

$$x_{\text{ЭКВ}} = \frac{1}{y_{\text{ЭКВ}}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n y_i}. \quad (2.41)$$

Чаще всего приходится заменять два луча одним эквивалентным (рис. 2.9).

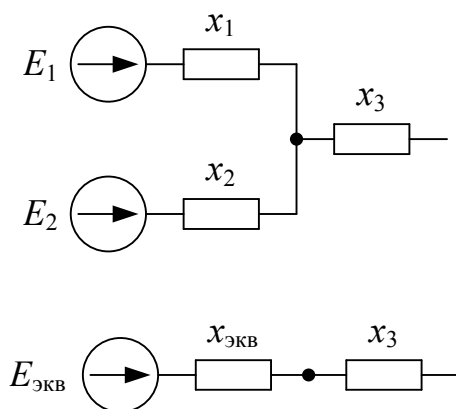


Рис. 2.9

В этом случае

$$E_{\text{ЭКВ}} = \frac{E_1 x_2 + E_2 x_1}{x_1 + x_2}, \quad x_{\text{ЭКВ}} = \frac{x_1 x_2}{x_1 + x_2}. \quad (2.42)$$

5. Метод рассечения узла.

Если генерирующий источник с ЭДС E находится в узле схемы, то при необходимости можно разрезать схему в вершине, где приложена ЭДС, сохранив эту ЭДС на свободных концах ветвей. Величина ЭДС после рассечения остается неизменной (рис. 2.10).

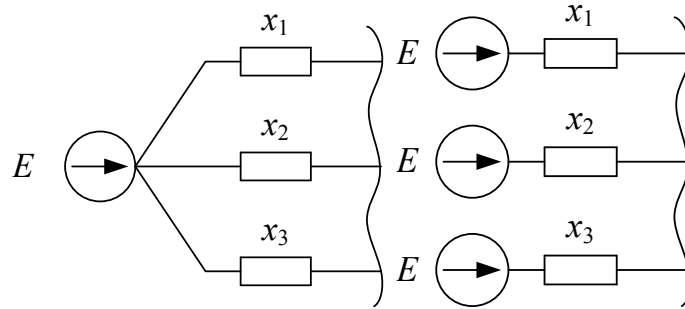


Рис. 2.10

Если точка КЗ находится в узле схемы, то можно разрезать этот узел, при этом на одном из лучей оставляют точку КЗ, а другие лучи рассматривают как нагрузочные с ЭДС, равной нулю (рис. 2.11). При этом определяется ток в той ветви, на которой оставлена точка КЗ. Перемещая точку КЗ по ветвям, находят токи КЗ во всех ветвях, затем, применяя метод наложения, суммируют их и находят ток КЗ в точке К.

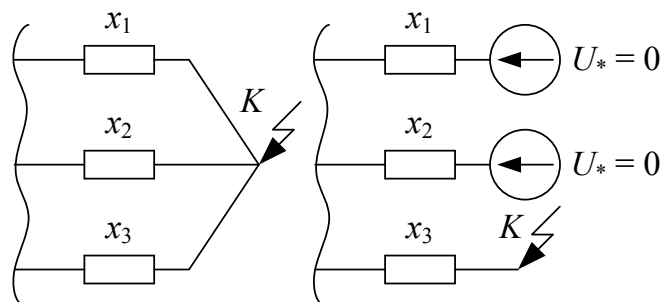


Рис. 2.11

6. Метод наложения (суперпозиции).

Используя этот метод, можно получить действительный режим как результат наложения ряда условных режимов в предположении, что в схеме приложена только одна ЭДС, в то время как все остальные ЭДС равны нулю.

Определяют I_1 при условии наличия E_1 , а остальные ЭДС $E=0$, затем определяют I_2 при условии наличия E_2 , а остальные ЭДС $E=0$ и т. д.

Ток КЗ в точке К будет:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n.$$

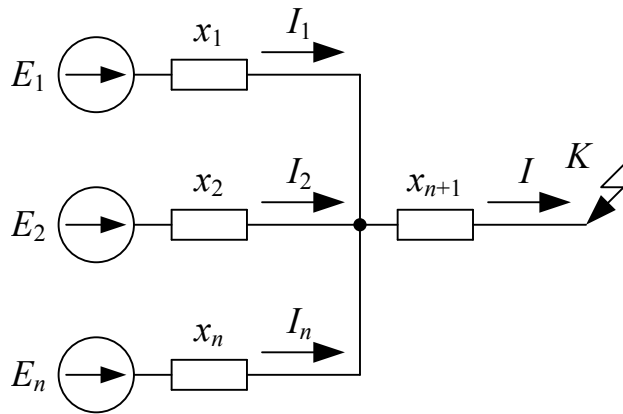


Рис. 2.12

Расчет с применением этого метода получается громоздким.

7. Метод коэффициентов токораспределения.

В процессе решения практических задач возникает необходимость учесть индивидуальные свойства источников питания, а также их разноудаленность на величину тока КЗ. Для этого удобно использовать следующий прием.

Предположим, имеется следующая схема (рис. 2.13).

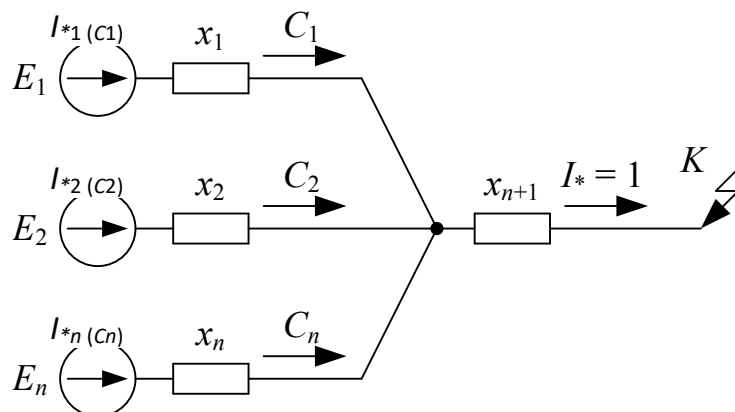


Рис. 2.13

Приняв условно ток в месте КЗ за единицу $I_* = 1$, определяют доли для отдельных источников C_1, C_2, \dots, C_n от общего тока, называемые коэффициентами распределения.

Токи в ветвях пропорциональны проводимостям y , поэтому можно записать, что

$$\frac{C_1}{y_1} = \frac{1}{y_{\text{ЭКВ}}}, \quad \frac{C_2}{y_2} = \frac{1}{y_{\text{ЭКВ}}}, \quad \frac{C_n}{y_n} = \frac{1}{y_{\text{ЭКВ}}}. \quad (2.43)$$

Соответственно

$$C_1 = \frac{y_1}{y_{\text{ЭКВ}}} = \frac{x_{\text{ЭКВ}}}{x_1}, \quad C_2 = \frac{y_2}{y_{\text{ЭКВ}}} = \frac{x_{\text{ЭКВ}}}{x_2}, \quad C_n = \frac{y_n}{y_{\text{ЭКВ}}} = \frac{x_{\text{ЭКВ}}}{x_n}, \quad (2.44)$$

Где $y_{\text{ЭКВ}} = y_1 + y_2 + \dots + y_n$

или

$$x_{\text{ЭКВ}} = \frac{1}{y_{\text{ЭКВ}}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n y_i}, \quad (2.45)$$

при этом условие проверки коэффициентов токораспределения:

$$C_1 + C_2 + \dots + C_n = 1.$$

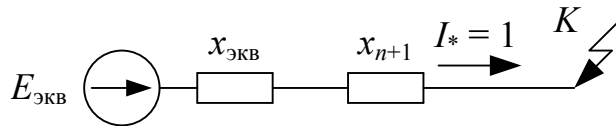


Рис. 2.14

Далее определяют $x_{\Sigma} = x_{\text{ЭКВ}} + x_{n+1}$ и затем распределяют его по отдельным лучам (рис. 2.15) по выражениям

$$x'_1 = \frac{x_{\Sigma}}{C_1}, \quad x'_2 = \frac{x_{\Sigma}}{C_2}, \quad \dots, \quad x'_n = \frac{x_{\Sigma}}{C_n}. \quad (2.46)$$

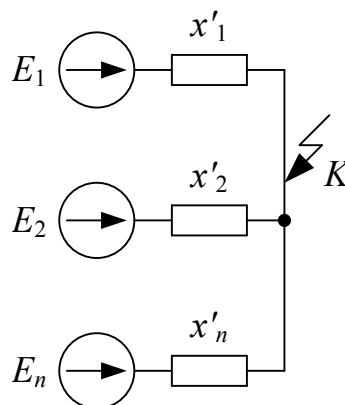


Рис. 2.15

Если этот метод приходится применять в схеме с двумя лучами, то имеют место следующие соотношения:

$$C_1 = \frac{x_2}{x_1 + x_2}, \quad C_2 = \frac{x_1}{x_1 + x_2},$$

$$x_{\text{ЭКВ}} = \frac{x_1 x_2}{x_1 + x_2}, \quad x_{\Sigma} = x_{\text{ЭКВ}} + x_3,$$

$$x'_1 = \frac{x_{\Sigma}}{C_1}, \quad x'_2 = \frac{x_{\Sigma}}{C_2}.$$

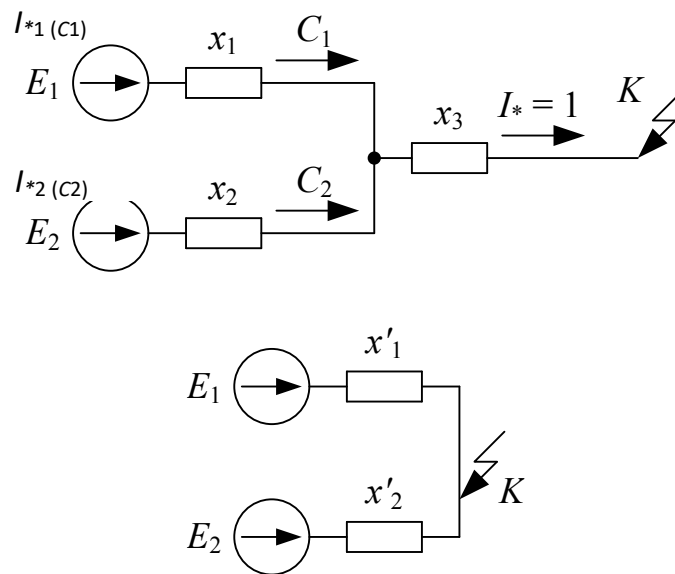


Рис. 2.16

8. В тех случаях, когда в схеме имеет место ось симметрии по отношению к точке КЗ, можно наложить одну часть схемы на вторую относительно этой оси (рис. 2.17).

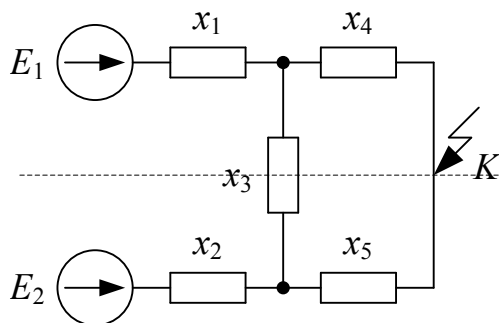
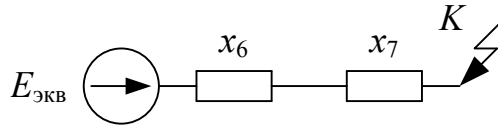


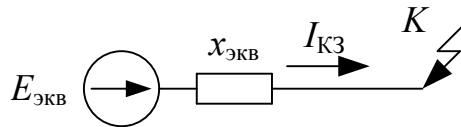
Рис. 2.17

$$\begin{cases} E_1 = E_2; \\ x_4 = x_5, \quad x_1 = x_2; \\ x_7 = \frac{x_4}{2}, \quad x_6 = \frac{x_1}{2}, \quad E_{\text{экв}} = E_1 = E_2. \end{cases}$$



9. Распределение токов КЗ в отдельных ветвях.

При расчете тока КЗ в точке K приходится также определять токи в отдельных ветвях. В этом случае идут в обратном направлении от результирующих сопротивлений к промежуточным, которые получились при преобразовании схемы (рис. 2.18).



$$I_{\text{КЗ}} = I_{\text{КЗ}2} + I_{\text{КЗ}3};$$

$$\frac{I_{\text{КЗ}2}}{I_{\text{КЗ}3}} = \frac{x_3}{x_2} = \frac{I_{\text{КЗ}} - I_{\text{КЗ}3}}{I_{\text{КЗ}3}}.$$

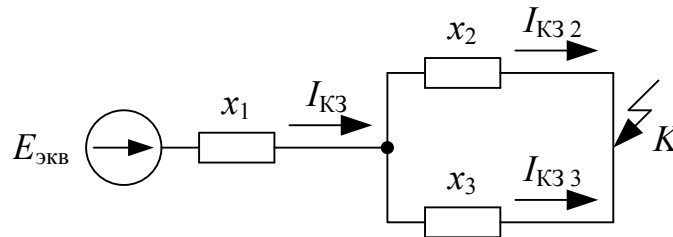


Рис. 2.18

Отсюда

$$I_{\text{КЗ}3} = I_{\text{КЗ}} \frac{x_2}{x_2 + x_3}; \quad I_{\text{КЗ}2} = I_{\text{КЗ}} \frac{x_3}{x_2 + x_3}. \quad (2.47)$$

3. Установившийся режим трехфазного короткого замыкания

Под установившимся режимом понимают ту стадию переходного процесса, когда все свободные токи, возникшие в начальный момент, затухли и полностью закончен подъем тока возбуждения АРВ. Практически такая стадия ПП наступает через 3–5 с после начала КЗ.

Такое определение установившегося режима соответствует упрощенному представлению о протекании процесса КЗ, которое в достаточной степени соответствует лишь для одного генератора.

В сложных схемах такой режим маловероятен, то есть переходный процесс носит более сложный характер в связи с тем, что возникают качания, которые часто приводят к выпадению генераторов из синхронизма.

Тем не менее рассмотрение этого режима обусловлено практической необходимостью выяснения пределов изменения отдельных величин.

Если генераторы не снабжены АРВ, то установившийся ток в месте КЗ является наименьшим током при данном аварийном режиме (рис. 3.1). При наличии АРВ на генераторах возможны условия, при которых установившийся ток КЗ превышает токи в предыдущие моменты процесса КЗ и даже начальный ток КЗ (рис. 3.2).

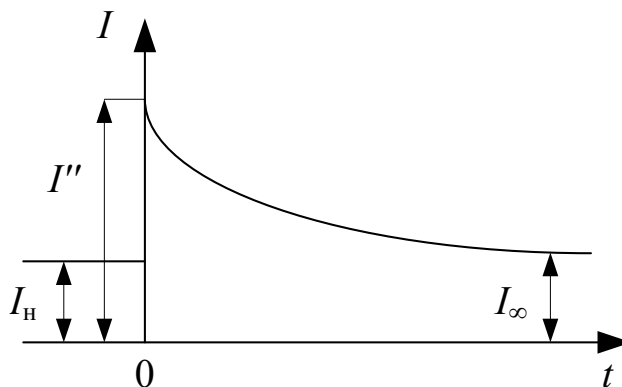


Рис. 3.1. Генератор без АРВ:

I'' – начальный ток КЗ; I_∞ – установившийся ток КЗ

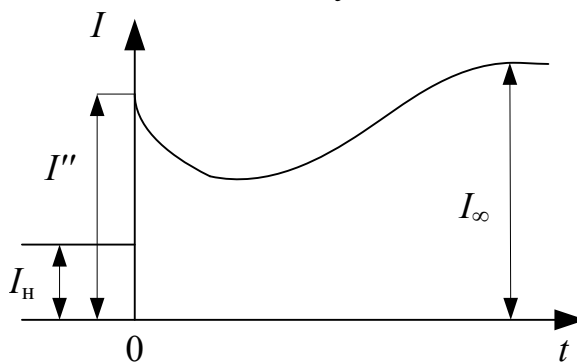


Рис. 3.2. Генератор с АРВ

3.1. Основные характеристики синхронной машины в установившемся режиме трехфазного короткого замыкания

Основными характеристиками и параметрами синхронной машины (СМ), определяющими ее поведение при симметричном установившемся режиме, являются:

1. Характеристика холостого хода (ХХ) СМ

$$E_{*\infty} = f(I_{*В}),$$

где $E_{*\infty}$ – ЭДС СМ в установившемся режиме КЗ в относительных единицах;

$I_{*В}$ – ток возбуждения СМ в относительных единицах.

2. Характеристика КЗ (ХКЗ) СМ

$$I_{*\infty}^{(3)} = \varphi(I_{*В}),$$

где $I_{*\infty}^{(3)}$ – установившийся ток трехфазного КЗ на выводах СМ в относительных единицах.

3. Синхронная ненасыщенная реактивность по продольной оси статора СМ x_d и сопротивление рассеяния обмотки статора x_s .

4. Предельное значение тока возбуждения $I_{*В\text{ пр}}$.

Теперь более подробно о каждой характеристике и каждом параметре.

Характеристика ХХ

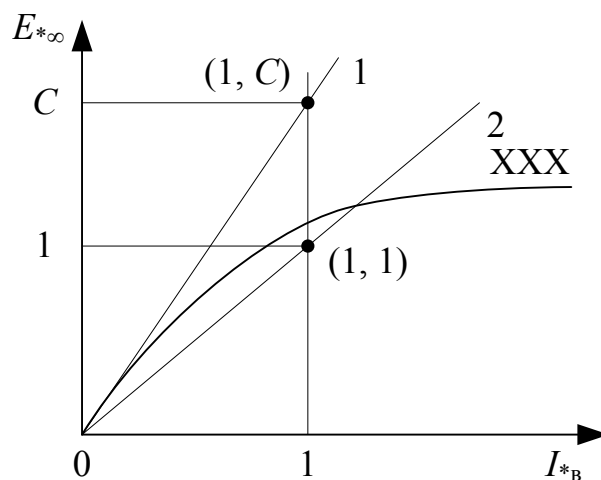


Рис. 3.3. Характеристика ХХ

Считая магнитную систему СМ ненасыщенной, принимают (используют) два способа спрямления ХХХ:

а) первый – по касательной к ХХХ, проходящей через начало координат. В этом случае

$$E_{*\infty} = CI_{*B},$$

где C – коэффициент пропорциональности, численно равный относительной ЭДС ненасыщенного генератора при $I_{*B} = 1$.

Для ТГ $C=1,2$, а для ГГ $C=1,06$.

За $I_{*B} = 1$ принимают такое значение тока возбуждения, при котором на холостом ходу напряжение на выходах генератора (СМ) равно номинальному.

б) второй – по прямой, проходящей через начало координат и точку с координатами (1,1). В этом случае

$$E_{*\infty} = I_{*B}.$$

Итак, для определения ЭДС СМ в установившемся режиме пользуются тем или иным спрямлением ХХХ.

Характеристика КЗ

Иногда вместо ненасыщенной реактивности по продольной оси x_d может быть задано отношение короткого замыкания K_C , которое представляет собой относительный установившийся ток при трехфазном КЗ на выводах СМ и относительном токе возбуждения, равном единице, $I_{*B} = 1$.

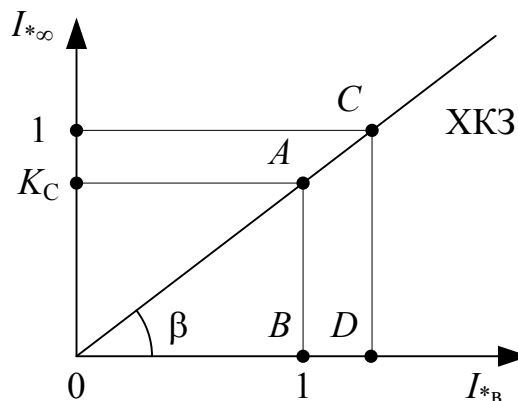


Рис. 3.4. Характеристика КЗ

$$K_C = AB = \frac{AB}{OB} = \operatorname{tg}\beta = I_{*\infty}^{(3)} = \frac{I_{\infty}^{(3)}}{I_H(I_{*B}=1)};$$

$$I_{*B} = OD = \frac{CD}{\operatorname{tg}\beta} = \frac{1}{K_C};$$

$$CD = I_{*\infty}^{(3)} = OD \operatorname{tg}\beta = I_{*B} K_C.$$

Итак,

$$I_{*B} = \frac{1}{K_C}, \quad I_{*\infty}^{(3)} = I_{*B} K_C. \quad (3.1)$$

Рассмотрим случай КЗ на выводах СМ (рис. 3.5).

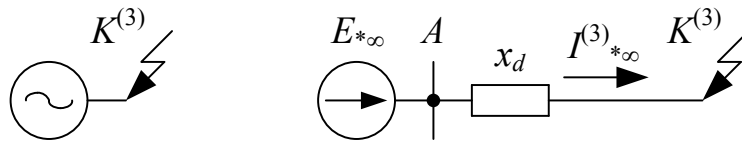


Рис. 3.5

$$E_{*\infty} = U_* + I_{*\infty}^{(3)} x_d.$$

Так как U_* в месте КЗ равно нулю, $U_* = 0$, то

$$x_d = \frac{E_{*\infty}}{I_{*\infty}^{(3)}}.$$

При спрямлении ХХХ по касательной (прямая 1)

$$x_d = \frac{E_{*\infty}}{I_{*\infty}^{(3)}} = \frac{C I_{*B}}{I_{*B} K_C} = \frac{C}{K_C}; \quad (3.2)$$

$$x_d = \frac{C}{K_C}.$$

При спрямлении через точку (1.1) (прямая 2)

$$x_d = \frac{E_{*\infty}}{I_{*\infty}^{(3)}} = \frac{I_{*B}}{I_{*B} K_C} = \frac{1}{K_C}; \quad (3.3)$$

$$x_d = \frac{1}{K_C}.$$

То есть x_d может быть определено через K_C . Среднее значение $K_C = 0,7$ – для ТГ, $K_C = 1,1$ – для ГГ.

С другой стороны, синхронная ненасыщенная реактивность по продольной оси может быть определена как:

$$x_d = x_s + x_{ad},$$

то есть сопротивление СМ в установившемся режиме равно сумме сопротивлений рассеяния обмотки статора СМ x_s и сопротивления, обусловленного реакцией статора на поток ротора по продольной оси x_{ad} .

x_s – сопротивление рассеяния обмотки статора, которое зависит от конструкции машины и для типовых ТГ $x_s = 0,1-0,15$, а для ГГ – $x_s = 0,15-0,25$.

При КЗ снижается напряжение, в том числе и на выводах генератора. АРВ поднимают ток возбуждения, тем самым стремясь обеспечить номинальное напряжение на выводах. Вместе с тем существует предел, до которого можно поднимать ток возбуждения.

У ТГ $I_{*в пр} = 4$, а у ГГ $I_{*в пр} = 3$.

3.2. Аналитический расчет установившегося режима короткого замыкания

Возможны два случая рассмотрения данной стадии переходного процесса.

Генератор без АРВ

Когда в схеме присутствуют генераторы без АРВ, составляется эквивалентная схема замещения, в которой каждый из генераторов вводится величиной сопротивления x_d и ЭДС $E_{*\infty}$, определенными в зависимости от принятого спрямления ХХХ.

Если пользоваться спрямлением через точку с координатами (1,1), то $x_d = \frac{1}{K_C}$, $E_{*\infty} = I_{*в}$, если пользоваться спрямлением ХХХ по касательной, то $x_d = \frac{C}{K_C}$; $E_{*\infty} = CI_{*в}$.

Величину x_d следует приводить к выбранным базисным условиям, то есть

$$x_{*dб} = x_d \frac{S_б}{S_{нГ}}.$$

В тех случаях, когда для генератора неизвестно, с каким током возбуждения он работал до КЗ, величину ЭДС можно определить из выражения

$$E_{*\infty} = I_{*B} = \sqrt{(U_* \cos \varphi)^2 + (U_* \sin \varphi + I_{*H} x_d)^2}, \quad (3.4)$$

которое получается из упрощенной векторной диаграммы синхронной машины (рис. 3.6), где I_{*H} , U_* , φ – ток, напряжение и угол сдвига между ними, с которыми работал генератор до КЗ. Если I_{*H} , U_* неизвестны, то считается в практических расчетах, что генератор до КЗ работал с номинальными параметрами и поэтому эти величины принимаются равными единице, то есть $I_{*H} = 1$, $U_* = 1$.

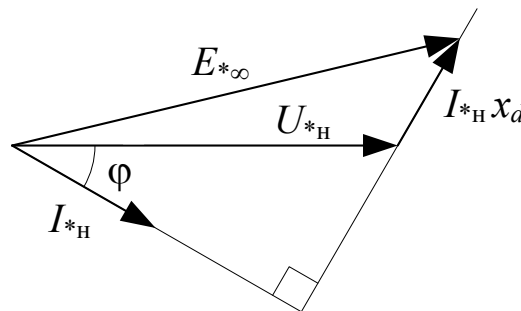


Рис. 3.6

Пассивные элементы в схеме замещения рассчитываются по известным выражениям, и далее, с помощью известных методов преобразования, схема приводится к виду (рис. 3.7).

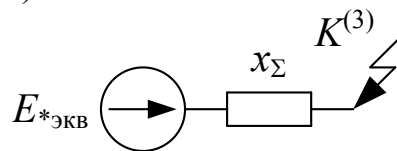


Рис. 3.7

Затем вычисляют ток КЗ в относительных единицах:

$$I_{*\infty}^{(3)} = \frac{E_{*\text{ЭКВ}}}{x_{\Sigma}}. \quad (3.5)$$

Ток в именованных единицах

$$I_{\infty}^{(3)} = I_{*\infty}^{(3)} \cdot I_6, \quad (3.6)$$

где $I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_{cpH}}$, кА;

U_{cpH} – среднее номинальное напряжение той ступени, где находится точка КЗ.

Генераторы с АРВ

Снижение напряжения при КЗ приводит в действие АРВ генератора, который увеличивает ток возбуждения, соответственно напряжение на выводах генератора, а следовательно и ток КЗ. Степень увеличения тока возбуждения зависит от удаленности точки КЗ от генератора (по величине сопротивления), а так же характеристик генератора.

При удаленном КЗ напряжение на выводах генератора может быть восстановлено до номинального даже при незначительном подъеме (увеличении) тока возбуждения.

По мере приближения места КЗ к генератору требуется все большее значение тока возбуждения, чтобы поднять напряжение до номинального, однако рост тока возбуждения ограничен предельным значением $I_{*в пр}$.

В зависимости от величины внешнего сопротивления (удаленности точки КЗ от генератора) могут иметь место различные режимы, в которых может находиться генератор. Можно установить величину внешнего сопротивления при КЗ, за которым после работы АРВ напряжение на выводах генератора будет равным номинальному, а ток возбуждения будет равен предельному значению. Величину этого сопротивления называют *критической*, режим, в котором находится генератор при КЗ за этим сопротивлением, тоже *критическим*.

Таким образом, для генератора с АРВ в зависимости от удаленности точки КЗ возможны следующие режимы, для которых характеризующие их соотношения будут:

1) критический режим

$$x_{*вн} = x_{*кр}, \quad I_{*в} = I_{*в пр}, \quad U_* = U_{*н};$$

2) режим предельного возбуждения (неудаленное КЗ).

В этом режиме АРВ поднял ток возбуждения до предельного значения, а напряжение на выводах осталось меньше номинального

$$x_{*вн} < x_{*кр}, \quad I_{*в} = I_{*в пр}, \quad U_* < U_{*н};$$

3) режим нормального напряжения (удаленное КЗ).

В этом случае имело место незначительное снижение напряжения на выводах генератора и было достаточно АРВ изменить (увеличить) ток

возбуждения незначительно, как напряжение на выводах становилось равным номинальному:

$$x_{*ВН} > x_{*кр}, \quad I_{*В} < I_{*В пр}, \quad U_* = U_{*н},$$

где $x_{*ВН}$ – внешнее сопротивление – суммарное сопротивление всей схемы замещения от точки КЗ до выводов генератора.

Например, (рис. 3.8).

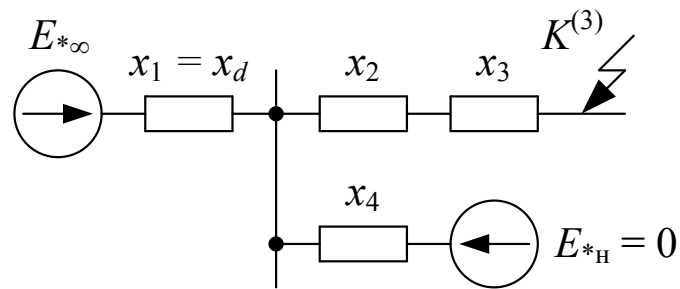


Рис. 3.8

$$x_{*ВН} = \frac{(x_2 + x_3)x_4}{x_2 + x_3 + x_4}.$$

Для выяснения величины $x_{*кр}$ рассмотрим следующую схему (рис. 3.9).

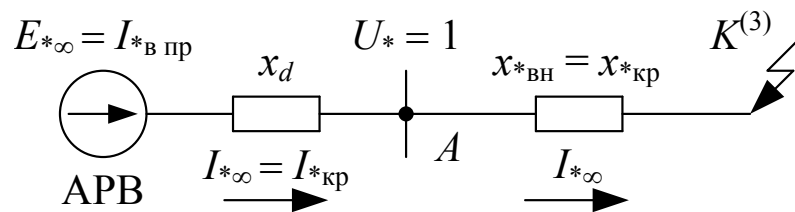


Рис. 3.9

$$E_{*∞} = I_{*В пр}, \quad I_{*∞} = I_{*кр}, \quad x_{*ВН} = x_{*кр}.$$

Для точки A запишем

$$U_* = I_{*∞} x_{*кр}, \quad (3.7)$$

$$U_* = E_{*∞} - I_{*∞} x_d. \quad (3.8)$$

Выразив $I_{*\infty}$ из (3.7) и подставив в (3.8), получим

$$U_* = E_{*\infty} - \frac{U_* x_d}{x_{*кр}}, \quad U_* x_d = (E_{*\infty} - U_*) x_{*кр}. \quad (3.9)$$

$$x_{*кр} = \frac{U_*}{E_{*\infty} - U_*} x_d = \frac{U_*}{I_{*в пр} - U_*} x_d. \quad (3.10)$$

Если принять, что до КЗ генератор работал с номинальным напряжением, то

$$x_{*кр} = \frac{1}{I_{*в пр} - 1} x_d. \quad (3.11)$$

Рассмотрим, какие значения приобретает $x_{*кр}$ для типового турбо- и гидрогенератора:

$$\text{ТГ: } I_{*в пр} = 4, \quad x_d = \frac{1}{K_C} = \frac{1}{0,7};$$

$$x_{*кр} = \frac{1}{0,7} \frac{1}{4-1} \approx 0,5.$$

$$\text{ГГ: } I_{*в пр} = 3, \quad x_d = \frac{1}{K_C} = \frac{1}{1,1};$$

$$x_{*кр} = \frac{1}{1,1} \frac{1}{3-1} \approx 0,5.$$

Таким образом, величина $x_{*кр} = 0,5$ получается как для ТГ, так и ГГ, при номинальных данных генератора. Величина $x_{*вн}$ в процессе составления схемы замещения и преобразования ее будет получаться при выбранных базисных условиях, которые будут отличаться от номинальных данных генератора. В связи с этим, прежде чем сравнивать эти величины, необходимо привести их к одним и тем же базисным условиям:

$$x_{*крб} = x_{*кр} \frac{S_б}{S_{нг}}. \quad (3.12)$$

Далее сравнивают $x_{*вн}$ и $x_{*крб}$.

Если в процессе сравнения $x_{*вн}$ и $x_{*крб}$ выясняется, что имеет место режим нормального напряжения, то есть $x_{*вн} > x_{*крб}$, то в этом случае на выводах генератора поддерживается номинальное напряжение и $U_* = 1$, а ток КЗ

$$I_{*∞}^{(3)} = \frac{U_*}{x_{*вн}}, \quad I_{∞}^{(3)} = I_{*∞}^{(3)} I_{б}, \text{ кА.}$$

Если $x_{*вн} < x_{*крб}$, то это говорит о том, что генератор при КЗ за этим сопротивлением находится в режиме предельного возбуждения. Его следует ввести в схему замещения ЭДС $E_{*пр} = I_{*в пр}$ и сопротивлением установившегося режима

$$x_1 = x_d \frac{S_{б}}{S_{н}} = \frac{1}{K_C} \frac{S_{б}}{S_{н}}.$$

Тогда ток КЗ будет определяться

$$I_{*∞}^{(3)} = \frac{I_{*в пр}}{x_1 + x_{*вн}};$$

$$I_{∞}^{(3)} = I_{*∞}^{(3)} I_{б}, \text{ кА.}$$

Для рассмотренных режимов генератора можно представить условные эпюры напряжений (рис. 3.10).

При КЗ в точке K_1 $x_{вн} < x_{кр}$ – режим предельного возбуждения (РПВ).

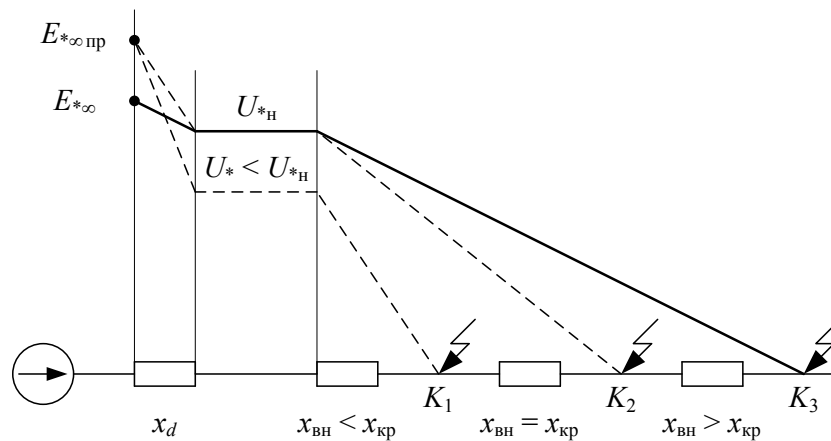


Рис. 3.10

При КЗ в точке K_2 $x_{вн} = x_{кр}$ – критический режим.

При КЗ в точке K_3 $x_{вн} > x_{кр}$ – режим нормального напряжения (РНН).

3.3. Расчет установившегося режима трехфазного короткого замыкания в сложных схемах

В тех случаях, когда в сложных схемах присутствуют все генераторы без АРВ, расчет установившегося режима КЗ не вызывает никаких сложностей. Генераторы в схему замещения вводятся установившимися ЭДС и сопротивлениями, которые определяются через известные $I_{*в}$ и K_C генераторов.

Когда же в сложной схеме присутствуют генераторы с АРВ, понятие внешней реактивности для каждого генератора теряет смысл. В этом случае для выяснения режима каждого из генераторов применяют метод последовательных приближений.

Для этого каждому генератору схемы, в зависимости от удаленности от точки КЗ, произвольно присваивается либо режим предельного возбуждения (генератор в схему замещения вводится ЭДС $E_{*∞пр} = I_{*в пр}$ и x_d), либо режим нормального напряжения (генератор в схему замещения вводится ЭДС $E_{*∞} = U_{*ном} = 1$, $x_d = 0$) (рис. 3.12).

После этого осуществляется расчет тока КЗ в точке K и распределение его по отдельным ветвям. Зная вычисленные действительные токи генераторов, сравнивают их с критическими токами. Для режима предельного возбуждения:

$$I_{Г} > I_{кр}$$

Для режима нормального напряжения:

$$I_{Г} < I_{кр}$$

где

$$I_{кр} = \frac{U_*}{x_{*крб}} I_{б} = \frac{1}{x_{*крб}} I_{б} \quad \text{или} \quad I_{кр} = \frac{U_*}{x_{*кр}} I_{нг} = \frac{1}{0,5} I_{нг} = 2I_{нг}, \text{ кА.}$$

То есть критический ток в два раза превышает номинальный ток генератора. Если в результате проверки оказалось, что режимы некоторых генераторов выбраны изначально неверно, то их следует изменить на противоположные и произвести новый расчет с последующей проверкой. Так поступают до тех пор, пока выбранный и расчетный режимы не совпадут.

При расчете сложных схем в первую очередь следует установить возможный режим работы ближайшего к месту КЗ генератора. Если получается, что для него должен быть принят режим предельного

возбуждения (РПВ), то следует перейти к оценке возможных режимов других генераторов, рассматривая их поочередно в порядке увеличения их удаленности. Как только выявляется генератор (или станция), находящийся в режиме нормального напряжения, все подключенные к нему элементы, которые не образуют путей для тока к месту КЗ, могут быть отброшены.

Рассмотрим пример (рис. 3.11).

Составим эквивалентную схему замещения (рис. 3.12). Сравнив внешнее сопротивление с критическим, получаем, что Г1 находится в режиме предельного возбуждения, а Г2 и Г3 в режиме нормального напряжения.

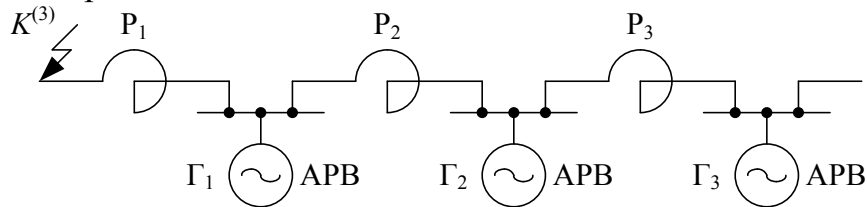


Рис. 3.11

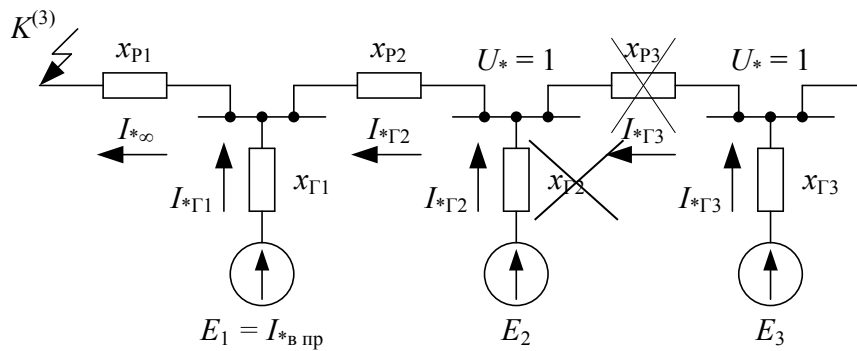


Рис. 3.12

Для Г1 $x_{p1} < x_{*кр}$.

Для Г2 $(x_{p1} + x_{p2}) > x_{*кр}$.

Для Г3 $(x_{p1} + x_{p2} + x_{p3}) > x_{*кр}$.

С учетом выбранных режимов выполним расчет $I_{*∞}^{(3)}$, а также $I_{*Г1}$ и $I_{*Г2}$.

Затем определяем

$$I_{Г1} = I_{*Г1} I_{б}, \text{ кА} \text{ и } I_{Г2} = I_{*Г2} I_{б}, \text{ кА.}$$

Сравниваем их с критическим током

$$I_{кр} = \frac{1}{x_{*крб}} I_{б}, \text{ кА.}$$

Если $I_{Г2} > I_{кр}$, это означает, что генератор Г2 работает в режиме предельного возбуждения.

В этом случае необходимо перезадаваться режимом Г2 и повторить расчет (рис. 3.13).

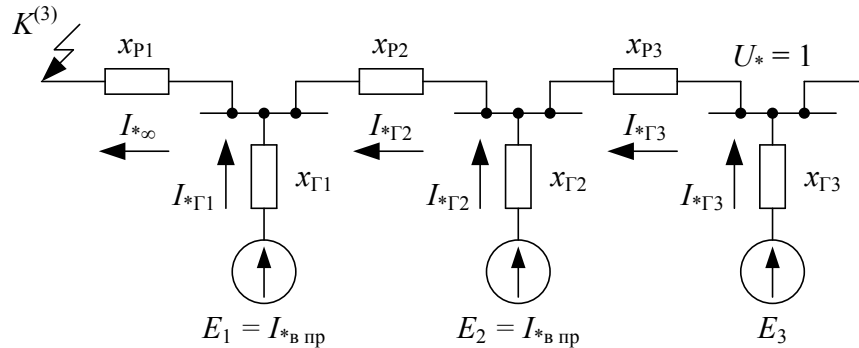


Рис. 3.13

Расчет повторяют до тех пор, пока выбранный и расчетный режимы не совпадут.

3.4. Влияние и учет нагрузки в установившемся режиме короткого замыкания

В установившемся режиме КЗ влияние нагрузки проявляется в том, что предварительно нагруженный генератор имеет больший ток возбуждения, чем генератор, работающий на ХХ, а также в том, что, оставаясь присоединенной к сети, она влияет на величину тока КЗ в аварийной ветви и в ветви генератора.

Она, как правило, шунтирует аварийную ветвь, тем самым уменьшая в ней ток, и увеличивает ток генератора. Чтобы уяснить это, рассмотрим простейшую схему (рис. 3.14).

1. При отсутствии нагрузки

$$I_{*КЗ} = I_{*Г} = \frac{E_{*∞}}{x_{*∞} + x_{*К}}. \quad (3.13)$$

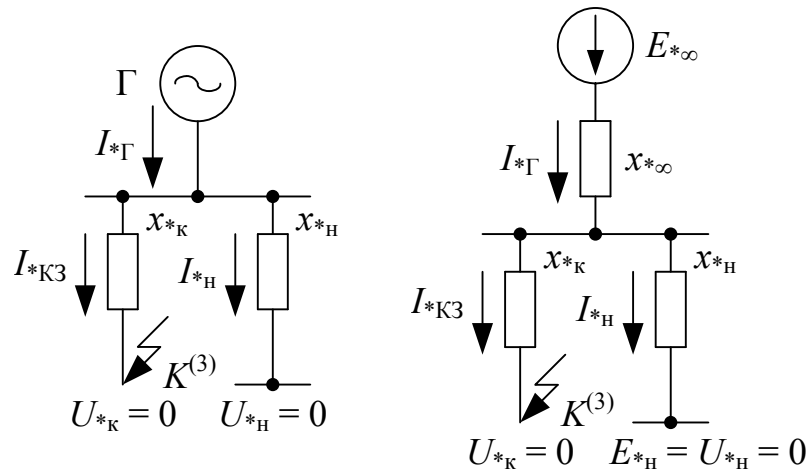


Рис. 3.14

2. При наличии нагрузки

$$I_{*КЗ} = I_{*Г} \frac{x_{*Н}}{x_{*К} + x_{*Н}}; \quad (3.14)$$

$$I_{*Г} = \frac{E_{*∞}}{x_{*∞} + \frac{x_{*К}x_{*Н}}{x_{*К} + x_{*Н}}}. \quad (3.15)$$

Сопротивление нагрузки, основу которой составляют асинхронные двигатели (АД), определяется скольжением s двигателей, которое изменяется в процессе переходного режима, так как оно является функцией напряжения в точке присоединения нагрузки, а оно, в свою очередь, является функцией искомого тока КЗ.

Поэтому для упрощения практических расчетов нагрузку учитывают приближенно, характеризуя ее некоторой постоянной реактивностью. Для установления значения этого сопротивления рассмотрим следующую схему (рис. 3.15).

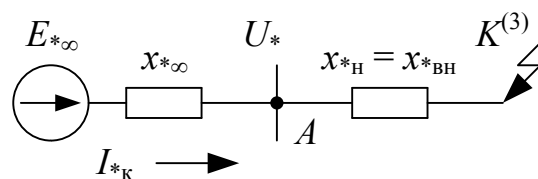


Рис. 3.15

$$x_{*Н} = x_{*ВН};$$

$$x_{*H} = f(S, U, I);$$

$$U_* = E_{*\infty} - I_{*K} x_{*\infty};$$

$$U_* = I_{*K} x_{*H};$$

$$I_{*K} = \frac{U_*}{x_{*H}};$$

$$U_* = E_{*\infty} - \frac{U_* x_{*\infty}}{x_{*H}}; \quad x_{*H} = \frac{U_* x_{*\infty}}{E_{*\infty} - U_*} = \frac{x_{*\infty}}{E_{*\infty} - 1}. \quad (3.16)$$

Учитывая то, что ТГ, работающий с номинальной нагрузкой, имеет $I_{*B} = 2,3$, а $x_d = \frac{1}{K_C} = \frac{1}{0,7}$, получим $x_{*H} = \frac{1}{0,7} \frac{1}{2,3-1} \approx 1,1$.

В практических расчетах принимают $x_{*H} = 1,1-1,3$ или $x_{*H} = 1,2$.

Величина x_{*H} отнесена к полной номинальной мощности нагрузки и среднономинальному напряжению той ступени, к которой она подключена. Поэтому при составлении схем замещения величину этого сопротивления необходимо приводить к базисным условиям:

$$x_{*H\delta} = x_{*H} \frac{S_{\delta}}{S_{H\delta}} = 1,2 \frac{S_{\delta}}{S_{H\delta}}.$$

ЭДС нагрузки в установившемся режиме принимается равной нулю. Так как напряжение в точке КЗ равно нулю и ЭДС нагрузки равна нулю, то нагрузка, подключенная к точке КЗ, в установившемся режиме никак не влияет на величину токов и поэтому в расчетах не учитывается.

3.5. Определение остаточного напряжения в установившемся режиме короткого замыкания

Остаточное напряжение в той или иной точке схемы в установившемся режиме КЗ определяется как падение напряжения от протекания установившегося тока КЗ по сопротивлению от точки КЗ до точки, в которой определяется эта величина (рис. 3.16).

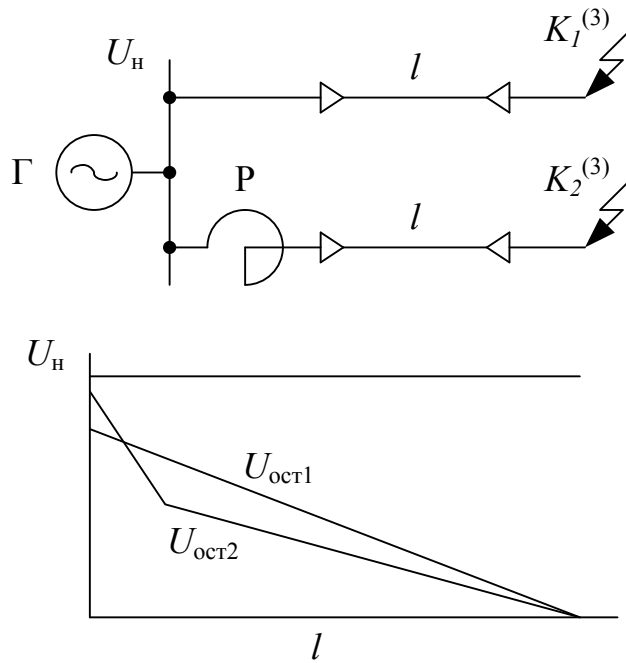


Рис. 3.16

$$U_{*ост1} = I_{*КЗ1} X_{л}; \quad (3.17)$$

$$U_{*ост2} = I_{*КЗ2} (X_{л} + X_{р}). \quad (3.18)$$

На электрических станциях в схемах питания собственных нужд величина $U_{ост}$ на шинах должна быть не менее $0,6U_{н}$ для того, чтобы был успешным самозапуск двигателей после восстановления нормального режима.

С целью повышения уровня остаточного напряжения и снижения уровня токов КЗ на кабельных линиях устанавливают реакторы.

3.6. Внезапное трехфазное короткое замыкание в простейшей электрической цепи

Простейшей трехфазной цепью называется цепь, которая не содержит магнитосвязанных элементов и которая питается от источника синусоидального напряжения, амплитуда которого не изменится во времени (рис. 3.17).

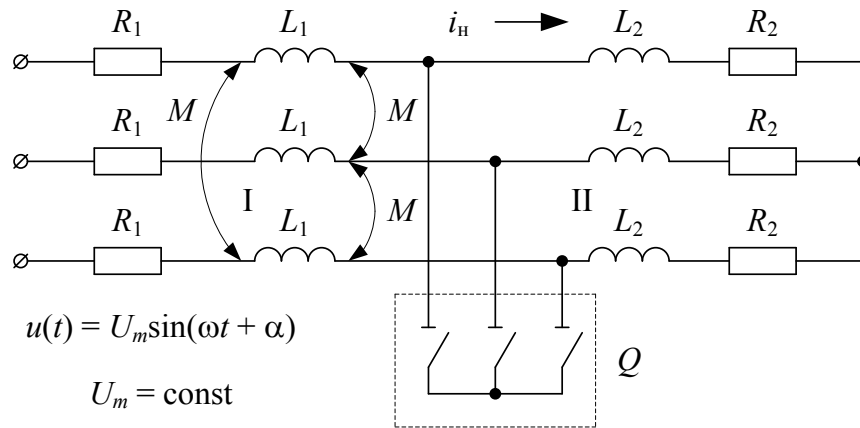


Рис. 3.17

До короткого замыкания в схеме протекал ток нагрузки i_n :

$$i_n = I_{mн} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_n), \quad (3.19)$$

где

$$I_{mн} = \frac{U_m}{Z_n}, \quad \operatorname{tg} \varphi_n = \frac{x_n}{R_n}, \quad x_n = \omega(L_1 + L_2), \quad R_n = R_1 + R_2; \quad (3.20)$$

α – начальная фаза включения источника;

φ_n – угол сдвига между напряжением и током.

При включении выключателя Q (см. рис. 3.17) происходит внезапное КЗ и схема распадается на два независимых участка I и II, один из которых остается присоединенным к источнику питания, а второй превращается в короткозамкнутый контур.

На втором (короткозамкнутом) участке ток будет поддерживаться до тех пор, пока запасенная энергия магнитного потока в L_2 не перейдет в тепло, поглощаемое активным сопротивлением этого участка R_2 .

Для этого участка баланс напряжений в каждой фазе запишется уравнением:

$$0 = iR_2 + L_2 \frac{di}{dt}. \quad (3.21)$$

Его решение имеет следующий вид:

$$i(t) = i_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (3.22)$$

где

$$\tau = \frac{L_2}{R_2} = \frac{X_2}{\omega R_2}; \quad (3.23)$$

τ – постоянная времени затухания свободной составляющей тока.

Графическая интерпретация решения уравнения (3.21) представлена на рис. 3.18.

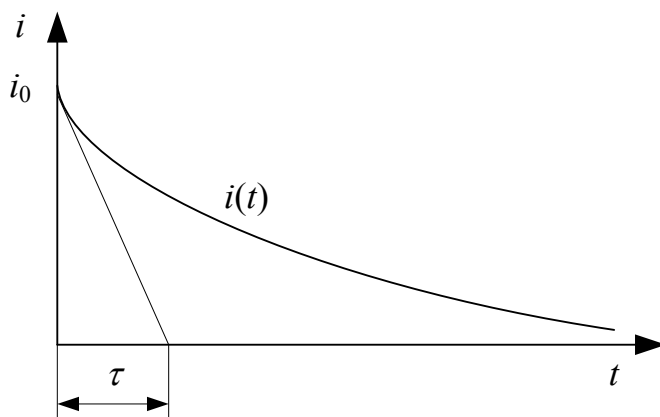


Рис. 3.18

Для определения начального значения тока i_0 рассмотрим момент КЗ:

$$t = 0, i(0) = i_0, i_0 = i(0) = i_H(0) = I_{mH} \sin(\alpha - \varphi_H). \quad (3.24)$$

Тогда окончательное решение уравнения (3.21):

$$i(t) = [I_{mH} \sin(\alpha - \varphi_H)] e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (3.25)$$

Свободные токи на втором участке во всех фазах затухают с одной и той же постоянной времени τ , однако начальные значения токов в каждой из фаз различны за счет фазового сдвига. Начальное значение тока на втором участке i_0 никогда не может превышать амплитуду тока предшествующего режима, то есть I_{mH} (рис. 3.19).

Рассмотрим протекание переходного процесса на участке I .

Дифференциальное уравнение равновесия для любой фазы, например, фазы A на первом участке, запишется как:

$$U_A(t) = i_A R_1 + L_1 \frac{di_A}{dt} + M \frac{di_B}{dt} + M \frac{di_C}{dt}, \quad (3.26)$$

где L_1 – собственная индуктивность фаз цепи КЗ (участок I);
 M – взаимная индуктивность фаз цепи КЗ.

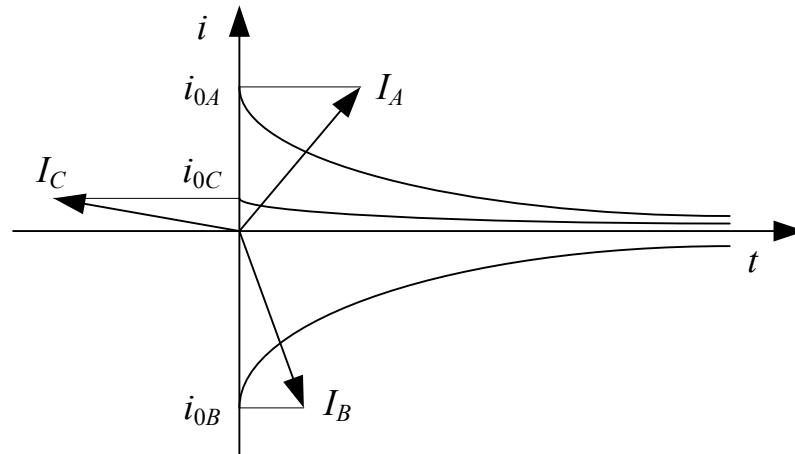


Рис. 3.19

Аналогично можно записать уравнение баланса напряжений для двух других фаз.

Учитывая, что

$$i_A + i_B + i_C = 0 \quad \text{или} \quad i_A = -(i_B + i_C).$$

Уравнение (3.26) представим как

$$U_A(t) = i_A R_1 + L_1 \frac{di_A}{dt} - M \frac{di_A}{dt}. \quad (3.27)$$

Для любой из фаз уравнение равновесия запишется

$$U(t) = i R_k + L_k \frac{di}{dt}, \quad (3.28)$$

где $R_k = R_1$, $L_k = L_1 - M$ соответственно активное сопротивление и индуктивность короткозамкнутой цепи. Решение данного уравнения имеет вид:

$$i(t) = i_{\text{п}}(t) + i_{\text{св}}(t), \quad (3.29)$$

где $i_{\Pi}(t)$ – вынужденная (периодическая) составляющая тока КЗ;
 $i_{\text{св}}(t)$ – свободная (апериодическая) составляющая тока КЗ,

$$i_{\text{св}}(t) = i_0 e^{-\frac{t}{\tau_{\text{к}}}}, \quad (3.30)$$

где

$$\tau_{\text{к}} = \frac{L_{\text{к}}}{R_{\text{к}}} = \frac{X_{\text{к}}}{\omega R_{\text{к}}}, \quad (3.31)$$

$$i_{\Pi}(t) = I_{\text{мп}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_{\text{к}}), \quad (3.32)$$

где

$$I_{\text{мп}} = \frac{U_{\text{м}}}{Z_{\text{к}}}, \quad Z_{\text{к}} = \sqrt{R_{\text{к}}^2 + X_{\text{к}}^2}, \quad \text{tg} \varphi_{\text{к}} = \frac{X_{\text{к}}}{R_{\text{к}}}, \quad (3.33)$$

$$i(t) = I_{\text{мп}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_{\text{к}}) + i_0 e^{-\frac{t}{\tau_{\text{к}}}}. \quad (3.34)$$

Для выяснения начального значения свободного тока i_0 рассмотрим момент коммутации $t = 0$.

В начальный момент сумма периодической и свободной составляющей тока равна току, который был в фазе в момент возникновения КЗ, то есть току нагрузки (току предшествующего режима):

$$i(0) = i_{\Pi}(0) + i_{\text{св}}(0);$$

$$i_{\text{св}}(0) = i(0) - i_{\Pi}(0);$$

$$i(0) = i_{\Pi}(0) = I_{\text{мп}} \sin(\alpha - \varphi_{\text{н}}); \quad (3.35)$$

$$i_{\Pi}(0) = I_{\text{мп}} \sin(\alpha - \varphi_{\text{к}}), \quad i_{\text{св}}(0) = i_0;$$

$$i_0 = I_{\text{мп}} \sin(\alpha - \varphi_{\text{н}}) - I_{\text{мп}} \sin(\alpha - \varphi_{\text{к}}).$$

Исследуем данное выражение на максимум, то есть выясним, при каких условиях свободная составляющая тока КЗ будет максимальной. В соответствии с критериями Лагранжа функция имеет максимум, если частные производные по переменным равны нулю, то есть:

$$\frac{\partial i_0}{\partial \alpha} = 0, \quad \frac{\partial i_0}{\partial \varphi_H} = 0, \quad \frac{\partial i_0}{\partial \varphi_K} = 0; \quad (3.36)$$

$$\frac{\partial i_0}{\partial \alpha} = I_{\text{мн}} \cos(\alpha - \varphi_H) - I_{\text{мп}} \cos(\alpha - \varphi_K) = 0; \quad (3.37)$$

$$\frac{\partial i_0}{\partial \varphi_H} = -I_{\text{мн}} \cos(\alpha - \varphi_H) = 0; \quad (3.38)$$

$$\frac{\partial i_0}{\partial \varphi_K} = I_{\text{мп}} \cos(\alpha - \varphi_K) = 0. \quad (3.39)$$

Это возможно, когда

$$\alpha - \varphi_K = \frac{\pi}{2}; \quad (3.40)$$

$$\alpha - \varphi_H = -\frac{\pi}{2}; \quad (3.41)$$

$$\alpha - \varphi_K - \alpha + \varphi_H = \pi, \quad \varphi_H - \varphi_K = \pi. \quad (3.42)$$

Максимум i_0 будет иметь место, если ток предшествующего режима i_H и периодическая составляющая тока последующего режима $i_{\text{п}}$ будут находиться в противофазе (рис. 3.20).

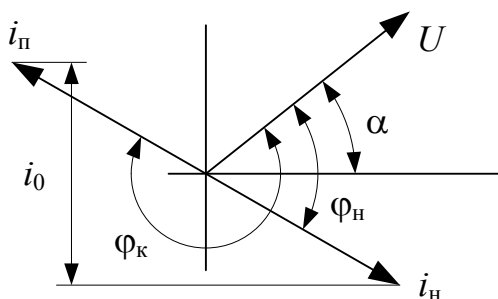


Рис. 3.20

Из представленной диаграммы видно, что вторым условием существования максимального значения i_0 является условие $\alpha = 0$. Такое условие в трехфазной системе может быть лишь в одной из фаз.

В реальных условиях $(\varphi_H - \varphi_K)$ всегда меньше 90° (рис. 3.21).

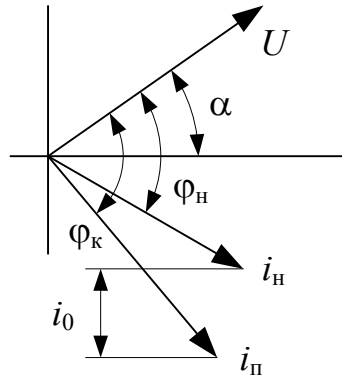


Рис. 3.21

В реальных схемах $i_0 = \max$, когда $\alpha = 0$, а также, когда в момент КЗ ток предшествующего режима (i_H) проходит через нуль, т. е. $i_H(0) = 0$:

$$\begin{aligned} i_0 &= i_H(0) - i_П(0) = -i_П(0) = \\ &= -I_{mП} \sin(\alpha - \varphi_K) = -I_{mП} \sin(90^\circ) = -I_{mП}. \end{aligned} \quad (3.43)$$

Тогда полный ток в цепи КЗ

$$i(t) = I_{mП} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K) - I_{mП} e^{-\frac{t}{\tau_K}}. \quad (3.44)$$

Изменение полного тока и его составляющих показано на рис. 3.22.

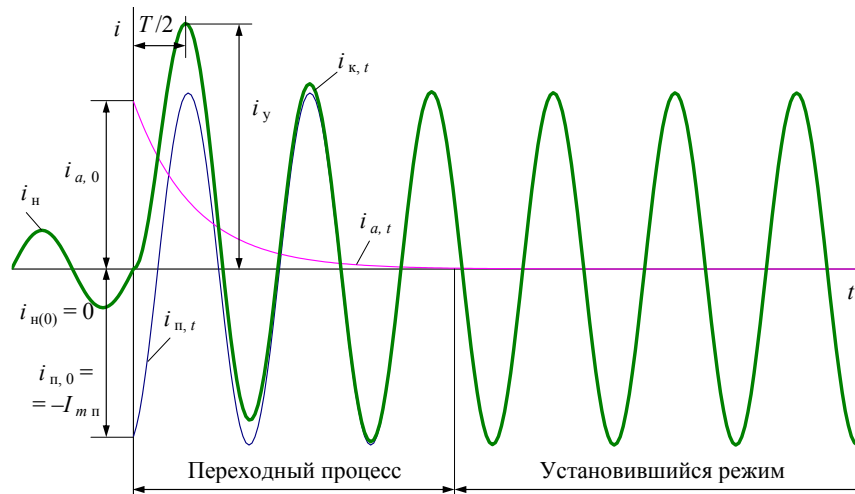


Рис. 3.22

3.7. Ударный ток короткого замыкания

Полный ток КЗ достигает наибольшего значения при наибольших значениях его составляющих.

Полный ток несимметричен относительно оси времени. Наличие апериодической (свободной) составляющей тока искажает форму полного тока КЗ и делает ее несимметричной относительно оси времени. Кривую изменения апериодической составляющей тока можно рассматривать как криволинейную ось симметрии кривой полного тока.

Максимальное мгновенное значение полного тока называется *ударным током КЗ*. Он наступает приблизительно через полпериода, что при частоте $f = 50$ Гц составляет $t = 0,01$ с, с момента КЗ.

$$i_y = I_{мп} + I_{мп} e^{-\frac{0,01}{\tau_k}} = I_{мп} \left(1 + e^{-\frac{0,01}{\tau_k}} \right) = k_y I_{мп} = \sqrt{2} k_y I_{п}, \quad (3.45)$$

где $k_y = 1 + e^{-\frac{0,01}{\tau_k}}$ – ударный коэффициент, показывающий превышение ударного тока над амплитудой периодической составляющей тока КЗ.

Поскольку $\tau_k = 0$ при $L_k = 0$ (цепь чисто активная), то $k_y = 1$ и $\tau_k = \infty$ при $R_k = 0$ (цепь чисто индуктивная). Тогда $k_y = 2$, то есть $1 \leq k_y \leq 2$.

Обычно в практических расчетах принимают $k_y = 1,8$ при расчете тока КЗ в высоковольтных сетях и $k_y = 1$ при КЗ в сетях до 1000 В. Чем меньше τ_k , тем меньше k_y , тем быстрее затухает свободный ток;

$I_{п}$ – действующее значение периодической составляющей начального (сверхпереходного) тока КЗ.

3.8. Действующее значение тока короткого замыкания и его составляющих

Действующее значение полного тока КЗ в произвольный момент времени определяется как среднеквадратичное значение тока за период T , в середине которого находится рассматриваемый момент времени.

В связи с этим, если известна зависимость $i = f(t)$, то его действующее значение в любой момент времени можно определить как

$$I_t = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} i^2 dt}. \quad (3.46)$$

Однако зависимость $i = f(t)$ в общем случае сложна, поэтому для упрощения расчета действующего значения тока принимают, что за рассматриваемый период обе слагающие тока, периодическая и апериодическая, остаются неизменными и каждая из них равна своему значению в данный момент времени t .

$$I_{\pi} = \frac{I_{m\pi}}{\sqrt{2}}, \quad (3.47)$$

$$I_{дсв} = I_{m\pi} e^{-\frac{0,01}{\tau_k}} = I_{m\pi} (k_y - 1), \quad (3.48)$$

где I_{π} – действующее значение периодической составляющей тока КЗ;

$I_{дсв}$ – действующее значение свободной составляющей тока КЗ.

Тогда действующее значение ударного тока

$$\begin{aligned} I_y &= \sqrt{I_{\pi}^2 + I_{дсв}^2} = \sqrt{\left(\frac{I_{m\pi}}{\sqrt{2}}\right)^2 + I_{m\pi}^2 (k_y - 1)^2} = \\ &= I_{m\pi} \sqrt{\frac{1}{2} + (k_y - 1)^2} = \frac{I_{m\pi}}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + 2(k_y - 1)^2} = I_{\pi} \sqrt{1 + 2(k_y - 1)^2}. \end{aligned} \quad (3.49)$$

Согласно указанным ранее пределам изменения k_y , величина отношения действующего значения ударного тока и действующего значения периодической составляющей тока КЗ $\frac{I_y}{I_{\pi}}$ находится в пределах $1 < \frac{I_y}{I_{\pi}} < \sqrt{3}$.

3.9. Внезапное трехфазное короткое замыкание в цепи с трансформаторами (неподвижная магнитосвязанная цепь)

Если принять в качестве допущения отсутствие насыщения в стали магнитопровода трансформатора, исследование его режима при возникновении КЗ значительно упрощается, так как между токами и напряжениями сохраняется линейная зависимость и они между собой связаны линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами. При рассмотрении КЗ за трансформатором будем также пренебрегать током намагничивания $i_{\mu} = 0$ ввиду того, что обе обмотки трансформатора находятся на одном стержне, то есть $z_{\mu} \rightarrow \infty$.

Допустим, что на выводах вторичной обмотки трансформатора, к первичной обмотке которого подключен источник неограниченной мощности с напряжением $U(t)$, произошло трехфазное КЗ (рис. 3.23).

$$U(t) = U_m \sin(\omega t + \alpha), U_m = \text{const.} \quad (3.50)$$

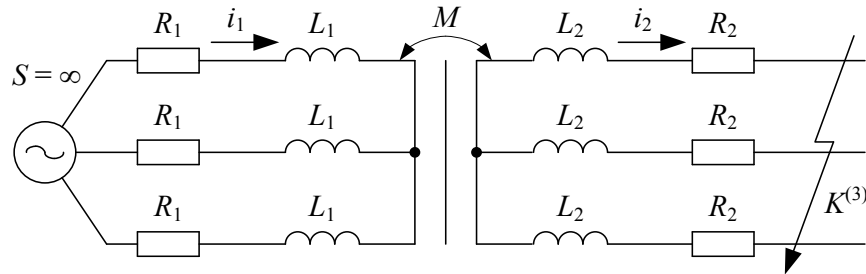


Рис. 3.23

Считая параметры вторичной обмотки приведенными к первичной и учитывая принятые допущения в соответствии с рис. 3.24 и выражением (3.51), можно записать следующие дифференциальные уравнения баланса напряжений первичной и вторичной обмоток:

$$U(t) = i_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}; \quad (3.52)$$

$$0 = i_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt}. \quad (3.53)$$

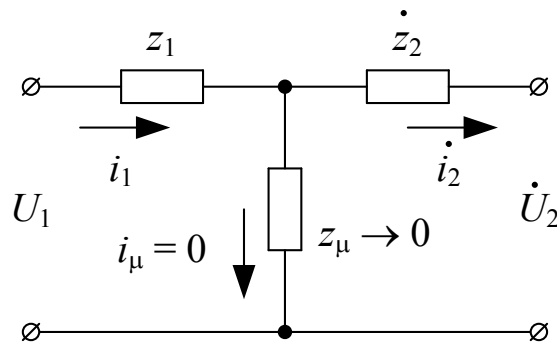


Рис. 3.24

$$i_1 = i_2 = i. \quad (3.51)$$

Символ « \circ » означает, что параметры приведены к первичной стороне.

M – взаимоиндуктивность между обмотками.

Сложив уравнение (3.52) и (3.53) с учетом (3.51), получим

$$U(t) = iR_k + L_k \frac{di}{dt}, \quad (3.54)$$

где $R_k = R_1 + R_2$ – активное сопротивление трансформатора;

$L_k = L_1 + L_2 + 2M$ – индуктивность трансформатора.

Уравнение (3.54) аналогично уравнению, описывающему переходный процесс в простейшей трехфазной цепи. Следовательно, при рассматриваемых условиях свободная составляющая тока в обеих обмотках трансформатора затухает с одной и той же постоянной времени $\tau_k = \frac{L_k}{R_k}$.

Полный ток КЗ состоит из тех же составляющих, и характер изменения его во времени имеет тот же вид, что и при переходном процессе в простейшей цепи.

Таким образом, при исследовании процесса КЗ в схемах, содержащих трансформаторы (неподвижные магнитосвязанные цепи), трансформатор практически можно рассматривать как обычный элемент схемы со своими R и L цепи, после приведения параметров к одной ступени напряжения.

3.10. Переходный процесс при включении трансформатора на холостой ход

Рассмотрим переходный процесс, возникающий при включении трансформатора на синусоидальное напряжение постоянной амплитуды и частоты (рис. 3.25).

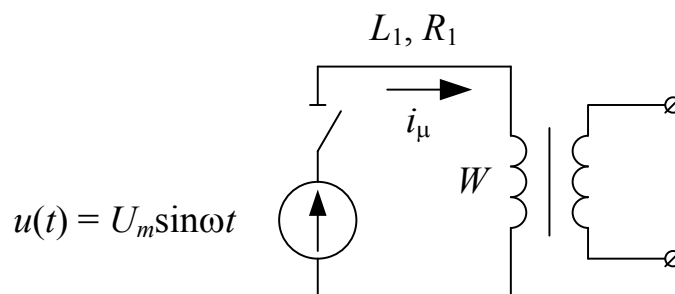


Рис. 3.25

Уравнение баланса напряжений:

$$U(t) = i_\mu R_1 + L_1 \left(i_\mu \right) \frac{di_\mu}{dt}, \quad (3.55)$$

где i_μ – ток намагничивания трансформатора.

Уравнение (3.55) нелинейно, так как присутствует $L_1 = f(i_\mu)$.

Для упрощения решения данного уравнения рассмотрим включение трансформатора без потерь ($R_1 = 0$) на ХХ при условии, что $\alpha = 0$, то есть подведенное напряжение проходит через 0. В этом случае условие равновесия напряжений после включения может быть описано следующим дифференциальным уравнением

$$U(t) = W \frac{d\Phi}{dt}, \quad (3.56)$$

или

$$U_m \sin \omega t = W \frac{d\Phi}{dt}; \quad (3.57)$$

$$U_m \sin \omega t dt = W d\Phi. \quad (3.58)$$

Проинтегрируем левую и правую части уравнения (3.58) и получим

$$\frac{-U_m \cos \omega t}{\omega} = W\Phi(t) + C, \quad (3.59)$$

где C – постоянная интегрирования.

Для ее определения рассмотрим момент коммутации $t = 0$. Тогда

$$\Phi(0) = 0, \quad C = \frac{-U_m}{\omega}. \quad (3.60)$$

Подставив (3.60) в (3.59) и разрешив относительно $\Phi(t)$, получим

$$\Phi(t) = \frac{U_m}{\omega W} - \frac{U_m}{\omega W} \cos \omega t \quad (3.61)$$

или

$$\Phi(t) = \frac{U_m}{\omega W} (1 - \cos \omega t) = \Phi_m (1 - \cos \omega t). \quad (3.62)$$

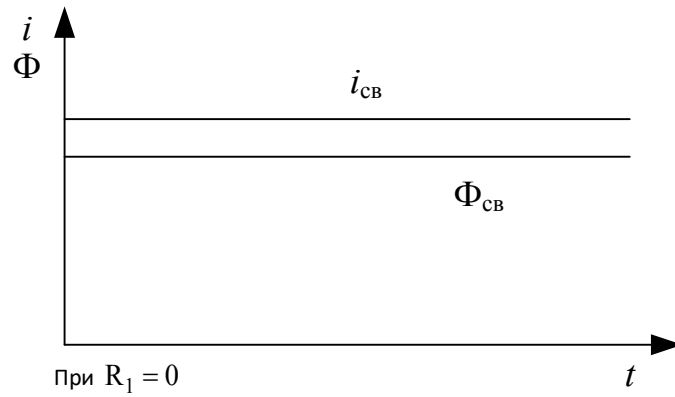


Рис. 3.26

Для реального трансформатора с учетом потерь ($R_1 \neq 0$) постоянная составляющая магнитного потока в (3.62) будет затухать с постоянной времени (рис. 3.27).

$$\tau = \frac{L_1}{R_1}, \text{ то есть} \quad (3.63)$$

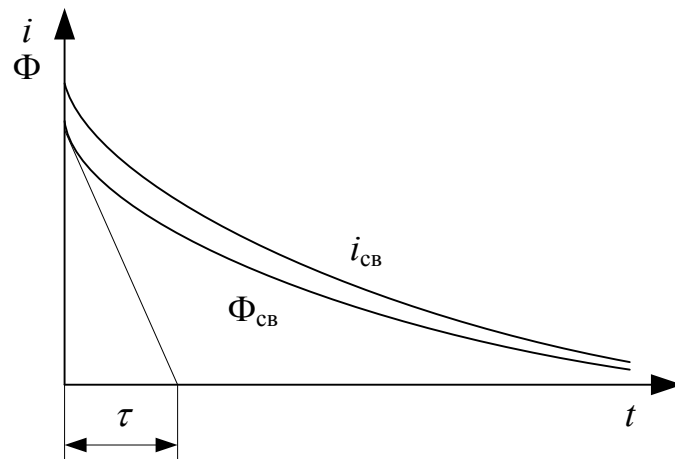


Рис. 3.27

Связь между потоком Φ и током намагничивания i_μ выражается кривой намагничивания стали сердечника трансформатора $\Phi = f(i_\mu)$. Зная кривую намагничивания и закон изменения магнитного потока во времени $\Phi(t)$, можно графическим путем получить зависимость $i_\mu = f(t)$ в переходном процессе включения трансформатора (рис. 3.28).

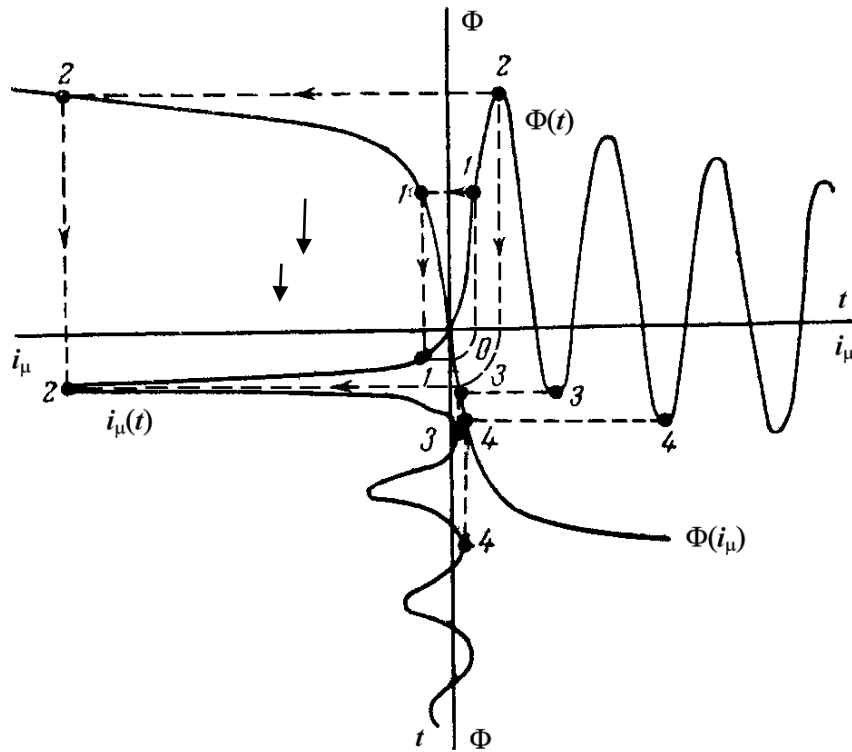


Рис. 3.28

Как видно из рисунка, при включении трансформатора на ХХ через первые полпериода (0,01 с) возникает ударный магнитный поток, который может превышать периодическую составляющую магнитного потока в два и более раз. Для создания такого потока в момент включения возникает бросок тока намагничивания, величина которого соизмерима с током КЗ при КЗ за трансформатором, то есть этот ток может превышать в 8–12 раз номинальный ток трансформатора. В силу своей кратковременности он не вызывает опасных температурных явлений в трансформаторе. Однако его величины достаточно для срабатывания устройств релейной защиты, и если не предусмотреть никаких устройств, то они будут отключать этот режим, не отличив его от режима КЗ. Если разложить функцию $i_{\mu}(t)$ в ряд Фурье, можно увидеть, что вторая гармоническая составляющая составляет около 60 %, в то время как в токе КЗ ее присутствие составляет менее 30 %. Для блокировки работы защит при броске тока намагничивания также можно использовать наличие большой аperiodической составляющей в нем. Это различие и учитывают в принципах построения устройств релейной защиты. В действительности же трансформатор обладает остаточным магнетизмом, и это обстоятельство приводит еще к большим броскам тока намагничивания при включении ненагруженного трансформатора.

4. Переходный процесс при внезапном коротком замыкании в подвижных магнитосвязанных цепях

Когда известен переменный магнитный поток, то известна и ЭДС, наводимая этим потоком в данной обмотке. В тех случаях, когда рассматриваемый магнитный поток является функцией искомого тока, обусловленная им ЭДС обычно учитывается как равная и противоположная по знаку величина падения напряжения от протекания этого тока по соответствующему данному магнитному потоку индуктивному сопротивлению машины.

Во всех последующих выкладках будем пользоваться следующими допущениями:

– ЭДС синхронной машины изменяется во времени по мере затухания свободных токов в контурах;

– поскольку имеется воздушный зазор между ротором и статором, то цепь обладает рассеиванием.

4.1. ЭДС и сопротивление синхронной машины в начальный момент переходного процесса

Установим, какими ЭДС и реактивностями можно характеризовать СМ в начальный момент переходного процесса. Для выявления этих величин рассмотрим картину магнитных потоков в СМ.

а) СМ без успокоительных обмоток (Уо) (рис. 4.1).

Поток ротора $\dot{\Phi}_B$ расходуется на поток рассеяния $\dot{\Phi}_{B\delta}$, поток реакции статора на ротор $\dot{\Phi}_{ad}$ и на поток в воздушном зазоре $\dot{\Phi}_\delta$.

$\dot{\Phi}_d$ – поток, полезносцепленный с обмоткой статора, он и вызывает ответную реакцию статора на ротор.

$\dot{\Phi}_{B\delta}$ – результирующий поток, полезносцепленный с обмоткой ротора (возбуждения).

В момент нарушения режима (КЗ) увеличивается реакция статора на ротор на величину $\Delta\dot{\Phi}_{ad}$ (так как увеличился ток статора). В ответ на эту реакцию увеличивается ток возбуждения и, следовательно, увеличивается поток обмотки возбуждения на величину $\Delta\dot{\Phi}_B = \Delta\dot{\Phi}_{ad}$. С увеличением потока возбуждения, так как цепь обладает рассеиванием, увеличивается поток рассеяния обмотки возбуждения $\dot{\Phi}_{B\delta}$ и соответственно уменьшается поток в воздушном зазоре $\dot{\Phi}_\delta$, вместе с тем результирующий поток, полезносцепленный с ротором $\dot{\Phi}_{B\delta}$, остается неизменным, то есть

$$\dot{\Phi}_{B\delta} = \text{const.}$$

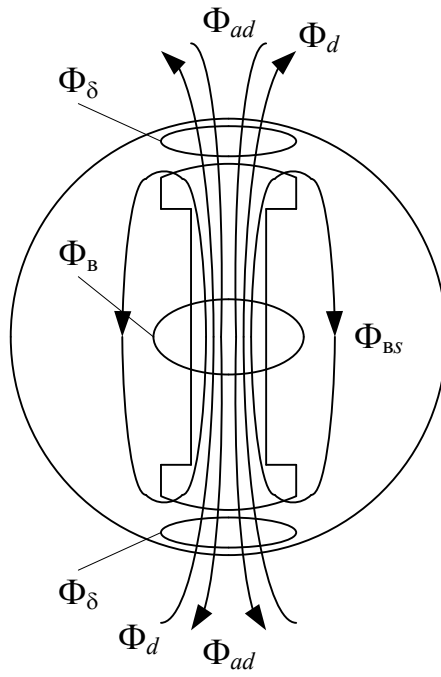


Рис. 4.1

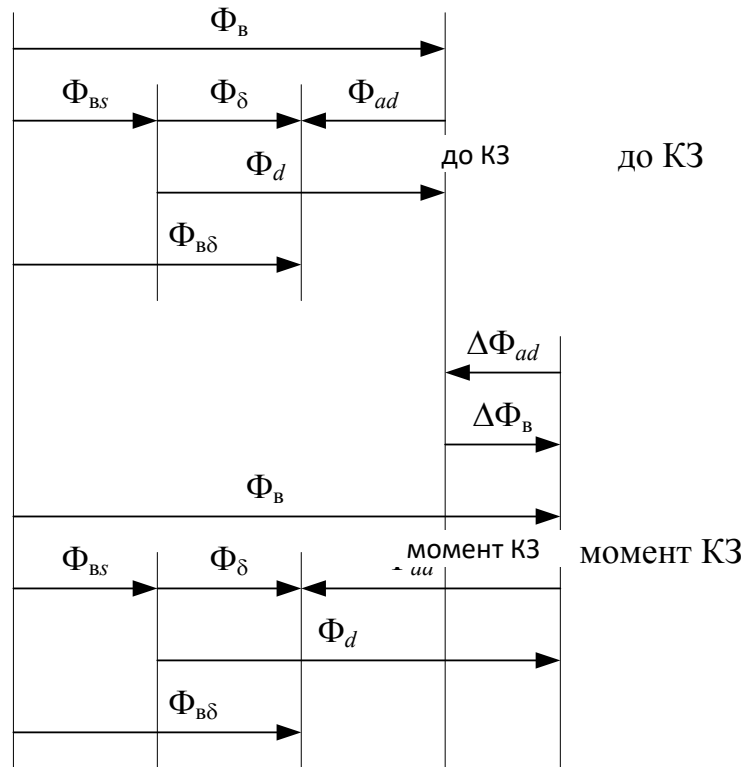


Рис. 4.2

Итак, в результате КЗ имеем:

$$\Delta\dot{\Phi}_{ad} + \Delta\dot{\Phi}_B = 0 \quad (4.1)$$

или соответственно

$$\Delta\dot{\Psi}_{*ad} + \Delta\dot{\Psi}_{*B} = 0, \Delta\dot{\Psi}_{*ad} = -\Delta\dot{\Psi}_{*B},$$

где $\Delta\dot{\Psi}_{*ad}$ и $\Delta\dot{\Psi}_{*B}$ – соответствующие приращения потокосцеплений, или

$$\begin{aligned} \Delta\dot{I}_{*c} x_{*ad} &= \Delta\dot{I}_{*B} (x_{*BS} + x_{*ad}) = \Delta\dot{I}_{*B} x_{*B}; \\ x_{*B} &= x_{*BS} + x_{*ad}, \end{aligned} \quad (4.2)$$

где x_{*BS} – сопротивление рассеяния обмотки возбуждения;

$\Delta\dot{I}_{*B}$ – приведенное к статору приращение тока возбуждения.

Из системы относительных единиц:

$$\begin{cases} \Psi_* = \frac{U_*}{\omega_*} = \frac{I_* x_*}{\omega_*} = \frac{I_* \omega_* L_*}{\omega_*} = I_* L_* = I_* x_*; \\ E_* = I_* x_*; \Psi_* = E_*, \end{cases} \quad (4.3)$$

с другой стороны, $E_* = I_{*B} = I_{*B} x_{*ad}$ – из приведения параметров ротора к обмотке статора.

Из выражения (4.2) следует, что различие между приращением тока статора $\Delta\dot{I}_{*c}$ и приращением тока возбуждения, приведенным к статору $\Delta\dot{I}_{*B}$, обусловлено лишь реактивностью рассеяния обмотки возбуждения.

В ненасыщенной машине поток рассеяния $\dot{\Phi}_{BS}$ составляет некоторую величину от полного потока возбуждения $\dot{\Phi}_B$, которая называется коэффициентом рассеяния обмотки возбуждения

$$\sigma = \frac{\dot{\Phi}_{BS}}{\dot{\Phi}_B} = \frac{x_{*BS}}{x_{*B}} = \frac{x_{*BS}}{x_{*BS} + x_{*ad}}. \quad (4.4)$$

Поскольку при наличии рассеяния нельзя исследовать начальный момент переходного процесса с помощью потока $\dot{\Phi}_d$, так как его величина зависит от искомого тока КЗ, то в этом случае пользуются условием неизменности результирующего потока $\dot{\Phi}_{B\delta}$, а соответственно и потокосцепления $\dot{\Psi}_{B\delta}$, полезно сцепленного с обмоткой возбуждения, в начальный момент переходного процесса. Зная это потокосцепление и коэффициент рассеяния обмотки

возбуждения, можно определить ту часть потокосцепления $\dot{\psi}_{*B\delta}$, которая связана с обмоткой статора. Причем этой частью потокосцепления в обмотке статора обуславливается та ЭДС E' , которая в начальный момент переходного процесса сохраняет свое предшествующее значение:

$$\begin{aligned}\dot{\psi}'_{*d} &= (1 - \sigma)\dot{\psi}_{*B\delta} = \left(1 - \frac{x_{*BS}}{x_{*BS} + x_{*ad}}\right)(\dot{\psi}_{*B} - \dot{\psi}_{*ad}) = \\ &= \frac{x_{*ad}}{x_{*BS} + x_{*ad}} \left[\overset{\circ}{I}_{*B} (x_{*BS} + x_{*ad}) - \overset{\circ}{I}_{*C} x_{*ad} \right] = \\ &= \overset{\circ}{I}_{*B} x_{*ad} - \overset{\circ}{I}_{*C} \frac{x_{*ad}^2}{x_{*BS} + x_{*ad}} = \overset{\circ}{I}_{*B} - \overset{\circ}{I}_{*C} \frac{x_{*ad}^2}{x_{*BS} + x_{*ad}} = \quad (4.5) \\ &= \overset{\circ}{E}_* - \overset{\circ}{I}_{*C} \frac{x_{*ad}^2}{x_{*BS} + x_{*ad}} = \overset{\circ}{U}_* + \overset{\circ}{I}_{*C} x_{*d} - \overset{\circ}{I}_{*C} \frac{x_{*ad}^2}{x_{*BS} + x_{*ad}} = \\ &= \overset{\circ}{U}_* + \overset{\circ}{I}_{*C} x'_{*d} = \overset{\circ}{E}'_*\end{aligned}$$

$$\overset{\circ}{E}'_* = \overset{\circ}{U}_* + \overset{\circ}{I}_{*C} x'_{*d},$$

ГДЕ

$$\begin{aligned}x'_{*d} &= x_{*d} - \frac{x_{*ad}^2}{x_{*BS} + x_{*ad}} = x_{*s} + x_{*ad} - \frac{x_{*ad}^2}{x_{*BS} + x_{*ad}} = \quad (4.6) \\ &= x_{*s} + \frac{x_{*ad} x_{*BS} + x_{*ad}^2 - x_{*ad}^2}{x_{*BS} + x_{*ad}} = x_{*s} + \frac{x_{*ad} x_{*BS}}{x_{*BS} + x_{*ad}};\end{aligned}$$

$$x'_{*d} = x_{*s} + \frac{x_{*ad} x_{*BS}}{x_{*BS} + x_{*ad}}.$$

Таким образом, в начальный момент переходного процесса генератор без успокоительных обмоток характеризуется переходной ЭДС E'_* и переходным сопротивлением x'_{*d} .

В практических расчетах, когда в схеме имеется генератор без успокоительных обмоток, для определения начального тока КЗ его необходимо вводить в схему замещения переходной ЭДС E'_* и переходным сопротивлением x'_{*d} , величину которого необходимо приводить к базисным условиям.

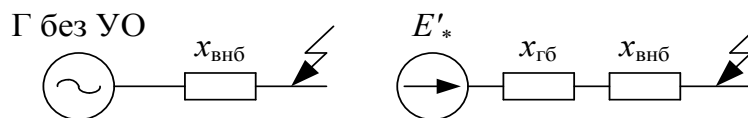


Рис. 4.3

$$x_{гб} = x'_{*d} \frac{S_{б}}{S_{н}}$$

где x'_{*d} – переходное сопротивление генератора в относительных единицах при номинальных данных. Его величина определяется опытным путем и задается в паспортных данных генератора;

б) СМ с успокоительными обмотками (рис. 4.4).

Все генераторы уже по своей природе имеют успокоительные обмотки. У гидрогенераторов устанавливают отдельные специальные успокоительные обмотки, а у турбогенераторов роль успокоительной обмотки выполняет само тело ротора. С появлением новой обмотки появляется поток рассеяния этой обмотки и сопротивление, характеризующее этот процесс. До короткого замыкания картина магнитных потоков генератора с УО та же, что и для генератора без УО. Вместе с тем в момент нарушения режима сумма приращений всех потокосцеплений в синхронной машине должна остаться равной нулю (рис. 4.4):

$$\sum \Delta \psi = 0;$$

$$\Delta \Phi_{ad} = \Delta \Phi_p = \Delta \Phi_B + \Delta \Phi_{yO} \quad (4.7)$$

или

$$\Delta \psi_{ad} = \Delta \psi_B + \Delta \psi_{yO} = \Delta \psi_p,$$

$$\Delta I_{*c} x_{*ad} = \left(\Delta I_{*B} + \Delta I_{*yO} \right) (x_{*ps} + x_{*ad}) = \Delta I_{*p} x_{*p}, \quad (4.8)$$

где ΔI_{*B} , ΔI_{*yO} – приращения тока возбуждения в обмотке возбуждения и тока в успокоительной обмотке, приведенные к току статора;

$x_{*p} = x_{*ps} + x_{*ad}$ – сопротивление ротора;

x_{*ps} – сопротивление рассеяния ротора, которое определяется по формуле

$$x_{*ps} = \frac{x_{*BS} x_{*yOs}}{x_{*BS} + x_{*yOs}}, \quad (4.9)$$

где x_{*yOs} – сопротивление рассеяния успокоительной обмотки.

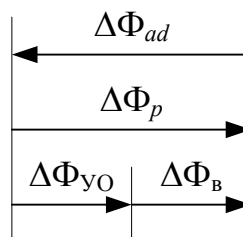


Рис. 4.4

В этом случае коэффициент рассеяния ротора

$$\sigma_p = \frac{x_{*ps}}{x_{*p}} = \frac{x_{*ps}}{x_{*ps} + x_{*ad}}. \quad (4.10)$$

Вместе с тем поток, полезно сцепленный с ротором $\dot{\psi}_{в\delta}$, в момент нарушения режима остается неизменным, то есть $\dot{\psi}_{в\delta} = \text{const}$, поэтому, зная его и коэффициент рассеяния ротора σ_p , можно определить то потокосцепление, которое связано со статором и которое обуславливает ЭДС E''_* , остающуюся неизменной в начальный момент переходного процесса:

$$\begin{aligned} \dot{\psi}''_* &= (1 - \sigma) \dot{\psi}_{в\delta} = \left(1 - \frac{x_{*ps}}{x_{*ps} + x_{*ad}}\right) (\dot{\psi}_{*в} - \dot{\psi}_{*ad}) = \\ &= \frac{x_{*ad}}{x_{*ps} + x_{*ad}} \left[\overset{\circ}{I}_{*p} (x_{*ps} + x_{*ad}) - \overset{\circ}{I}_{*c} x_{*ad} \right] = \overset{\circ}{I}_{*p} x_{*ad} - \overset{\circ}{I}_{*c} \frac{x_{*ad}^2}{x_{*ps} + x_{*ad}} = \\ &= \overset{\circ}{I}_{*p} - \overset{\circ}{I}_{*c} \frac{x_{*ad}^2}{x_{*ps} + x_{*ad}} = \dot{E}''_* - \overset{\circ}{I}_{*c} \frac{x_{*ad}^2}{x_{*ps} + x_{*ad}} = \dot{U}_* + \overset{\circ}{I}_{*c} x''_{*d} = \dot{E}''_*, \\ & \dot{E}''_* = \dot{U}_* + \overset{\circ}{I}_{*c} x''_{*d}, \quad (4.11) \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} x''_{*d} &= x_{*d} - \frac{x_{*ad}^2}{x_{*ps} + x_{*ad}} = x_{*s} + x_{*ad} - \frac{x_{*ad}^2}{x_{*ps} + x_{*ad}} = \\ &= x_{*s} + \frac{x_{*ad} x_{*ps}}{x_{*ps} + x_{*ad}} = \\ &= x_{*s} + \frac{x_{*bs} x_{*yO_s} x_{*ad}}{x_{*bs} x_{*ad} + x_{*yO_s} x_{*ad} + x_{*bs} x_{*yO_s}}, \end{aligned} \quad (4.12)$$

$$x''_{*d} = x_{*s} + \frac{x_{*bs} x_{*yO_s} x_{*ad}}{x_{*bs} x_{*ad} + x_{*yO_s} x_{*ad} + x_{*bs} x_{*yO_s}}.$$

В практических расчетах, для вычисления начального значения тока КЗ, генератор необходимо вводить в схему замещения ЭДС E''_* и сопротивлением x''_{*d} , величину которого требуется приводить к базисным условиям (рис. 4.5).

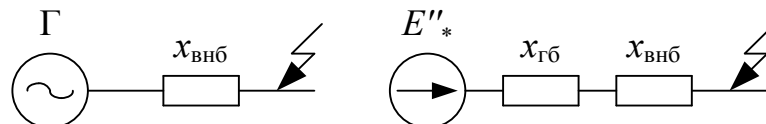


Рис. 4.5

$$x_{ГБ} = x''_{*d} \frac{S_{\sigma}}{S_H},$$

где E''_* и x''_{*d} – соответственно сверхпереходная ЭДС и реактивность СМ.

Итак, за весь переходный процесс СМ проходит три стадии, и на каждой из них она характеризуется своими значениями ЭДС и сопротивлений:

- первая стадия – сверхпереходной режим, E''_* и x''_{*d} ;
- вторая стадия – переходный режим, E'_* и x'_{*d} ;
- третья стадия – установившийся режим, $E_{*\infty}$ и x_{*d} .

4.2. Параметры синхронной машины

4.2.1. ЭДС синхронной машины

ЭДС синхронной машины можно определить для любой из стадий переходного процесса, рассмотрев ее упрощенную векторную диаграмму (рис. 4.6).

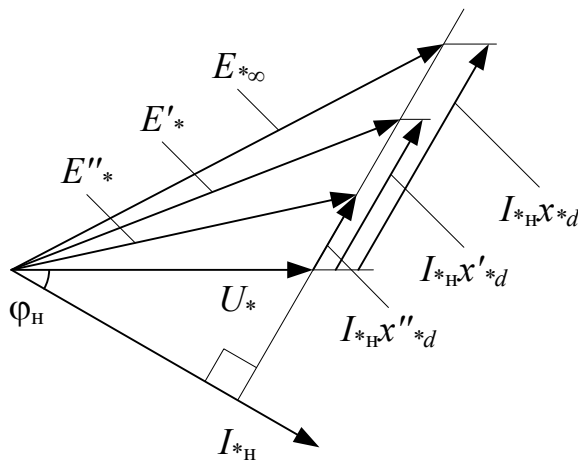


Рис. 4.6

$$E_{*\infty} = \sqrt{(U_* \cos \varphi)^2 + (U_* \sin \varphi + I_{*H} x_{*d})^2};$$

$$E'_* = \sqrt{(U_* \cos \varphi)^2 + (U_* \sin \varphi + I_{*H} x'_{*d})^2}; \quad (4.13)$$

$$E''_* = \sqrt{(U_* \cos \varphi)^2 + (U_* \sin \varphi + I_{*H} x''_{*d})^2}.$$

В практических расчетах кроме приведенных формул для определения E'_* и E''_* пользуются более упрощенными выражениями. За величину соответствующей ЭДС принимают величину проекции вектора ЭДС на вектор напряжения (рис. 4.7).

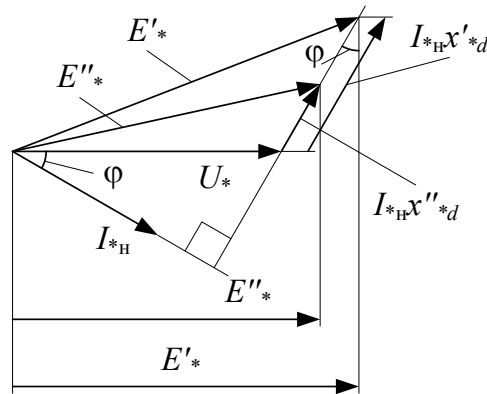


Рис. 4.7

$$E'_* = U_* + I_{*H} x'_{*d} \sin \varphi, \quad (4.14)$$

$$E''_* = U_* + I_{*H} x''_{*d} \sin \varphi.$$

4.2.2. Индуктивности (сопротивления) синхронной машины

Из приведенной схемы замещения СМ (рис. 4.8) имеем:

– для сверхпереходного режима, когда присутствует влияние успокоительной обмотки:

$$x''_{*d} = x_{*s} + \frac{x_{*BS} x_{*YO_S} x_{*ad}}{x_{*BS} x_{*ad} + x_{*YO_S} x_{*ad} + x_{*BS} x_{*YO_S}}; \quad (4.15)$$

– для переходного режима, когда влияние успокоительной обмотки заканчивается и генератор становится машиной без успокоительной обмотки, ключ K_2 отключен:

$$x'_{*d} = x_{*s} + \frac{x_{*ad} x_{*BS}}{x_{*BS} + x_{*ad}}; \quad (4.16)$$

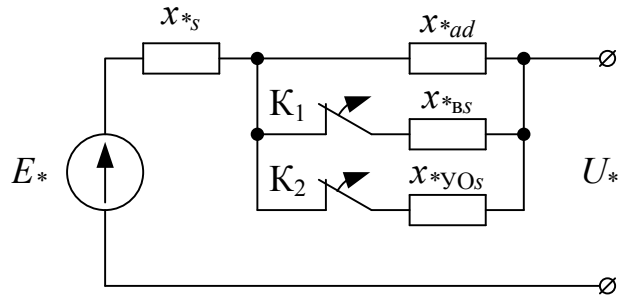


Рис. 4.8

– для установившегося режима, когда затухли свободные токи и в обмотке возбуждения, ключи K_1 и K_2 отключены:

$$x_{*d} = x_{*s} + x_{*ad} \cdot (4.17)$$

4.3. Составляющие тока короткого замыкания синхронной машины без успокоительных обмоток

Переходный процесс будем рассматривать в предположении, что СМ работает отдельно от других источников питания. Внешняя цепь статора при внезапном КЗ характеризуется некоторым постоянным индуктивным сопротивлением. В нормальном режиме в обмотке возбуждения генератора протекает постоянная составляющая тока возбуждения I_{*B} , которая наводит в обмотке статора периодически изменяющийся ток (рис. 4.9). При внезапном КЗ ток возбуждения увеличивается на величину ΔI_{*B} (рис. 4.10), которая из-за потерь в роторе затухает с постоянной времени τ' , где $\tau' = \tau_B \frac{x'_{*d}}{x_{*d}} = \frac{L_B}{R_B} \frac{x'_{*d}}{x_{*d}}$ – постоянная времени затухания свободного тока в обмотке возбуждения (рис. 4.9 и 4.10).

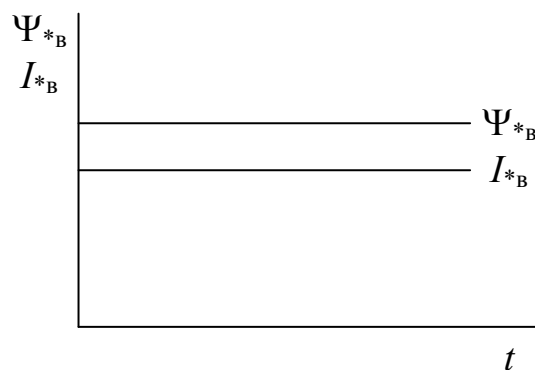


Рис. 4.9

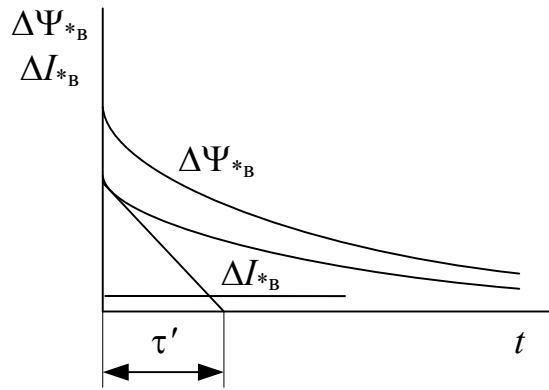


Рис. 4.10

Периодическая слагающая тока статора будет обусловлена двумя потокоцеплениями ротора и будет состоять из двух составляющих:

$$i'_{\Pi}(t) = i_{\Pi\infty}(t) + i'_{\Pi\text{СВ}}(t). \quad (4.18)$$

Полный ток КЗ будет состоять из периодической слагающей и свободного тока

$$i(t) = i'_{\Pi}(t) + i_{\text{СВ}}(t). \quad (4.19)$$

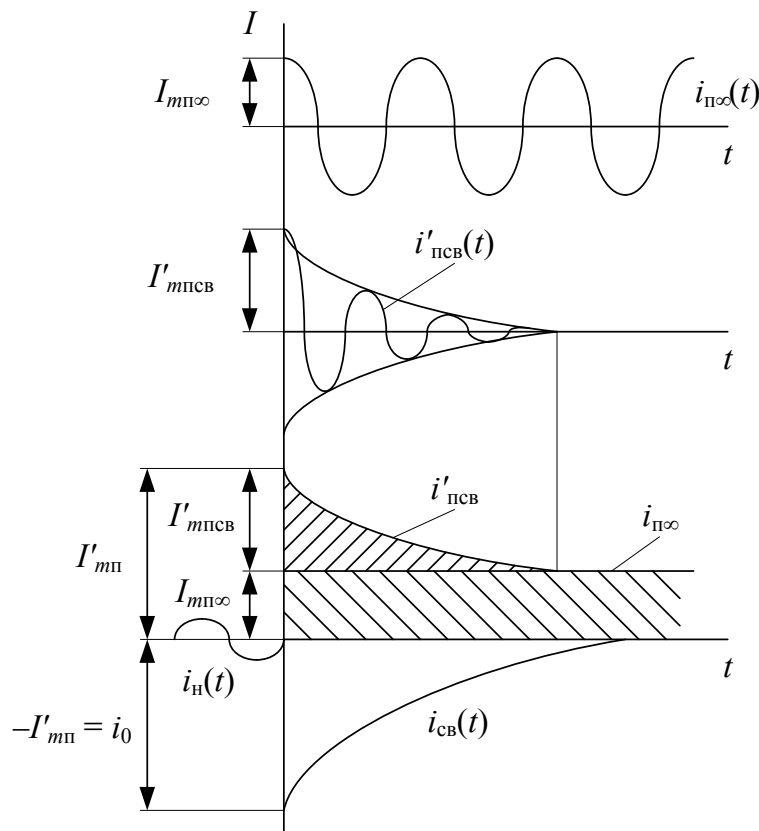


Рис. 4.11

Запишем, чему равны отдельные составляющие тока.

Максимум тока имеет место, когда $(\alpha - \varphi_k) = \frac{\pi}{2}$ (см. раздел 3.7).

$$\begin{aligned} i_{\Pi\infty}(t) &= I_{m\Pi\infty} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) = I_{m\Pi\infty} \cos \omega t = \\ &= \frac{E_{*\infty}}{x'_{*d} + x_{*BH}} \cos \omega t, \end{aligned} \quad (4.20)$$

$$\begin{aligned} i'_{\text{ПСВ}}(t) &= I'_{m\text{ПСВ}} e^{-\frac{t}{\tau'}} \cos \omega t = (I'_{m\Pi} - I_{m\Pi\infty}) e^{-\frac{t}{\tau'}} \cos \omega t = \\ &= \left(\frac{E'_*}{x'_{*d} + x_{*BH}} - \frac{E_{*\infty}}{x'_{*d} + x_{*BH}} \right) e^{-\frac{t}{\tau'}} \cos \omega t; \end{aligned} \quad (4.21)$$

$$\begin{aligned} i'_{\Pi}(t) &= i_{\Pi\infty}(t) + i'_{\text{ПСВ}}(t) = \\ &= \left[\frac{E_{*\infty}}{x'_{*d} + x_{*BH}} + \left(\frac{E'_*}{x'_{*d} + x_{*BH}} - \frac{E_{*\infty}}{x'_{*d} + x_{*BH}} \right) e^{-\frac{t}{\tau'}} \right] \cos \omega t; \end{aligned} \quad (4.22)$$

$$i_{\text{СВ}}(t) = i_0 e^{-\frac{t}{\tau_a}}. \quad (4.23)$$

Для выяснения начального значения свободной составляющей i_0 рассмотрим момент $t = 0$.

В этом случае:

$$i(0) = i'_{\Pi}(0) + i_{\text{СВ}}(0);$$

$$i(0) = i_{\Pi}(0) = 0;$$

$$i_{\text{СВ}}(0) = i_0;$$

$$i_0 = -i'_{\Pi}(0) = -I'_{m\Pi} = -\frac{E'_*}{x'_{*d} + x_{*BH}};$$

$$i_{\text{СВ}}(t) = -I'_{m\Pi} e^{-\frac{t}{\tau_a}}. \quad (4.24)$$

Тогда

$$\begin{aligned} i'(t) &= \left[\frac{E_{*\infty}}{x'_{*d} + x_{*BH}} + \left(\frac{E'_*}{x'_{*d} + x_{*BH}} - \frac{E_{*\infty}}{x'_{*d} + x_{*BH}} \right) e^{-\frac{t}{\tau'}} \right] \cos \omega t - \\ &\quad - \frac{E'_*}{x'_{*d} + x_{*BH}} e^{-\frac{t}{\tau_a}}. \end{aligned} \quad (4.25)$$

Или иначе можно записать

$$i'(t) = \left[I_{m\infty} + (I'_m - I_{m\infty}) e^{-\frac{t}{\tau'}} \right] \cos \omega t - I'_m e^{-\frac{t}{\tau_a}}. \quad (4.26)$$

Из последнего выражения видно, что полный ток СМ содержит две аperiodические составляющие тока, одна из них изменяется как по периодическому, так и экспоненциальному закону, другая – только по экспоненциальному. Число свободных (аperiodических) составляющих тока равно числу обмоток СМ.

Постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ

$$\tau_a = \frac{x_2}{\omega R}, \quad (4.27)$$

где x_2 – сопротивление обратной последовательности генератора;

R – активное сопротивление обмотки статора.

Для генераторов без успокоительной обмотки ток ротора состоит из трех составляющих (рис. 4.12):

$$i_p = i_B + i_{всв} + i_{впсв}. \quad (4.28)$$

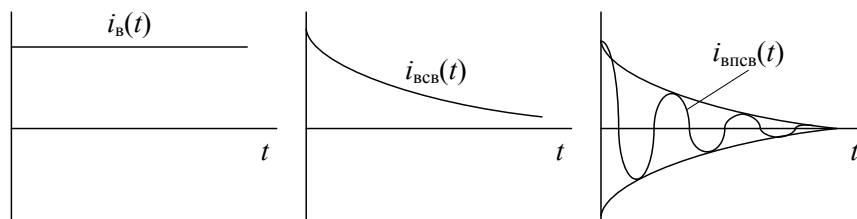


Рис. 4.12

На рис. 4.11 приведено изменение во времени составляющих тока одной фазы статора генератора при внезапном КЗ за внешним постоянным индуктивным сопротивлением при отсутствии успокоительного контура на роторе (показано изменение тока $i'(t)$ для случая, когда свободная составляющая тока статора в этой фазе имеет максимальное значение в начальный момент времени).

4.4. Составляющие тока короткого замыкания синхронной машины с успокоительными обмотками

При внезапном КЗ СМ с успокоительными обмотками, на увеличение реакции статора ее ротор отвечает изменением тока в двух обмотках: увеличением тока в обмотке возбуждения на величину ΔI_{*B} , который затухает с постоянной времени τ' и увеличением тока в успокоительной обмотке на величину ΔI_{*YO} , который затухает с постоянной времени τ'' (рис. 4.13).

$$\Delta \Psi_{*B} = \Delta \Psi_{*B} e^{-\frac{t}{\tau'}}, \quad (4.29)$$

$$\Delta \Psi_{*YO} = \Delta \Psi_{*YO} e^{-\frac{t}{\tau''}}. \quad (4.30)$$

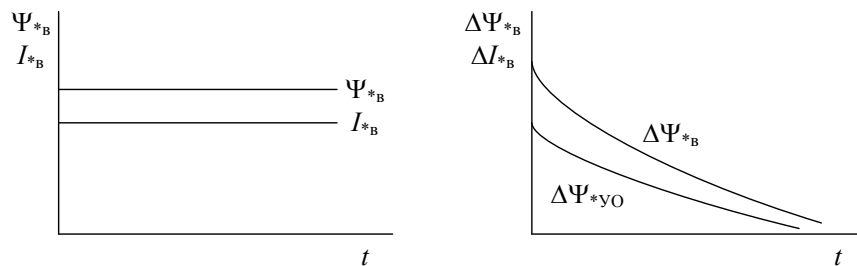


Рис. 4.13

Рассмотрим картину изменения токов статора при внезапном КЗ.

Потокосцепления, связанные с ротором, будут наводить в статоре составляющие периодического тока. Этим составляющих будет три:

$$i''_{\Pi}(t) = i_{\Pi\infty}(t) + i'_{\text{псв}}(t) + i''_{\text{псв}}(t). \quad (4.31)$$

Полный ток КЗ будет состоять из периодической составляющей и свободного тока:

$$i(t) = i''_{\Pi}(t) + i_{\text{св}}(t). \quad (4.32)$$

Запишем, чему равны отдельные составляющие тока в этом случае:

$$i_{\Pi\infty}(t) = I_{m\Pi\infty} \cos \omega t = \frac{E_{*o}}{x_{*d} + x_{*BH}} \cos \omega t; \quad (4.33)$$

$$\begin{aligned}
 i'_{\text{ПСВ}}(t) &= I'_{\text{мПСВ}} e^{-\frac{t}{\tau'}} \cos \omega t = (I'_{\text{мП}} - I_{\text{мП}\infty}) e^{-\frac{t}{\tau'}} \cos \omega t = \\
 &= \left(\frac{E'_*}{x'_{*d} + x_{*\text{ВН}}} - \frac{E_{*\infty}}{x_{*d} + x_{*\text{ВН}}} \right) e^{-\frac{t}{\tau'}} \cos \omega t;
 \end{aligned} \tag{4.34}$$

$$\begin{aligned}
 i''_{\text{ПСВ}}(t) &= I''_{\text{мПСВ}} e^{-\frac{t}{\tau''}} \cos \omega t = (I''_{\text{мП}} - I'_{\text{мП}}) e^{-\frac{t}{\tau''}} \cos \omega t = \\
 &= \left(\frac{E''_*}{x''_{*d} + x_{*\text{ВН}}} - \frac{E'_*}{x'_{*d} + x_{*\text{ВН}}} \right) e^{-\frac{t}{\tau''}} \cos \omega t;
 \end{aligned} \tag{4.35}$$

$$\begin{aligned}
 i''_{\text{П}}(t) &= \left[\frac{E_{*\infty}}{x_{*d} + x_{*\text{ВН}}} + \left(\frac{E'_*}{x'_{*d} + x_{*\text{ВН}}} - \frac{E_{*\infty}}{x_{*d} + x_{*\text{ВН}}} \right) e^{-\frac{t}{\tau'}} + \right. \\
 &\quad \left. + \left(\frac{E''_*}{x''_{*d} + x_{*\text{ВН}}} - \frac{E'_*}{x'_{*d} + x_{*\text{ВН}}} \right) e^{-\frac{t}{\tau''}} \right] \cos \omega t;
 \end{aligned} \tag{4.36}$$

$$i_{\text{СВ}}(t) = i_0 e^{-\frac{t}{\tau_a}}. \tag{4.37}$$

Для определения значения i_0 рассмотрим момент времени $t = 0$.

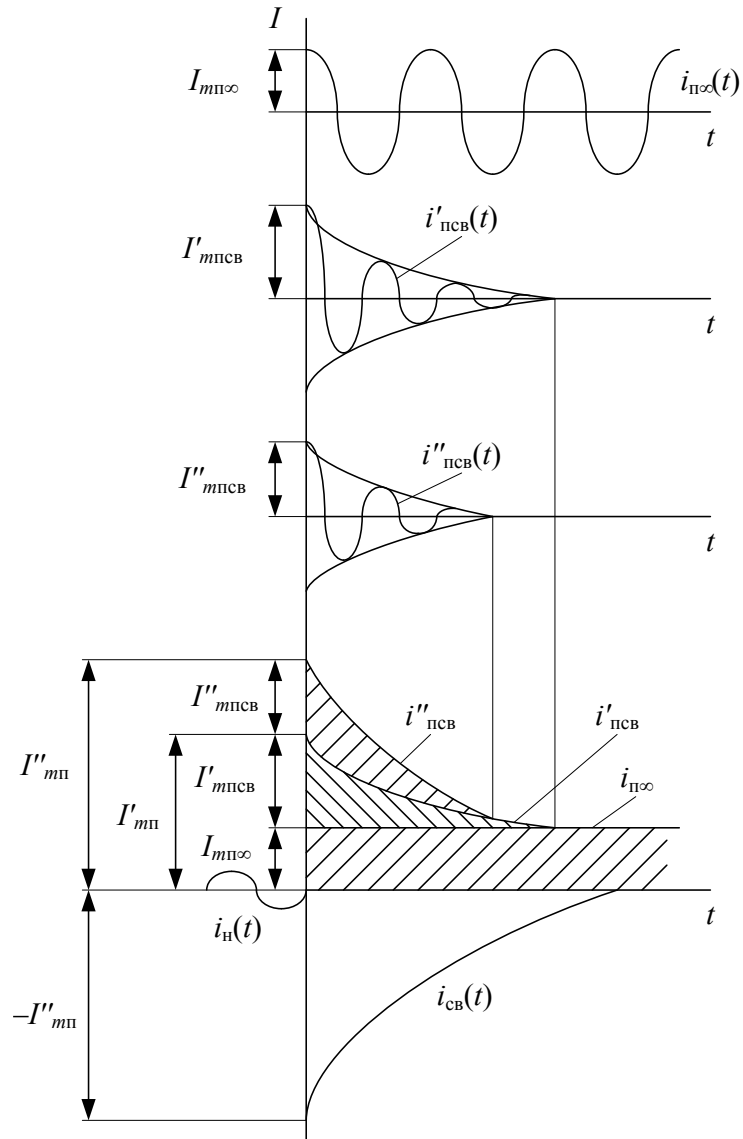


Рис. 4.14

Тогда

$$i(0) = i''_{\Pi}(0) + i_{\text{св}}(0);$$

$$i(0) = i_{\text{н}}(0) = 0, \quad i_{\text{св}}(0) = i_0;$$

$$i''_{\Pi}(0) = I''_{m\Pi} = \frac{E''_{*m}}{x''_{*d} + x_{*вн}};$$

$$i_0 = -i''_{\Pi}(0) = -I''_{m\Pi} = -\frac{E''_{*m}}{x''_{*d} + x_{*вн}};$$

$$i_{\text{св}}(t) = -\frac{E''_{*m}}{x''_{*d} + x_{*вн}} e^{-\frac{t}{\tau_a}}. \quad (4.38)$$

Закон изменения полного тока будет описываться следующим выражением:

$$i(t) = \left[\frac{E_{*\infty}}{x_{*d} + x_{*BH}} + \left(\frac{E'_*}{x'_{*d} + x_{*BH}} - \frac{E_{*\infty}}{x_{*d} + x_{*BH}} \right) e^{-\frac{t}{\tau'}} + \right. \\ \left. + \left(\frac{E''_*}{x''_{*d} + x_{*BH}} - \frac{E'_*}{x'_{*d} + x_{*BH}} \right) e^{-\frac{t}{\tau''}} \right] \cos \omega t - \frac{E''_*}{x''_{*d} + x_{*BH}} e^{-\frac{t}{\tau_a}}. \quad (4.39)$$

Или иначе можно записать

$$i''(t) = \left[I_{m\infty} + (I'_m - I_{m\infty}) e^{-\frac{t}{\tau'}} + (I''_m - I'_m) e^{-\frac{t}{\tau''}} \right] \cos \omega t - I''_m e^{-\frac{t}{\tau_a}}. \quad (4.40)$$

Из последнего выражения видно, что полный ток СМ содержит три апериодические составляющие тока, две из них изменяются как по периодическому, так и по экспоненциальному закону, третья изменяется только по экспоненциальному закону. Число свободных (апериодических) токов соответствует числу контуров (обмоток) – обмотка статора, возбуждения, успокоительная обмотка.

Постоянная времени затухания свободного тока в успокоительной обмотке

$$\tau'' = \tau' \frac{x''_{*d}}{x'_{*d}} = \tau_B \frac{x''_{*d}}{x_{*d}}. \quad (4.41)$$

Ток ротора в этом случае состоит из пяти составляющих (рис. 4.15).

$$i_p = i_B + i_{BCB} + i_{BPCB} + i_{YOCB} + i_{YOPCB}. \quad (4.42)$$

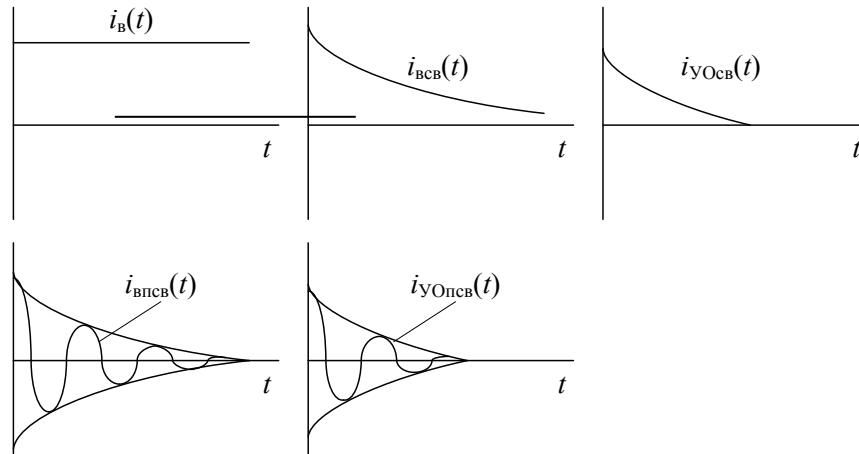


Рис. 4.15

На рис. 4.14 приведено изменение во времени составляющих тока одной из фаз статора генератора при внезапном КЗ за внешним постоянным индуктивным сопротивлением $x_{\text{вн}}$ при наличии успокоительного контура на роторе (показано изменение тока $i(t)$ и его отдельных составляющих для случая, когда свободная составляющая тока статора в этой фазе имеет максимальное значение в начальный момент времени).

5. Влияние и учет нагрузки в начальный момент короткого замыкания

В начальный момент переходного процесса нагрузка в зависимости от места подключения ведет себя по-разному. Для выяснения влияния нагрузки в зависимости от места подключения рассмотрим следующую схему (рис. 5.1).

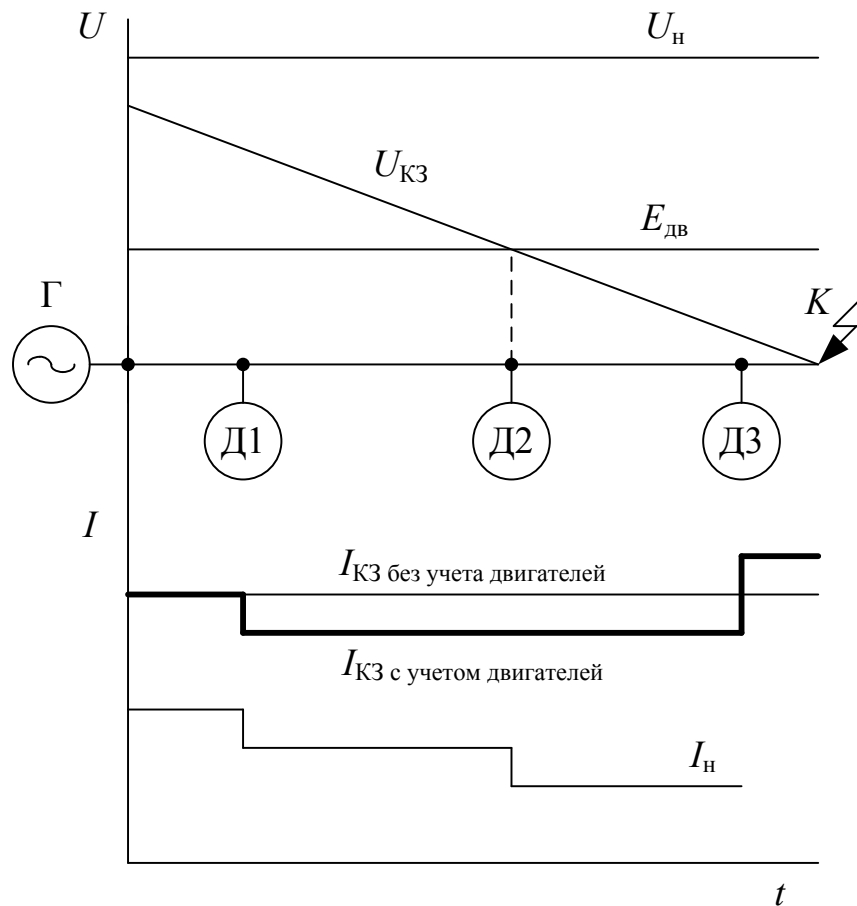


Рис. 5.1

Из рассматриваемого рисунка видно, что в зависимости от места КЗ и места подключения нагрузки она может оказывать различное влияние на величину тока КЗ. Двигатель Д1 является потребляющей ветвью, так как $U_{KЗ} > E_{дв}$, двигатель Д2 никак не влияет на величину тока КЗ, так как $U_{KЗ} = E_{дв}$, а двигатель Д3 подпитывает точку КЗ, то есть увеличивает ток КЗ, так как $E_{дв} > U_{KЗ}$.

В связи с изложенным, в первую очередь в начальный момент переходного процесса учету подлежит нагрузка, подключенная вблизи места повреждения. Чтобы установить, в каких случаях нагрузка переходит в

начальный момент переходного процесса в генераторный режим, исследовалась следующая схема (рис. 5.2).

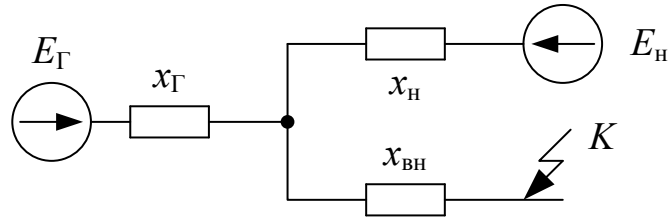


Рис. 5.2

Было установлено, что при $x_{*ВН} = 0,46$ нагрузка не влияет, при меньших значениях подпитывает точку КЗ, при больших значениях потребляет ток от генератора и уменьшает ток КЗ.

$x_{*ВН} = 0,46$ – сопротивление внешней сети (от точки КЗ до места подключения нагрузки), выраженное в относительных единицах при номинальных данных нагрузки. Если $x_{*ВН} < 0,46$, то следует учитывать нагрузку, при значениях $x_{*ВН} > 0,46$ нагрузку можно не учитывать (рис. 5.3).

Всю нагрузку, которая подлежит учету в начальный момент переходного процесса, можно разделить на три группы: СД и СК, крупные АД, обобщенная мелкомоторная нагрузка.

Синхронные двигатели (СД) и синхронные компенсаторы (СК), если они в начальный момент КЗ работали в режиме перевозбуждения, учитываются точно так же, как и синхронные генераторы, то есть сверхпереходной ЭДС $E'' = U_* + I_{*H} x_{*d}'' \sin \varphi$ и сопротивлением $x_{*d}'' \frac{S_6}{S_H}$. Если СД и СК работали с недо возбуждением, то их ЭДС была меньше подведенного напряжения, то есть $E'' = U_* - I_{*H} x_{*d}'' \sin \varphi$ и они, в зависимости от места подключения, могут либо подпитывать точку КЗ, либо отсасывать ток КЗ от аварийной ветви.

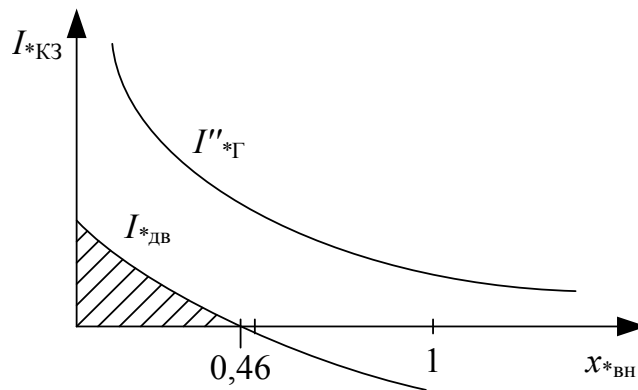


Рис. 5.3

Крупные асинхронные двигатели ($P > 100$ кВт), в зависимости от места подключения, учитываются сверхпереходной ЭДС $E''_{дв}$ и сверхпереходным сопротивлением, которое необходимо приводить к базисным условиям:

$$x''_{*дв} = \frac{1}{I_{*пуск}},$$

ЭДС $E''_{дв}$ определяется из векторной диаграммы двигателя.

$$E''_{дв} = \sqrt{(U_* \cos \varphi)^2 + (U_* \sin \varphi - I_{*н} x''_{*дв})^2} \quad (5.1)$$

или упрощенно

$$E''_{дв} \cong U_* - I_{*н} x''_{*дв} \sin \varphi, \quad (5.2)$$

если за величину ЭДС брать проекцию вектора $E''_{дв}$ на вектор напряжения.

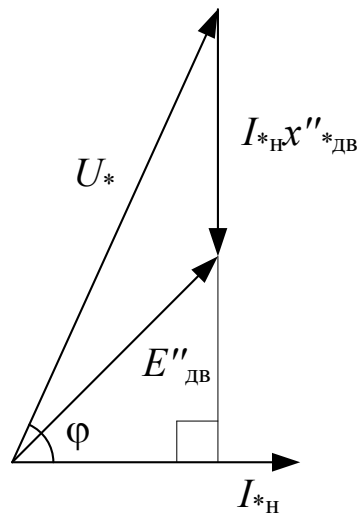


Рис. 5.4

Мелкомоторная (обобщенная) нагрузка учитывается в практических расчетах, с учетом ее места подключения, обобщенными параметрами $E''_{*н} = 0,85$ и $x_{*н} = 0,35$, которое необходимо приводить к базисным условиям.

В начальный момент КЗ нельзя при расчете тока объединять (эквивалентировать) ветви нагрузки с генераторными ветвями. Это объясняется тем, что значение ударного коэффициента k_y для генераторных и нагрузочных ветвей различно. В первую очередь это относится к нагрузочным ветвям, подключенным в точке КЗ (рис. 5.5).

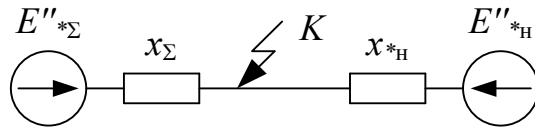


Рис. 5.5

$$I''_* = I''_{*\Gamma} + I''_{*H};$$

$$I''_{*H} = \frac{E''_{*H}}{x_{*H}};$$

$$I''_{\Gamma} = I''_{*\Gamma} \cdot I_{\sigma};$$

$$I''_H = I''_{*H} \cdot I_{\sigma};$$

$$i_y = \sqrt{2} (k_{y\Gamma} I''_{\Gamma} + k_{yH} I''_H).$$

Для нагрузочной ветви, основу которой составляет СД и СК, $k_{yH} = 1,75-1,9$, для крупных АД $k_{yH} = 1,4-1,6$, для мелкомоторной (обобщенной) нагрузки $k_{yH} = 1$.

6. Учет системы бесконечной мощности при расчете переходных процессов

В реальных схемах отдельные источники могут быть настолько удалены от места КЗ, что они никаким образом не реагируют на протекание переходного процесса, то есть их параметры в течение всего переходного процесса остаются неизменными. Такие источники называются системой бесконечной мощности. Примером такого источника могут служить шины подстанций 10 кВ при КЗ в сети 0,4 кВ (рис. 6.1).

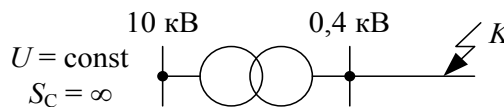


Рис. 6.1

Если рассматривается КЗ в сложной схеме, то такую схему следует разделить на две части, выделив отдельные источники в систему бесконечной мощности, а остальные при этом будут учитываться своими

параметрами в соответствии с рассматриваемой стадией переходного процесса (рис. 6.2).

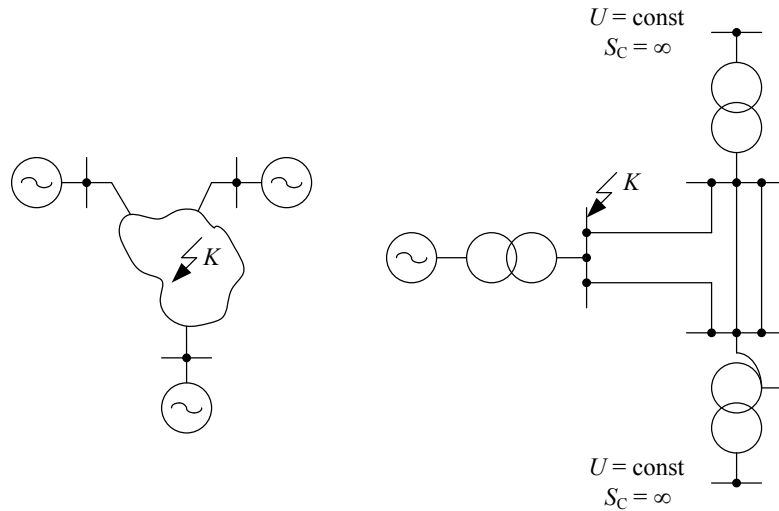


Рис. 6.2

Возможны три способа задания системы бесконечной мощности:

1. Задается конечная мощность системы и ее сопротивление в относительных единицах, приведенное к ее мощности (рис. 6.3).

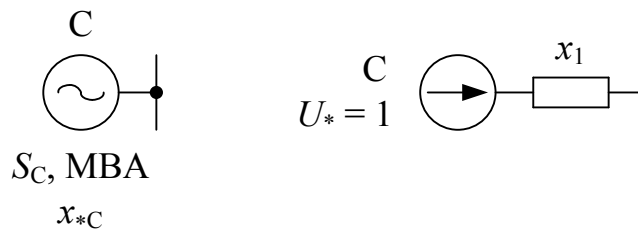


Рис. 6.3

$$x_1 = x_{*C} \frac{S_0}{S_C}$$

2. Задается мощность короткого замыкания на шинах системы (рис. 6.4).

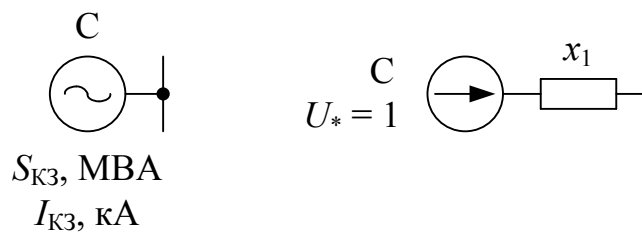


Рис. 6.4

$$x_1 = \frac{S_6}{S_{КЗ}} = \frac{I_6}{I_{КЗ}}, \quad x_C = \frac{U_{срн}}{\sqrt{3}I_{КЗ}} = \frac{U_{срн}^2}{S_{КЗ}}, \quad (6.1)$$

$$x_{*C} = x_C \frac{S_6}{U_{срн}^2}, \quad x_{*C} = \frac{U_{срн}^2}{S_{КЗ}} \frac{S_6}{U_{срн}^2} = \frac{S_6}{S_{КЗ}} = x_1.$$

В качестве мощности КЗ системы $S_{КЗ}$ часто применяется мощность отключения выключателя, установленного на подстанции, соединяющей рассматриваемую часть системы и систему бесконечной мощности.

3. Бывают случаи, когда о таком источнике известно лишь то, что в данной точке системы (схемы сети) параметры остаются неизменными при КЗ в любой точке остальной сети, то есть эта шина (точка) считается системой бесконечной мощности $S_C = \infty$ (рис. 6.5).

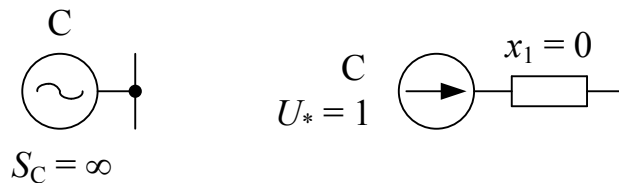


Рис. 6.5

В силу того, что напряжение на шинах системы бесконечной мощности остается постоянным в течение всего переходного процесса, то и ток от этого луча для любого момента времени будет определяться одинаково:

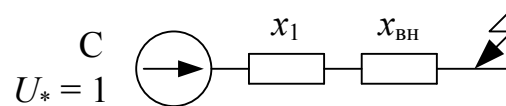


Рис. 6.6

$$I_*'' = I_*' = I_{*\infty} = \frac{U_*}{x_1 + x_{ВН}} = \frac{1}{x_1 + x_{ВН}}.$$

7. Практические методы расчета переходных процессов

В реальных схемах с несколькими генераторами точный расчет процесса КЗ чрезвычайно сложен. Изменения свободных токов в каждом из генераторов взаимосвязаны друг с другом. При наличии АВР взаимная связь имеет место и в изменениях периодических составляющих токов. Поэтому в тех случаях, когда не требуется большой точности результатов расчета, используются практические методы, которые позволяют с приемлемой точностью (ошибка 10–15 %) вычислить значение тока в аварийной ветви в произвольный момент переходного процесса.

7.1. Метод расчетных кривых

Периодическая составляющая тока КЗ в любой момент времени после появления КЗ может быть рассчитана с использованием специально построенных кривых.

Расчетные кривые представляют собой зависимость относительного значения периодической составляющей тока КЗ от времени переходного процесса и электрической удаленности точки КЗ от источника питания, то есть

$$I_{*пт} = f(t, x_{*расч}). \quad (7.1)$$

Расчетные кривые построены для типовых ТГ и ГГ с АВР и без АВР и имеют вид, представленная на рис. 7.1.

Для построения расчетных кривых использовалась следующая схема изображена на рис. 7.2.

Здесь принято, что генератор до КЗ работал с номинальной нагрузкой и $\cos \varphi = 0,8$. Удаленность точки КЗ учитывалась величиной $x_{*вн}$:

$$x_{*расч} = x_{*д}'' + x_{*вн}, \quad (7.2)$$

где $x_{*расч}$ – сопротивление луча, приведенное к номинальным данным, то есть

$$x_{*расч} = x_{*б} \frac{S_{н}}{S_{б}}.$$

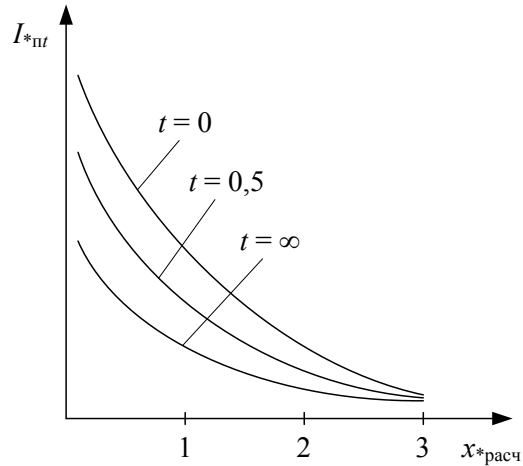


Рис. 7.1

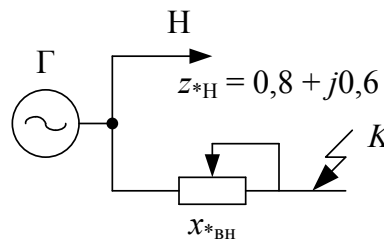


Рис. 7.2

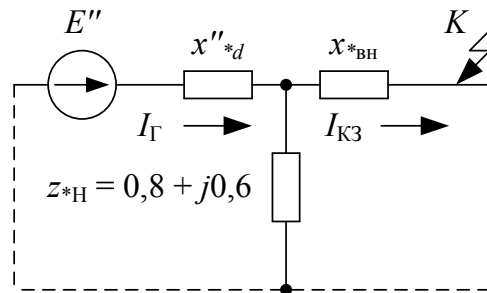


Рис. 7.3

Кривые построены для $x_{*расч} \leq 3$, так как при $x_{*расч} > 3$ периодическая составляющая тока КЗ изменяется столь незначительно, что источник, удаленный от точки КЗ на такую величину сопротивления, представляет собой не что иное, как систему бесконечной мощности. И поэтому ток от него для любого момента времени одинаков (кривые сливаются в одну):

$$I''_{*п} = I'_{*п} = I_{*пт=\infty} = \frac{U_*}{x_{*расч}} = \frac{1}{x_{*расч}}. \quad (7.3)$$

7.2. Порядок расчета переходных процессов по расчетным кривым

7.2.1. Расчет по общему затуханию

При расчете по общему затуханию не учитывают разноудаленность генераторов от места повреждения и их разнотипность. Значит в процессе преобразования схемы замещения все генераторы могут быть заменены одним эквивалентным генератором суммарной мощности.

1. Для заданной расчетной схемы энергосистемы составляют схему замещения, в которую генераторы вводят сопротивлениями x''_{*d} и на генераторных лучах записывают полную мощность генератора, то есть S (МВА). Нагрузки не учитываются (отбрасываются), так как они учтены при построении кривых.

2. Задаются базисными условиями S_0 и $U_0 = U_{срн}$. Приводят сопротивления всех элементов схемы замещения, в том числе и x''_{*d} , к принятым базисным условиям.

3. Сворачивают схему к простейшему виду (рис. 7.4), используя методы преобразования схем.

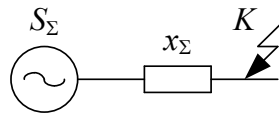


Рис. 7.4

$$S_\Sigma = S_1 + S_2 + \dots + S_n \text{ МВА.}$$

4. Для того чтобы воспользоваться расчетными кривыми, сопротивление x_Σ , определенное при базисных условиях, пересчитывают к номинальным условиям, так как для них построены кривые

$$x_{\Sigma\text{расч}} = x_\Sigma \frac{S_\Sigma}{S_0}. \quad (7.4)$$

5. Зная $x_{\Sigma\text{расч}}$ и используя кривые для типа генераторов, мощность которых в схеме преобладает, определяют относительное значение периодической составляющей тока КЗ для интересующих моментов времени $I_{*пт}$. Если $x_{\Sigma\text{расч}} > 3$, то периодическая составляющая тока КЗ для любого момента времени определяется как

$$I''_{*пт} = I'_{*пт} = I_{*пт\infty} = \frac{1}{x_{\Sigma\text{расч}}}. \quad (7.5)$$

6. Определяют действительное значение периодической составляющей тока для интересующих моментов времени:

$$I_{шт} = I_{*шт} I_{н\Sigma}, \text{ кА}, \quad (7.6)$$

где $I_{н\Sigma} = \frac{S_{\Sigma}}{\sqrt{3}U_{срн}}$ – номинальный суммарный ток всех генераторов, приведенный к среднономинальному напряжению той ступени, на которой находится точка КЗ.

Если в схеме имеется источник, представляющий собой систему бесконечной мощности, то его следует выделить в отдельную ветвь, используя метод коэффициентов токораспределения.

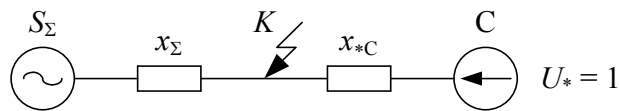


Рис. 7.5

7. Ток от луча системы определится как

$$I_{*c} = \frac{U_*}{x_{*c}};$$

$$I_c = I_{*c} I_6, \text{ кА}, \quad (7.7)$$

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_{срн}}, \text{ кА}.$$

где $U_{срн}$ – напряжение той ступени, на которой находится точка КЗ.

8. Для уточнения тока КЗ в начальный (сверхпереходный режим, $t = 0$) момент КЗ учитывают сверхпереходный ток от луча нагрузки, подключенной к месту КЗ (рис. 7.6).

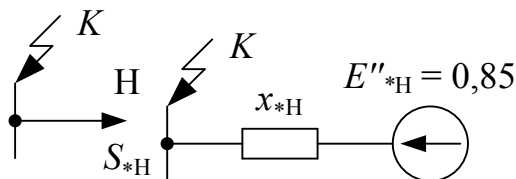


Рис. 7.6

$$I''_{*H} = \frac{E''_{*H}}{x_{*H}};$$

$$I''_H = I''_{*H} I_{HH} \text{ (кА); (7.8)}$$

$$I_{HH} = \frac{S_{HH}}{\sqrt{3}U_{cpH}} \text{ (кА)},$$

где U_{cpH} – напряжение в точке КЗ;

S_{HH} – номинальная мощность нагрузки.

7.2.2. Расчет с учетом индивидуальных коэффициентов затухания

Для повышения точности расчета при расчете по расчетным кривым необходимо учитывать каждый из генераторов в точке КЗ обособленно. Допускается в отдельных случаях эквивалентировать однотипные генераторы (согласно рис. 7.7), если соблюдаются следующие условия:

$$0,4 \leq \frac{S_1 x_1}{S_2 x_2} \leq 2,5.$$

$$S_3 = S_1 + S_2,$$

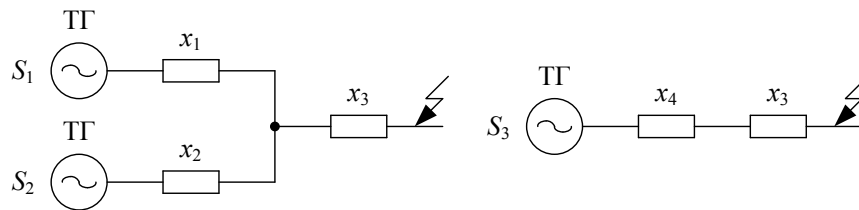


Рис. 7.7

В самом общем случае имеем схему энергосистемы (рис. 7.8).

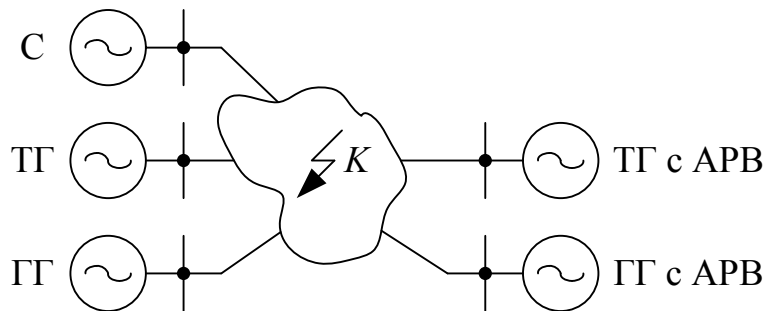


Рис. 7.8

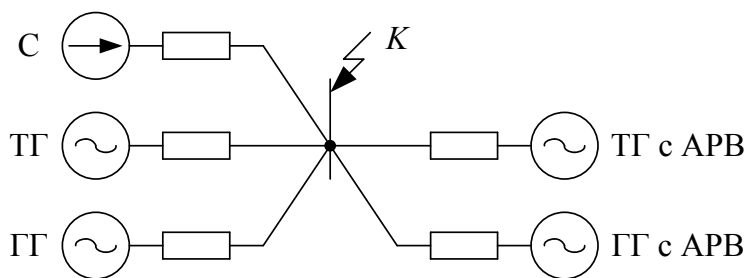


Рис. 7.9

Порядок расчета с учетом индивидуальных коэффициентов затухания, учитывающих разнотипность и разноудаленность источников питания от места повреждения, следующий:

1. Выясняют возможность эквивалентирования однотипных генераторов (рис. 7.10).

Все генераторы однотипны и одинаковой мощности. При КЗ в K_1 и K_2 генераторы Γ_1 и Γ_2 можно заменить одним суммарной мощности и эквивалентным сопротивлением. Генератор Γ_2 при этом находится в особых (отличных) условиях. При КЗ в точках K_3 и K_4 все генераторы находятся в особых условиях, отличных друг от друга, и поэтому объединение (эквивалентирование) не допускается.

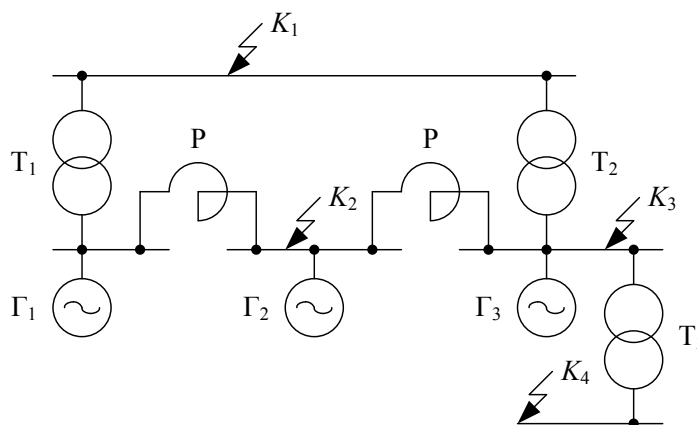


Рис. 7.10

2. Задаются базисными условиями, составляют схему замещения, параметры всех элементов приводят к принятым базисным условиям. В схему замещения генераторы вводятся сверхпереходными сопротивлениями x''_d , нагрузки не учитываются, аналогично, как и при расчете по общему затуханию.

3. Используя известные методы преобразования схем, схему замещения приводят к простейшему виду (рис. 7.11).

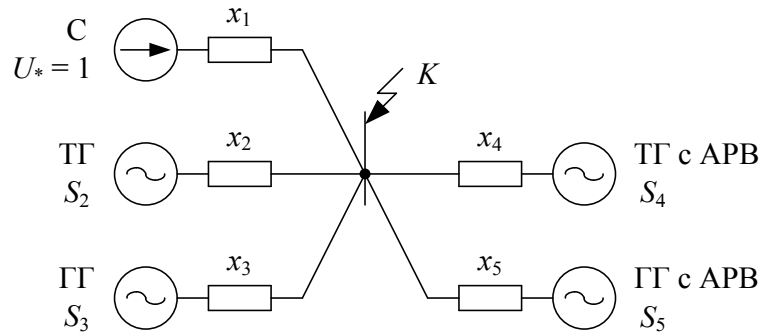


Рис. 7.11

4. Определяют расчетные значения сопротивлений каждого из лучей, исключая луч системы

$$x_{\text{расч.}i} = x_i \frac{S_i}{S_6}$$

5. Зная $x_{\text{расч.}i}$ и используя соответствующие расчетные кривые, определяют относительные значения периодических составляющих токов для интересующих нас моментов времени, для каждого из лучей, исключая луч системы (рис. 7.12).

Если $x_{\text{расч.}i} > 3$, то значение периодической составляющей тока для любого момента времени будет определяться как

$$I_{*птi} = \frac{1}{x_{\text{расч.}i}}$$

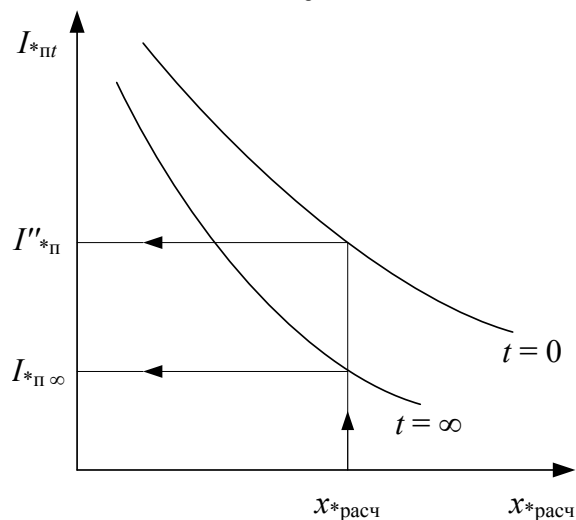


Рис. 7.12

6. Определяют номинальные токи каждого из лучей, приведенные к той ступени напряжения, на которой находится точка КЗ:

$$I_{ni} = \frac{S_{ni}}{\sqrt{3}U_{срн}}, \text{ кА.}$$

7. Определяют относительное значение тока для любого момента времени от луча системы:

$$I_{*Ct} = \frac{1}{x_1}.$$

8. Определяют базисный ток:

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_{срн}}, \text{ кА.}$$

9. Определяют действительные значения тока КЗ в точке для интересующих нас моментов времени:

$$I'' = I_{пт=0} = \sum_{i=1}^n I_{*пт=0i} I_{ni} + I_{*Ct} I_6, \text{ кА;} \quad (7.9)$$

$$I_\infty = I_{пт=\infty} = \sum_{i=1}^n I_{*пт=\infty i} I_{ni} + I_{*Ct} I_6, \text{ кА;} \quad (7.10)$$

$$i_y = \sqrt{2}k_y I'' = \sqrt{2} \left(1 + e^{-\frac{t}{\tau_a}} \right) I'', \text{ кА.} \quad (7.11)$$

Величиной k_y учитывается наличие свободной составляющей тока в полном токе.

7.3. Расчет токов короткого замыкания по методу типовых кривых

Для выбора коммутационной аппаратуры (выключателей) при проектировании станций и подстанций необходимо знать значения токов КЗ для момента времени отключения КЗ. Для сложных схем при расчете периодической составляющей токов КЗ для времени $t \leq 0,5$ с рекомендуется использовать метод типовых кривых.

Типовые кривые (рис. 7.13) используют при определении действующего значения периодической составляющей тока КЗ для моментов времени до 0,5 с и удаленности точки КЗ от источника питания $\frac{I''_{пГ}}{I_{Г\text{ ном}}} \geq 2$, то есть когда точка КЗ находится на выводах генератора или за трансформатором связи с энергосистемой. При $\frac{I''_{пГ}}{I_{Г\text{ ном}}} < 2$ точка КЗ является электрически удаленной и в этом случае:

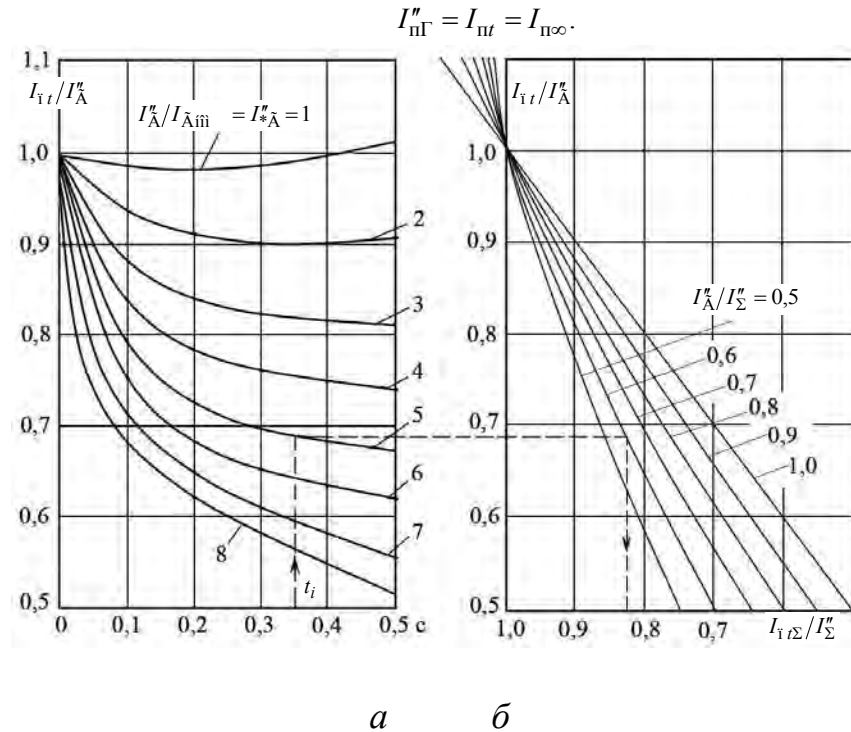


Рис. 7.13

Типовые кривые имеют вид (рис. 7.13, а)

$$\frac{I_{пт}}{I_{Г}''} = f(t) \quad \text{при} \quad \frac{I_{Г}''}{I_{Г\text{ ном}}} = \text{var},$$

и семейство дополнительных зависимостей (рис 7.13, б)

$$\frac{I_{пт\Sigma}}{I_{\Sigma}''} = f\left(\frac{I_{пт}}{I_{Г}''}\right) \quad \text{при} \quad \frac{I_{Г}''}{I_{\Sigma}''} = \text{var},$$

где $I_{Г}''$, $I_{пт}$ — соответственно сверхпереходной ток генератора и периодическая составляющая сверхпереходного тока для момента времени t в генерирующей ветви;

$I_{Г\text{ ном}}$ – номинальный ток генератора (источника), приведенный к ступени напряжения в точке КЗ:

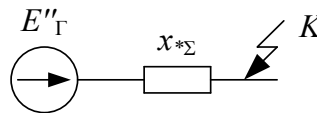
$$I_{Г\text{ ном}}'' = \frac{S_{нг}}{\sqrt{3}U_{срн}};$$

$I_{пг}''$ – суммарный сверхпереходный ток от всех источников (генераторы и система);

$I_{пт\Sigma}$ – периодическая составляющая тока КЗ в момент времени t , создаваемая всеми источниками.

Для ветви независимого питания генератором точки КЗ, периодическую составляющую тока КЗ определяют в следующем порядке:

1. Составляют схему замещения и определяют $x_{*\Sigma}$ до точки КЗ (генератор в схему замещения вводят сопротивлением x_{*d}'' , нагрузку не учитывают).



2. Определяют $I_{пг}''$ в месте КЗ

$$I_{пг}'' = \frac{E''_Г}{x_{*\Sigma}} I_б, \text{ кА.} \quad (7.12)$$

3. Определяют электрическую удаленность точки КЗ $\frac{I_{пг}''}{I_{Г\text{ ном}}''}$, если это число получается дробным, то его округляют до ближайшего целого, или производят интерполяцию кривых.

4. Зная это отношение (удаленность) и интересующий момент времени t , по кривым определяют (рис. 7.13, а) отношение

$$\frac{I_{пт}}{I_{пг}''}. \quad (7.13)$$

5. Периодическая составляющая тока КЗ в момент времени t будет

$$I_{пт} = \left(\frac{I_{пт}}{I_{пг}''} \right) I_{пг}'' \quad (7.14)$$

Аналогично можно использовать типовые кривые для расчета периодической составляющей тока КЗ в случае питания точки КЗ

несколькими независимыми генерирующими ветвями. В этом случае $I_{пт} = \sum_{i=1}^n I_{птi}$, где i – количество отдельных ветвей.

6. Определяют значение апериодической (свободной) составляющей тока в момент времени t

$$i_a(t) = \sqrt{2} I_{пт}'' e^{-\frac{t}{\tau_a}}, \quad (7.15)$$

где

$$\tau_a = \frac{x_{\Sigma}}{\omega R_{\Sigma}}; \quad (7.16)$$

x_{Σ} , R_{Σ} – соответственно индуктивное и активное сопротивление суммарной питающей ветви.

Если питание точки КЗ осуществляется от n источников, то

$$i_a(t) = \sum_{i=1}^n i_a(t)_i = \sum_{i=1}^n I_{птi}'' e^{-\frac{t}{\tau_{ai}}}. \quad (7.17)$$

Если связь генератора и системы с точкой КЗ осуществляется через общее сопротивление $x_{*к}$, а удаленность точки КЗ от генератора такова, что $\frac{I_{пт}''}{I_{\Gamma \text{ ном}}} > 2$, то необходимо учитывать изменение во времени действующего значения периодической составляющей тока от генератора в точке КЗ (рис. 7.14).

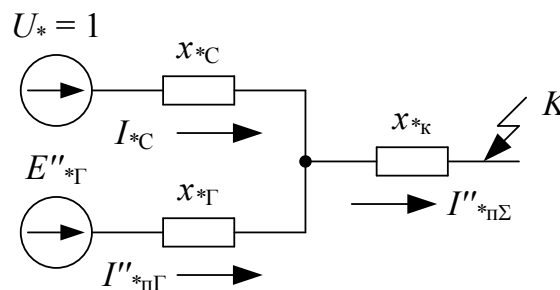


Рис. 7.14

В этом случае расчет выполняют в следующем порядке:

1. Составляют схему замещения, преобразовывают ее и находят E_{Σ}'' , $x_{*рез}$ и I_{Σ}'' (рис. 7.15).

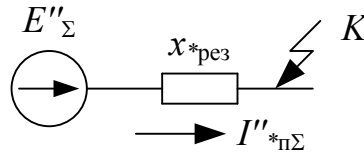


Рис. 7.15

$$I''_{пΣ} = \frac{E''_{\Sigma}}{x_{*рез}} I_{б}, \text{ кА.} \quad (7.18)$$

2. Определяют начальное значение периодической составляющей тока в ветви генератора

$$I''_{пГ} = \frac{E''_{*Г} I_{б} - I''_{пΣ} x_{*К}}{x_{*Г}}, \text{ кА.} \quad (7.19)$$

3. Определяют отношения

$$\frac{I''_{пГ}}{I_{Г\text{ ном}}} \text{ и } \frac{I''_{пГ}}{I''_{\Sigma}}.$$

4. По кривой $\frac{I_{пт}}{I''_{пГ}} = f(t)$ при известном значении $\frac{I''_{пГ}}{I_{Г\text{ ном}}}$ для расчетного момента времени t находят отношение $\frac{I_{пт}}{I''_{пГ}}$ и по нему и кривой со значением $\frac{I''_{пГ}}{I''_{пΣ}}$ устанавливают значение $\frac{I_{птΣ}}{I''_{пΣ}}$ (см. рис. 7.13).

5. По найденному отношению и известному току $I''_{пΣ}$ вычисляют периодическую составляющую тока КЗ для интересующего момента времени t :

$$I_{птΣ} = \left(\frac{I_{птΣ}}{I''_{пΣ}} \right) I''_{пΣ}. \quad (7.20)$$

Метод типовых кривых следует применять при сравнительно небольших удаленностях точки КЗ от генераторов. Если источники удалены от места КЗ настолько, что ток ближайшего источника в момент КЗ выше номинального не более чем в 2 раза, $\left(\frac{I''_{пГ}}{I_{Г\text{ ном}}} \right) < 2$, то все источники в процессе преобразования схемы можно заменить одним эквивалентным и периодическую составляющую тока КЗ можно считать неизменной во времени.

8. Расчет переходных процессов при несимметричных коротких замыканиях

Рассмотрение переходного процесса при несимметричном КЗ ограничивается условием, что несимметрия возникает только в одном месте схемы, а остальная ее часть остается симметричной. Для расчета несимметричных КЗ в многофазных схемах используют метод симметричных составляющих, в соответствии с которым вычисление токов и напряжений при несимметричном КЗ в месте повреждения сводится к вычислению симметричных составляющих этих величин. Метод симметричных составляющих позволяет разложить любую несимметричную систему векторов на три симметричные составляющие векторов прямой, обратной и нулевой последовательностей (рис. 8.1).

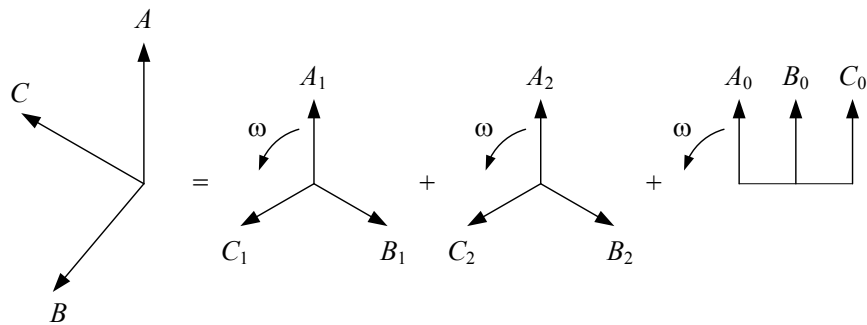


Рис. 8.1

ω – направление и частота вращения векторов.

Если известны векторы отдельных последовательностей, то легко определить векторы несимметричной системы:

$$\dot{A} = \dot{A}_1 + \dot{A}_2 + \dot{A}_0;$$

$$\dot{B} = \dot{B}_1 + \dot{B}_2 + \dot{B}_0; \quad (8.1)$$

$$\dot{C} = \dot{C}_1 + \dot{C}_2 + \dot{C}_0.$$

Введение специального фазного оператора a позволяет векторам каждой симметричной системы выразить через какой-либо один вектор той же системы. Фазный оператор является вектором, модуль которого равен 1, а аргумент 120° . Умножить на a – это означает повернуть вектор на 120° против часовой стрелки.

$$\dot{B}_1 = a^2 \dot{A}_1, \quad \dot{C}_1 = a \dot{A}_1;$$

$$\dot{B}_2 = a\dot{A}_2, \quad \dot{C}_2 = a^2\dot{A}_2; \quad (8.2)$$

$$\dot{A}_0 = \dot{B}_0 = \dot{C}_0.$$

Основные свойства фазного оператора « a »:

$$\begin{aligned} a &= e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}; \\ a^2 &= e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}; \\ a^3 &= e^{j360^\circ} = 1; \end{aligned} \quad (8.3)$$

$$a^2 + a + 1 = 0, \quad a^2 - a = -j\sqrt{3}, \quad a - a^2 = j\sqrt{3}.$$

Если фазу A принять за основную, то систему (8.1) можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{A} &= \dot{A}_1 + \dot{A}_2 + \dot{A}_0; \\ \dot{B} &= a^2\dot{A}_1 + a\dot{A}_2 + \dot{A}_0; \end{aligned} \quad (8.4)$$

$$\dot{C} = a\dot{A}_1 + a^2\dot{A}_2 + \dot{A}_0.$$

Решая совместно системы (8.1) и (8.4), можно получить выражения для определения векторов отдельных последовательностей через вектора несимметричной системы:

$$\begin{aligned} \dot{A}_1 &= \frac{1}{3}(\dot{A} + a\dot{B} + a^2\dot{C}); \\ \dot{A}_2 &= \frac{1}{3}(\dot{A} + a^2\dot{B} + a\dot{C}); \end{aligned} \quad (8.5)$$

$$\dot{A}_0 = \frac{1}{3}(\dot{A} + \dot{B} + \dot{C}).$$

Из приведенных выражений следует, что при использовании метода симметричных составляющих достаточно вычислить значения симметричных составляющих фазы A , по которым нетрудно определить симметричные составляющие для двух других фаз и полные значения соответствующих фазных величин. Геометрическая сумма векторов прямой и

обратной последовательности трех фаз, как и для всяких уравновешенных систем, равна нулю. В противоположность этому система величин нулевой последовательности является неуравновешенной, $\dot{A}_0 + \dot{B}_0 + \dot{C}_0 \neq 0$.

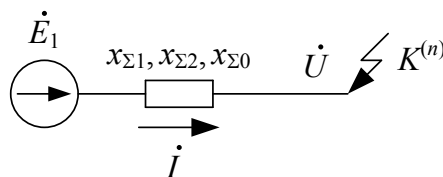
Отсюда следует, что система векторов нулевой последовательности существует лишь тогда, когда несимметричная система векторов тоже является неуравновешенной, то есть $\dot{A} + \dot{B} + \dot{C} \neq 0$.

При всяких несимметричных замыканиях на землю система фазных напряжений всегда содержит нулевую последовательность.

8.1. Особенности несимметричных коротких замыканий

При симметричном трехфазном КЗ напряжение в месте повреждения равнялось нулю (металлическое замыкание) или имело какое-то остаточное значение, но оно оставалось симметричным. При несимметричном КЗ в месте повреждения имеет место асимметрия напряжений, которую можно разложить на симметричные составляющие. В сети при таких несимметричных повреждениях протекают несимметричные токи, которые также разлагаются на симметричные составляющие. Эти симметричные составляющие токов, протекая в обмотке статора, создают магнитные потоки тех же последовательностей, а последние наводят в статоре соответствующие ЭДС. В силу того, что эти ЭДС являются результатом неизвестных составляющих искомого тока, при анализе несимметричных КЗ учитывают только те ЭДС, которые могут быть определены и не зависят от внешних условий, причем в силу симметричного выполнения статорной обмотки эти ЭДС являются ЭДС только прямой последовательности (то есть E_∞, E', E''). Что касается ЭДС, обусловленных реакцией токов отдельных последовательностей (E_2, E_0), то их учитывают в виде падений напряжений с обратным знаком от протекания тока соответствующей последовательности по сопротивлению этой же последовательности.

Рассмотрим применение метода симметричных составляющих для случая несимметричного КЗ в простейшей схеме, элементы которой для токов прямой, обратной и нулевой последовательности обладают соответственно результирующими сопротивлениями $x_{\Sigma 1}, x_{\Sigma 2}, x_{\Sigma 0}$ (рис. 8.2).



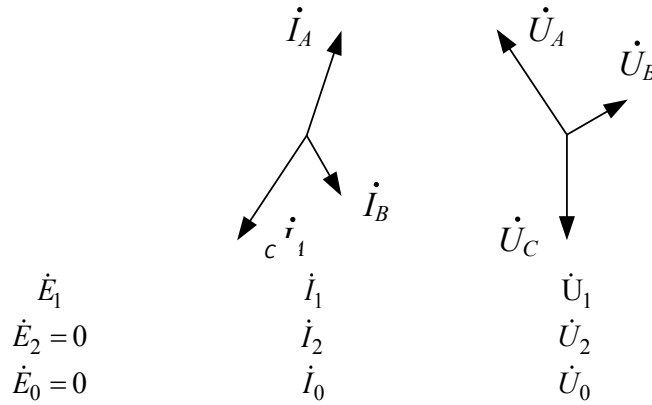


Рис. 8.2

По мере продвижения по цепи от места КЗ к источникам питания напряжение прямой последовательности возрастает от \dot{U}_1 в точке КЗ до \dot{E}_1 , а напряжение обратной и нулевой последовательностей уменьшается от \dot{U}_2 и \dot{U}_0 до нуля.

Учитывая сказанное, в соответствии со вторым законом Кирхгофа, можно написать следующие выражения для определения симметричных составляющих токов и напряжений в месте КЗ:

$$\begin{aligned} \dot{E}_1 &= \dot{U}_1 + j\dot{I}_1 x_{\Sigma 1}; \\ 0 &= \dot{U}_2 + j\dot{I}_2 x_{\Sigma 2}; \\ 0 &= \dot{U}_0 + j\dot{I}_0 x_{\Sigma 0}. \end{aligned} \quad (8.6)$$

Данная система уравнений содержит 6 неизвестных величин; три составляющие напряжения и три составляющие тока.

Три недостающие уравнения для решения этой системы получают из граничных условий, которыми характеризуется тот или иной вид повреждения.

8.2. Появление высших гармоник при несимметричных коротких замыканиях

При несимметричном КЗ по одной или двум фазам генератора, в зависимости от вида КЗ, протекает ток КЗ синхронной частоты. Эти токи создают ответную реакцию статора на ротор $\Delta\Phi_{ad}$. Эта реакция, вызванная несимметричными токами, является пульсирующей во времени и неподвижной в пространстве. Ее можно разложить на две составляющие, одна из которых вращается с той же угловой частотой, что и ротор, в том же направлении, а другая – в противоположном направлении (рис. 8.3).

Составляющая, которая вращается в том же направлении, что и ротор, никак на него не влияет, так как она по отношению к нему неподвижна. Вторая составляющая по отношению к ротору вращается с частотой 2ω и поэтому будет наводить в обмотке возбуждения ЭДС, изменяющуюся с двойной частотой.

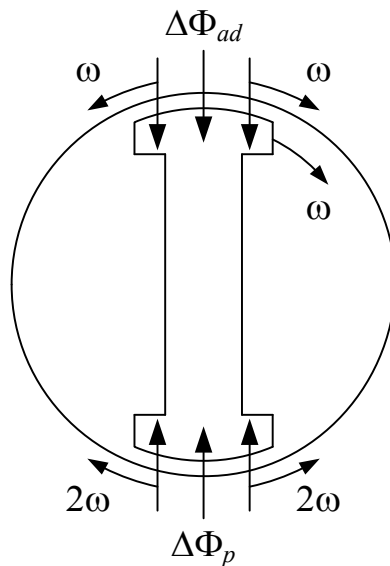


Рис. 8.3

ЭДС в обмотке ротора вызовет ток двойной частоты, который в свою очередь вызовет ответную пульсирующую реакцию ротора на статор двойной частоты $\Delta\Phi_p$. Разложив последнюю на две составляющие, вращающиеся в противоположные стороны с угловой скоростью 2ω относительно ротора, легко убедиться, что составляющая, которая вращается с частотой 2ω против направления вращения ротора, по отношению к статору вращается с частотой ω и создает ответную реакцию на реакцию статора, стремясь ее компенсировать. Другая составляющая по отношению к статору вращается с частотой 3ω и в обмотке статора наводит ЭДС этой частоты. В результате в обмотке статора возникает ток этой частоты (3ω), который создает пульсирующую ответную реакцию статора на ротор тройной частоты. Продолжая подобные рассуждения, можно убедиться, что каждая нечетная гармоника тока статора вызывает четную гармонику тока в обмотке возбуждения, которая в свою очередь вызывает следующую по порядку нечетную гармонику тока статора.

Токи нулевой последовательности, протекая в обмотках фаз статора, сдвинутых в пространстве на 120° и 240° , создают практически только магнитные потоки рассеяния, которые значительно меньше, чем при токах прямой и обратной последовательностей (рис. 8.4).

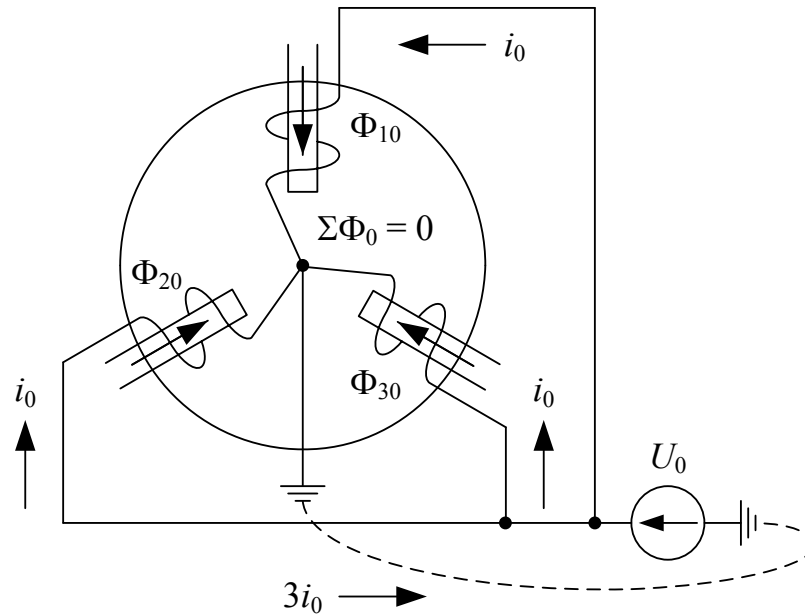


Рис. 8.4

Величина этих магнитных потоков зависит в основном от конструкции и типа генераторной обмотки. Результирующее магнитное поле, созданное токами нулевой последовательности, практически равно 0.

8.3. Сопротивления элементов для токов различных последовательностей

8.3.1. Прямая последовательность

Все сопротивления, которыми характеризуются отдельные элементы в нормальном симметричном режиме, а также при симметричном трехфазном КЗ, по существу являются сопротивлениями прямой последовательности.

8.3.2. Обратная последовательность

В связи с тем, что при несимметричных КЗ картина магнитного поля синхронной машины резко отличается от картины при симметричном КЗ (появляются высшие гармоники, вызванные наличием тока обратной последовательности), точное определение сопротивления обратной последовательности генераторов затруднено. К тому же данная реактивность, строго говоря, не является параметром машины, так как она зависит от внешних условий (то есть внешней реактивности, вида несимметрии и др.).

В зависимости от конструкции ротора в практических расчетах сопротивление обратной последовательности генераторов определяется через сопротивления прямой последовательности.

Для ТГ и всех генераторов с успокоительными обмотками:

$$x_2 = 1,22x_d''.$$

Для генераторов без успокоительных обмоток, синхронных компенсаторов, малых генераторов:

$$x_2 = 1,45x_d'.$$

В приближенных практических расчетах (расчет по кривым) токов КЗ для турбогенераторов и машин с успокоительными обмотками допускается принимать

$$x_2 = x_d''.$$

Следует заметить, что сопротивление обратной последовательности генераторов не зависит от рассматриваемой стадии переходного процесса.

Сопротивление нагрузки, основу которой составляют асинхронные двигатели, зависит от скольжения s (рис. 8.5).

Из рисунка видно, что значения сопротивления при скольжении 2 практически такое же, как и при $s=1$, то есть реактивность x_2 двигателя равна его так называемой реактивности короткого замыкания:

$$x_2 = \frac{U_*}{I_{*пуск}} = \frac{1}{I_{*пуск}} = 0,2 \div 0,35. \quad (8.7)$$

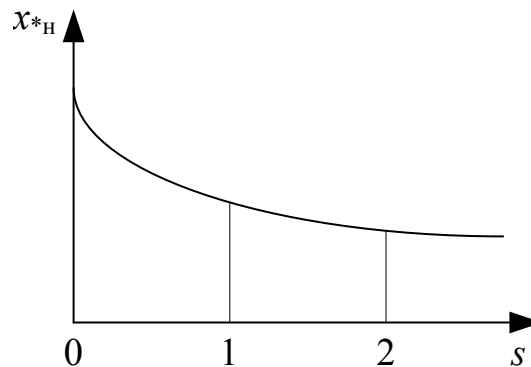


Рис. 8.5

Реактивность обратной последовательности для обобщенной нагрузки в практических расчетах можно принимать $x_2 = 0,35$, считая ее отнесенной к

полной мощности нагрузки и среднему номинальному напряжению той ступени, где она подключена.

Для статических элементов (ЛЭП, трансформаторы, реакторы) сопротивления не зависят от порядка чередования фаз. Поэтому для этих элементов сопротивления обратной последовательности равны сопротивлениям прямой последовательности:

$$x_2 = x_1.$$

8.3.3. Нулевая последовательность

Источником тока нулевой последовательности является напряжение этой последовательности в месте повреждения. Ток нулевой последовательности, являясь по существу однофазным током, разветвляется по трем фазам и возвращается к месту повреждения через землю и заземленные опоры и грозозащитные тросы. В силу этого пути циркуляции токов нулевой последовательности резко отличаются от путей протекания токов прямой и обратной последовательностей. Для того чтобы имела место циркуляция токов нулевой последовательности, в схеме со стороны несимметричного КЗ на землю необходимо иметь хотя бы одну заземленную нейтраль, то есть четырехпроводную сеть (рис. 8.6).

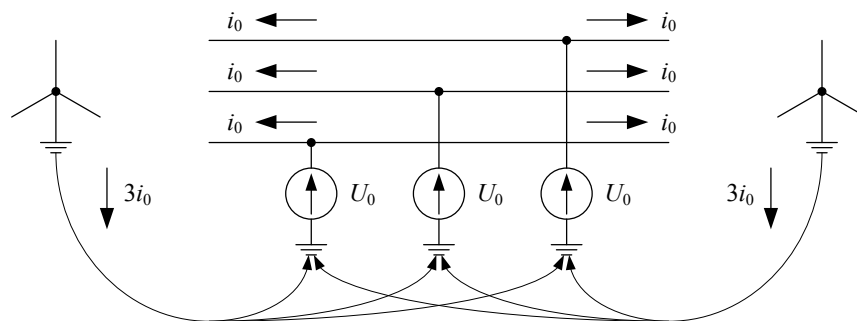


Рис. 8.6

В связи с тем, что результирующее магнитное поле, создаваемое токами нулевой последовательности у генераторов равно нулю, $\sum \Phi_0 = 0$, сопротивление нулевой последовательности генератора будет определяться лишь потоками рассеяния обмотки статора, которые значительно меньше, чем при токах прямой и обратной последовательности. Его величина зависит от типа обмотки. Эта величина задается в паспорте каждого генератора и определяется опытным путем. В практических расчетах пользуются следующим соотношением:

$$x_0 = (0,15 - 0,6)x_d'' \quad (8.8)$$

Реакторы выполняются в однофазном исполнении и поэтому магнитная связь между фазами отсутствует. Сопротивление такого элемента зависит только от частоты тока. Поэтому для данного элемента

$$x_1 = x_2 = x_0.$$

Нагрузка в схему замещения нулевой последовательности не вводится, так как она обычно подключается к сети напряжением 6, 10, 35 кВ, а сети данного класса напряжений работают с изолированной нейтралью, в которой нет пути для протекания тока нулевой последовательности.

Сопротивления нулевой последовательности трансформаторов зависят от схем соединения обмоток трансформаторов, конструкции их магнитопроводов, а также наличия путей для циркуляции токов нулевой последовательности. Если КЗ имеет место со стороны обмотки, соединенной в треугольник или звезду без заземленной нейтрали, независимо от того, как соединены другие обмотки, сопротивление нулевой последовательности трансформатора $x_0 = \infty$, так как в этом случае вообще исключена возможность циркуляции тока нулевой последовательности в данном трансформаторе (рис. 8.7).

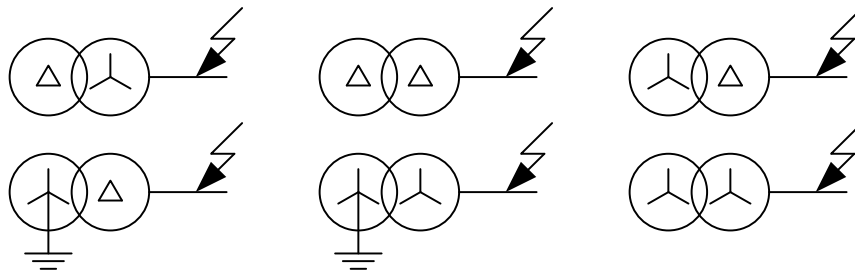


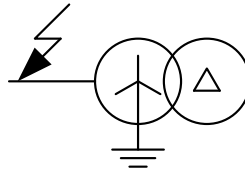
Рис. 8.7

Во всех этих случаях сопротивление нулевой последовательности трансформатора $x_0 = \infty$.

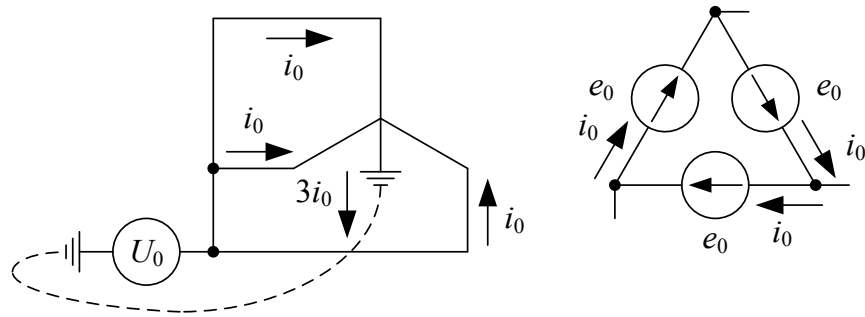
Следовательно, конечная, хотя иногда и очень большая величина сопротивления нулевой последовательности трансформатора, может быть только со стороны обмотки, соединенной в звезду с заземленной нейтралью.

Рассмотрим основные варианты соединения обмоток двухобмоточных трансформаторов (рис. 8.8).

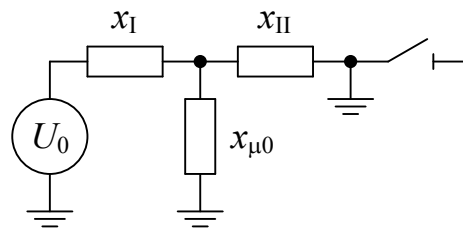
1. Схема соединения обмоток трансформатора Y_0/Δ (см. рис. 8.8).



a



б



в

Рис. 8.8

$$\Phi_0 \rightarrow e_0 \rightarrow i_0;$$

$$x_0 = x_I + \frac{x_{II} x_{\mu 0}}{x_{II} + x_{\mu 0}}.$$

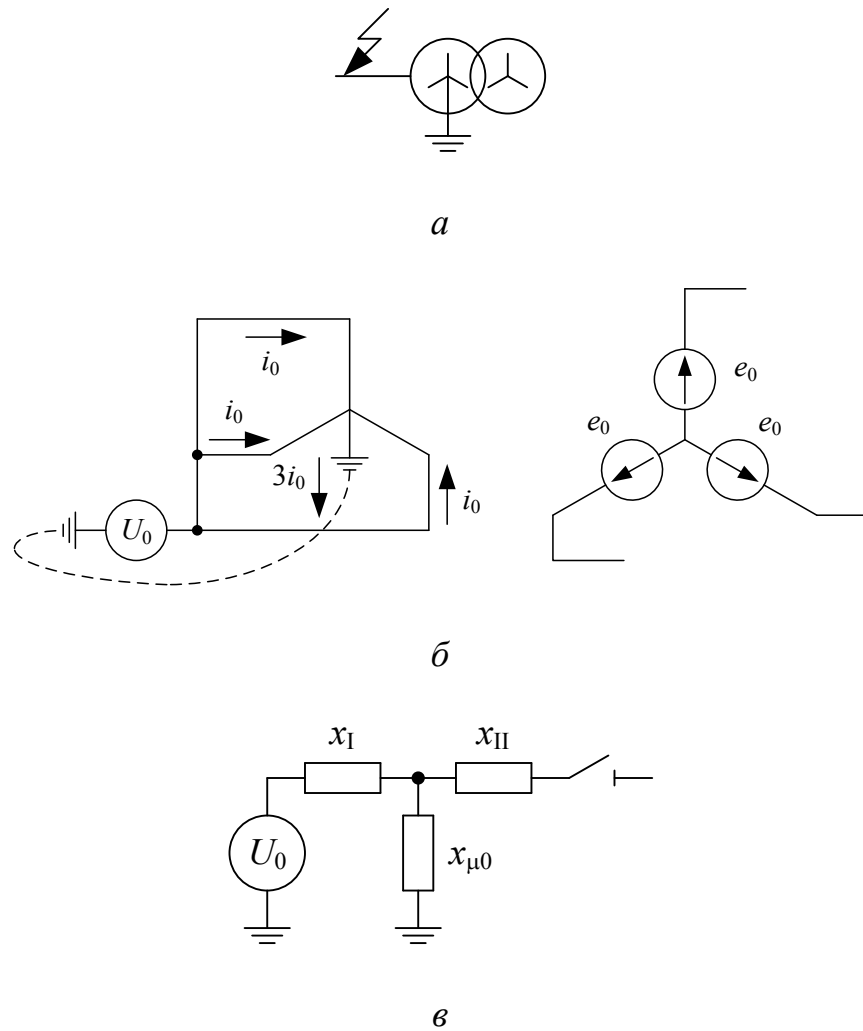
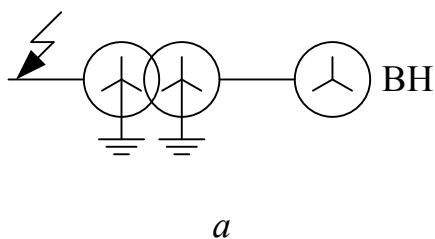
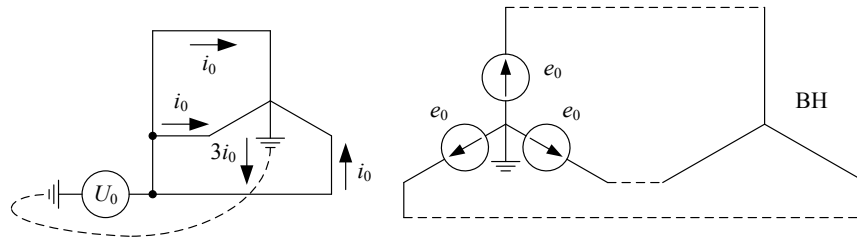
2. Схема соединения обмоток трансформатора Y_0/Y (рис. 8.9).

Рис. 8.9

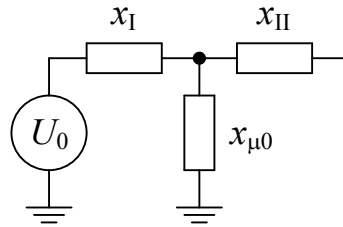
$$\Phi_0 \rightarrow e_0;$$

$$x_0 = x_I + x_{\mu 0}.$$

3. Схема соединения обмоток трансформатора Y_0/Y_0 с внешним элементом, подключенным ко второй обмотке, со схемой соединения Y (рис. 8.10).



б



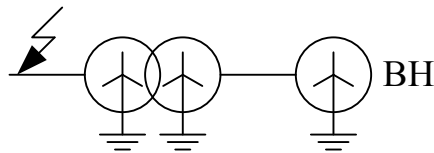
в

Рис. 8.10

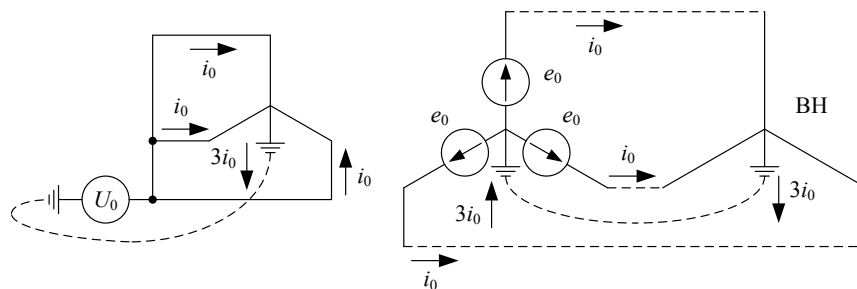
$$\Phi_0 \rightarrow e_0;$$

$$x_0 = x_I + x_{\mu 0}.$$

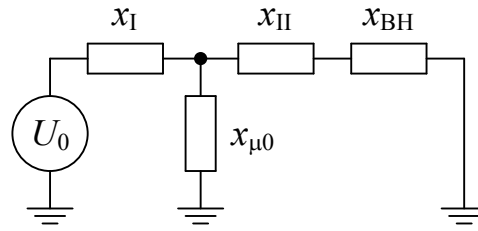
4. Схема соединения обмоток трансформатора Y_0/Y_0 с внешним элементом, подключенным ко второй обмотке, со схемой соединения Y_0 (рис. 8.11).



а



б



в

Рис. 8.11

$$x_0 = x_I + \frac{(x_{II} + x_{BH}) \cdot x_{\mu 0}}{x_{II} + x_{BH} + x_{\mu 0}}.$$

Во всех выражениях $x_I = x_{II} = 0,5U_K \%$.

Значение величины $x_{\mu 0}$ зависит от конструктивного выполнения трансформатора.

Трехфазная группа из однофазных трансформаторов

Для группы из трех однофазных трансформаторов ток намагничивания нулевой последовательности очень мал, так как в этом случае условия для магнитного потока практически те же, что и при питании трансформатора от источника напряжения прямой (или обратной) последовательности. Поэтому можно считать, с учетом ранее принятых допущений, что $I_{\mu 0} \rightarrow 0$, а $x_{\mu 0} \rightarrow \infty$.

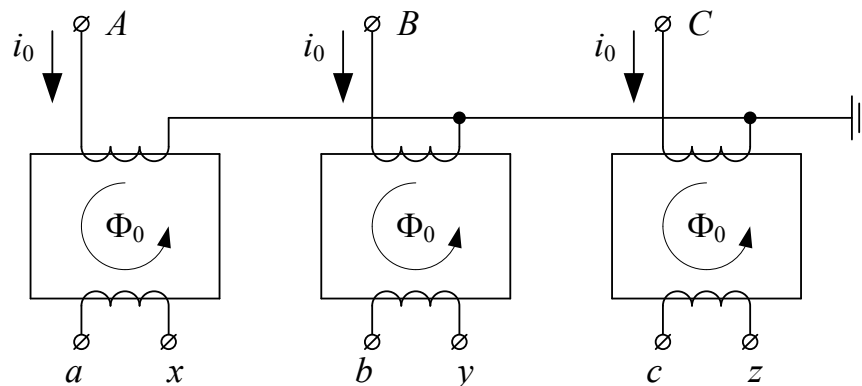


Рис. 8.12

Пятистержневой трехфазный трансформатор

В данном случае имеем ту же ситуацию, что и в предыдущем варианте, так как магнитные потоки нулевой последовательности замыкаются через стержни магнитопровода свободные от обмоток, то есть $I_{\mu 0} \rightarrow 0$, а $x_{\mu 0} \rightarrow \infty$.

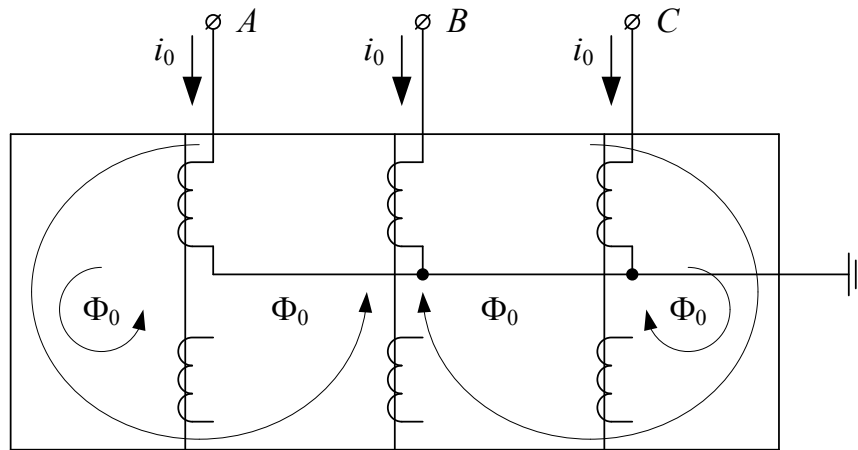


Рис. 8.13

Трехстержневой трехфазный трансформатор

В этих трансформаторах магнитные потоки нулевой последовательности во всех фазах имеют одинаковую величину и направление. Они замыкаются через воздух и бак (корпус) трансформатора. Для проведения магнитного потока по пути со столь значительным магнитным сопротивлением необходим достаточно большой ток намагничивания. Следовательно, у таких трансформаторов сопротивление $x_{\mu 0}$ значительно меньше, чем $x_{\mu 1}$. В зависимости от конструкции трансформатора для трехстержневых трансформаторов принимают $x_{\mu 0} = (0,3 \div 1)$. Эта величина выражена в относительных единицах при номинальной мощности трансформатора.

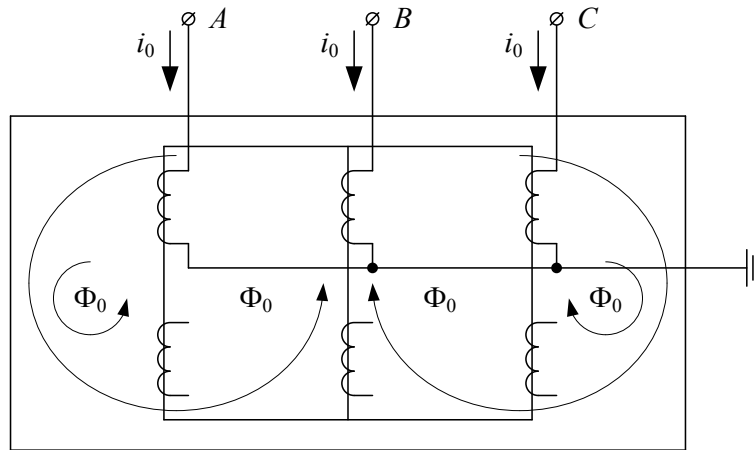


Рис. 8.14

С учетом конструкции трансформатора, в зависимости от схемы соединения обмоток, сопротивление нулевой последовательности будет определяться следующим образом (рис. 8.15).

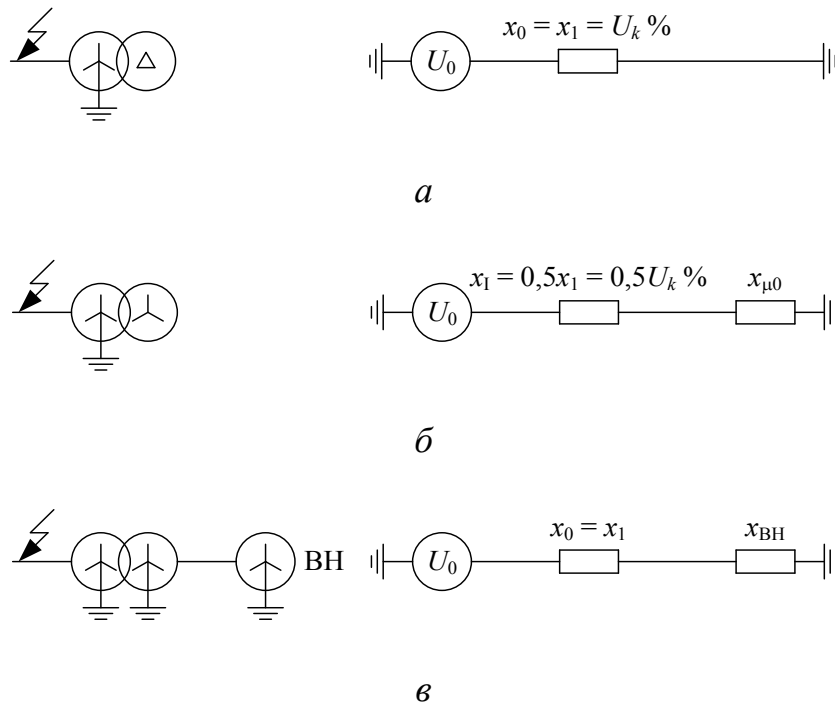
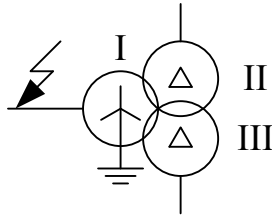


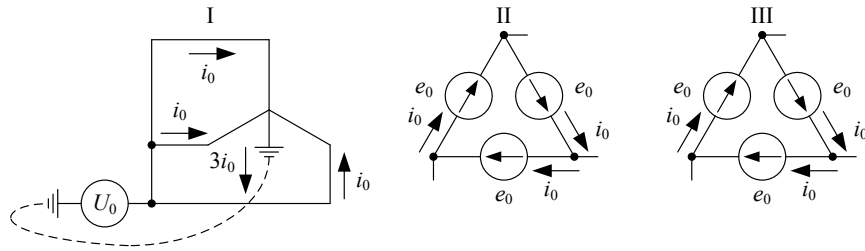
Рис. 8.15

x_1 – сопротивление прямой последовательности трансформатора.
Рассмотрим характерные схемы соединения обмоток трехобмоточных трансформаторов (рис. 8.16–8.19).

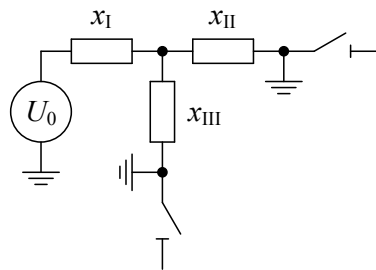
1. Схема соединения обмоток трансформатора $Y_0/\Delta/\Delta$ (рис. 8.16).



a



б

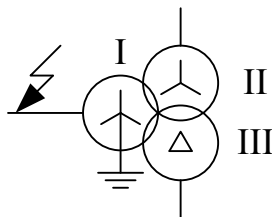


в

Рис. 8.16

$$x_0 = x_I + \frac{x_{II}x_{III}}{x_{II} + x_{III}}.$$

2. Схема соединения обмоток трансформатора $Y_0/Y/\Delta$ (рис. 8.17).



a

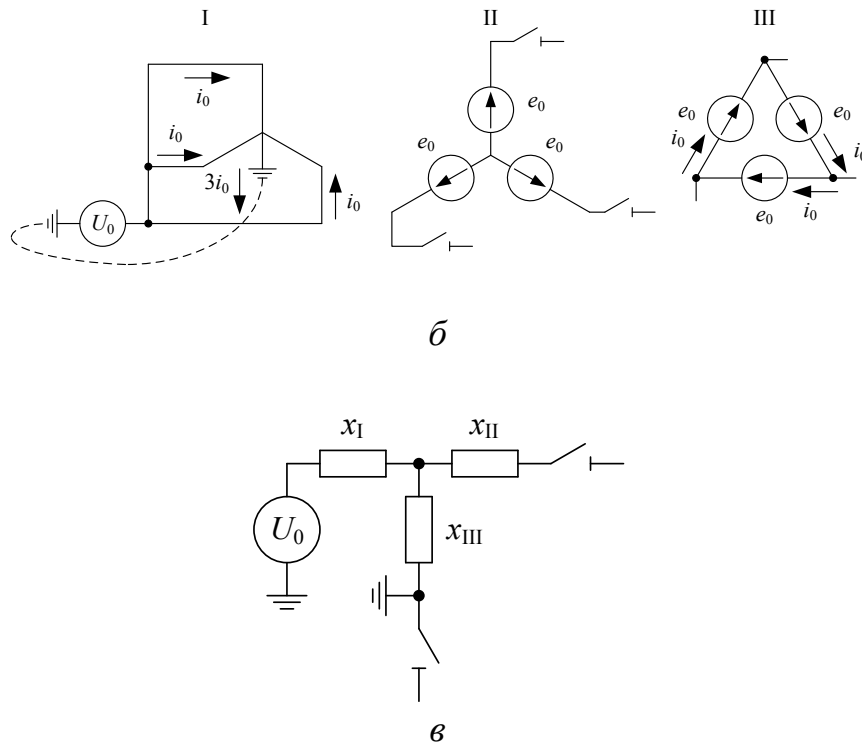


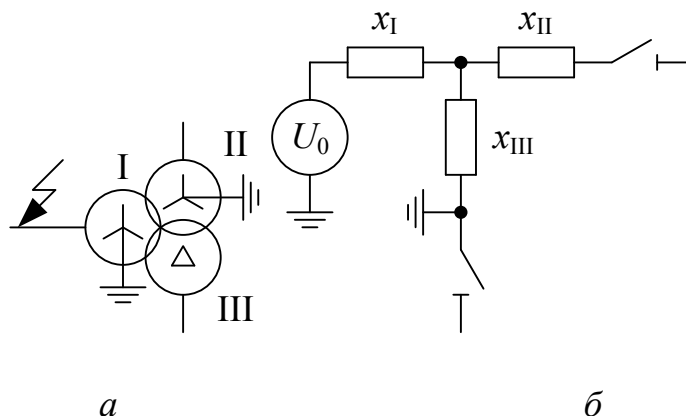
Рис. 8.17
 $x_0 = x_I + x_{III}$.

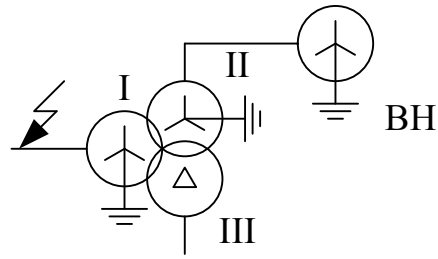
3. Схема соединения обмоток трансформатора $Y_0/Y_0/\Delta$ (рис. 8.18).

Если у трансформатора (рис. 8.18, а) ко второй обмотке не подключен внешний элемент с заземленной нейтралью, то будет иметь место такое же значение сопротивления нулевой последовательности, как и в предыдущем случае, то есть $x_0 = x_I + x_{III}$.

Если же у трансформатора ко второй обмотке подключен внешний элемент, соединенный по схеме Y_0 (рис. 8.18, б), то в этом случае значение сопротивления нулевой последовательности будет

$$x_0 = x_I + \frac{(x_{II} + x_{ВН})x_{III}}{x_{II} + x_{ВН} + x_{III}}$$





в

Рис. 8.18

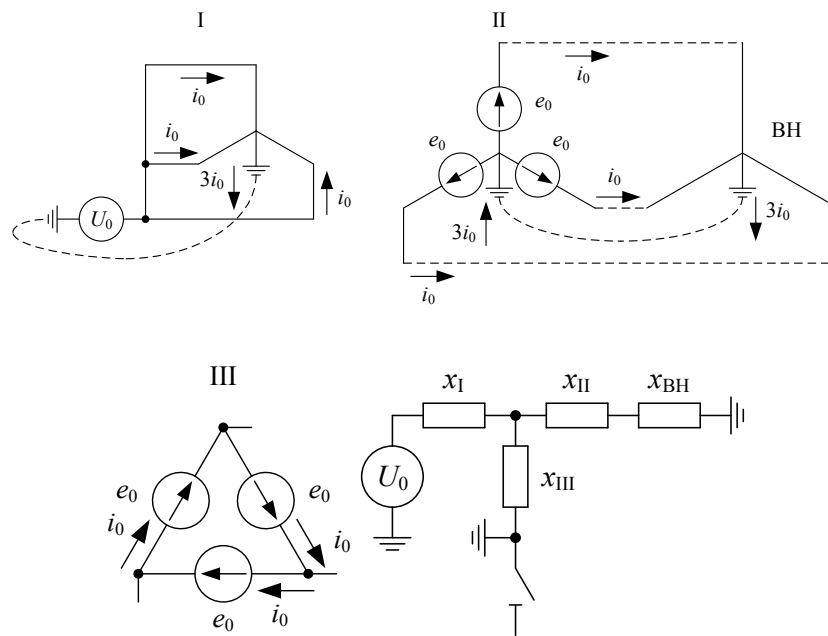


Рис. 8.19

У трехобмоточных трансформаторов всегда одна из обмоток соединена по схеме треугольника. Сопротивление $x_{\mu 0}$ в схеме замещения этих трансформаторов всегда включено параллельно сопротивлению этой обмотки. Поскольку оно велико, им можно пренебречь, то есть считать $x_{\mu 0} = \infty$.

Подводя итог, можно отметить, что в тех случаях, когда ток нулевой последовательности протекает по обеим обмоткам двухобмоточного трансформатора, в схему замещения нулевой последовательности такой трансформатор необходимо вводить одним сопротивлением, величина его принимается равной сопротивлению прямой последовательности трансформатора. Трансформатор в схеме замещения нулевой последовательности никогда не учитывается сопротивлением только одной обмотки. Схемы замещения для токов нулевой последовательности автотрансформаторов, в зависимости от схем соединения обмоток, имеют тот

же вид, что и схемы трансформаторов. Сопротивления определяются аналогично.

Сопротивление, через которое могут быть заземлены нейтрали трансформаторов, генераторов, вводится в схему замещения нулевой последовательности утроенной величиной, последовательно с сопротивлением той обмотки, в нейтраль которой оно подключено. Это обусловлено тем, что схему нулевой последовательности составляют однолинейной, а через указанное сопротивление протекает утроенное значение тока нулевой последовательности (рис. 8.20).

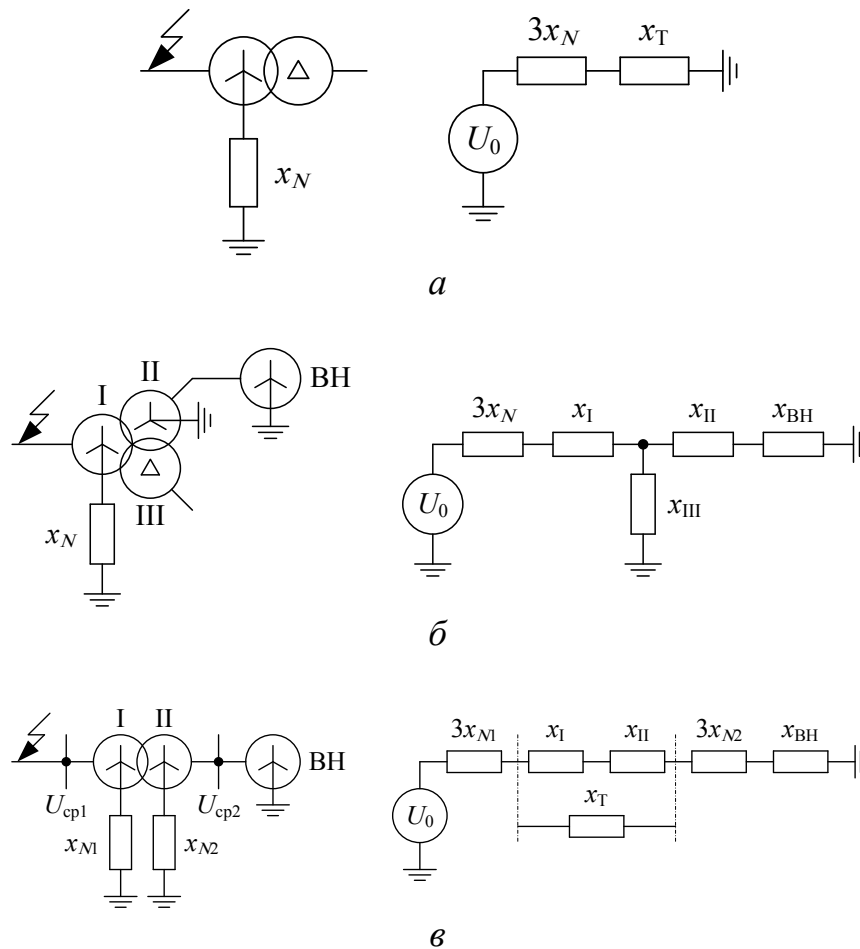


Рис. 8.20

При приведении сопротивлений заземления нейтралей к базисным условиям следует помнить, что необходимо брать средние номинальные напряжения тех ступеней, на которые они включены:

$$x_{*3} = 3x_N \frac{S_6}{U_{\text{срн}}^2}; \quad (8.9)$$

ДЛЯ $x_{N1} \rightarrow U_{\text{срн1}}$,

Для $x_{N2} \rightarrow U_{\text{ср н2}}$.

Воздушные линии электропередач

Ток нулевой последовательности, протекающий по фазам воздушных линий, возвращается к месту повреждения через землю и другие заземленные цепи (металлические опоры, грозозащитные тросы) (рис. 8.21).

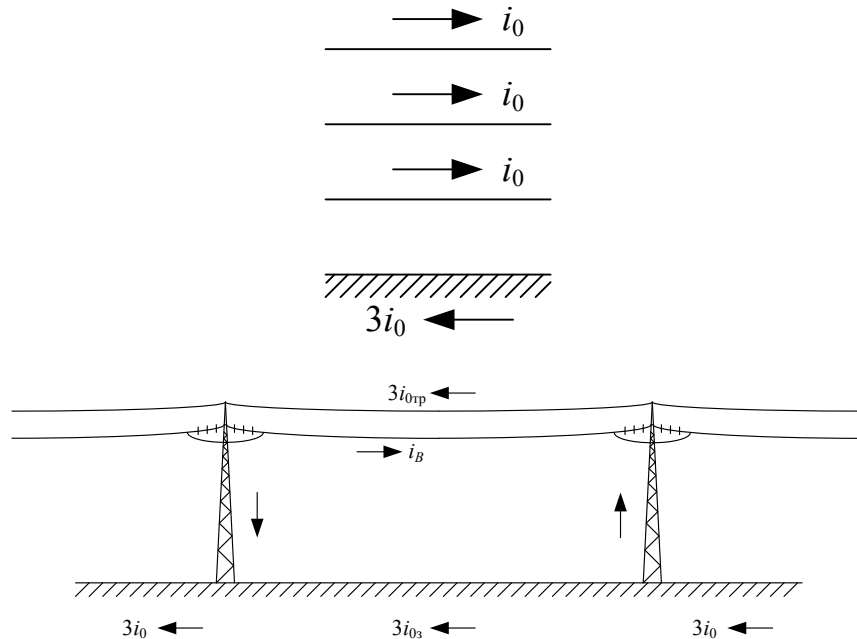


Рис. 8.21

Главная трудность определения сопротивлений нулевой последовательности воздушной линии связана с учетом распределения тока в земле.

В практических расчетах в качестве средних соотношений между индуктивными сопротивлениями нулевой и прямой последовательностей принимают следующие значения.

1. Одноцепная ЛЭП без троса, $x_0 = 3,5x_1$.
2. Одноцепная ЛЭП со стальным тросом, $x_0 = 3x_1$.
3. Одноцепная ЛЭП с хорошо проводящим тросом, $x_0 = 2x_1$.
4. Двухцепная ЛЭП без троса, $x_0 = 5,5x_1$.
5. Двухцепная ЛЭП со стальным тросом, $x_0 = 4,7x_1$.
6. Двухцепная ЛЭП с хорошо проводящим тросом, $x_0 = 3x_1$.

Для двухцепных ЛЭП x_1 – эквивалентное сопротивление прямой последовательности двух цепей.

Кабельные линии

Ток нулевой последовательности, протекая по жилам кабеля, возвращается к месту повреждения по земле, а также по бронированной оболочке, которая заземлена по его концам и в промежуточных точках (муфты). На распределение тока между оболочкой и землей существенно влияет не только собственное сопротивление ее заземлений, но и характер прокладки кабеля (траншея, блоки). Все это и целый ряд других факторов затрудняет достоверный расчет величины сопротивления нулевой последовательности Z_0 . Единственный путь получения надежных данных о Z_0 кабеля состоит в проведении соответствующих замеров в реальных условиях. В практических расчетах пользуются следующими соотношениями:

$$x_0 = (3,5 \div 4,6)x_1, R_0 = 10R_1. \quad (8.10)$$

8.4. Составление схем замещения для токов различных последовательностей

Для анализа и расчета несимметричных КЗ в общем случае необходимо составлять схемы замещения всех последовательностей (прямой, обратной и нулевой). По этим схемам находят результирующие сопротивления отдельных последовательностей рассматриваемой системы относительно места повреждения. Из схемы прямой последовательности находят также результирующую ЭДС относительно точки КЗ.

8.4.1. Схема замещения прямой последовательности

Схема прямой последовательности является обычной схемой, которую составляют для расчета любого симметричного трехфазного режима. В зависимости от применяемого метода расчета и момента времени, для которого осуществляют расчет, в нее вводят генераторы и нагрузки соответствующими сопротивлениями и ЭДС.

8.4.2. Схема замещения обратной последовательности

При составлении схемы замещения обратной последовательности следует помнить, что токи обратной последовательности протекают по тем же элементам, что и токи прямой последовательности. Следовательно, схема замещения обратной последовательности по структуре будет полностью повторять схему прямой последовательности. Различие будет в следующем:

1. Сопротивления генераторов и нагрузок обратной последовательности практически постоянны и не зависят от вида КЗ, а также от рассматриваемой стадии переходного процесса.

2. ЭДС всех генерирующих источников в схеме обратной последовательности принимают равными нулю.

3. Источником тока обратной последовательности является напряжение этой последовательности, включенное между местом повреждения и точками нулевого потенциала генерирующих источников (так как $E_2 = 0$).

При расчете по расчетным кривым, в силу принятых допущений, можно считать, что сопротивление схемы обратной последовательности равно сопротивлению схемы прямой последовательности, $x_{\Sigma 2} \cong x_{\Sigma 1}$.

8.4.3. Схема замещения нулевой последовательности

В силу того, что токи нулевой последовательности являются однофазными и распределяются по трем фазам трехфазной сети, для их протекания необходимо иметь четырехпроводную сеть или заземленные нейтрали обмоток трансформаторов, генераторов со стороны точки КЗ. С учетом этой особенности схема нулевой последовательности резко отличается от схем прямой и обратной последовательностей. Ее всегда начинают составлять с места повреждения, считая, что в этой точке все фазы замкнуты между собой накоротко и к этому месту приложено напряжение нулевой последовательности. Для циркуляции токов нулевой последовательности необходима по меньшей мере одна заземленная нейтраль, электрически связанная с местом повреждения. В схему замещения нулевой последовательности вводят те элементы, по которым протекает ток нулевой последовательности. Значения сопротивлений элементов схемы определяют в соответствии с ранее полученными зависимостями.

Рассмотрим несколько примеров составления схем замещения нулевой последовательности.

Пример № 1

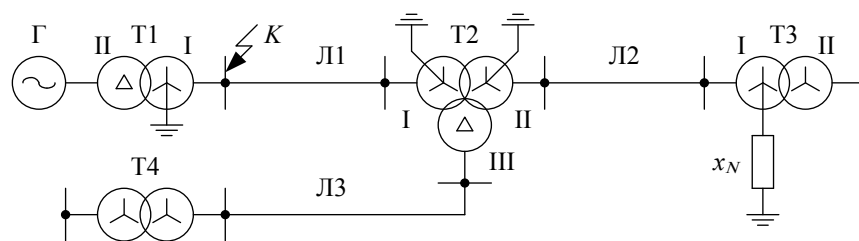


Рис. 8.22

Для выявления путей протекания тока нулевой последовательности изобразим исходную схему в трехфазном исполнении и, начиная от места несимметрии, покажем стрелками эти пути (рис. 8.23).

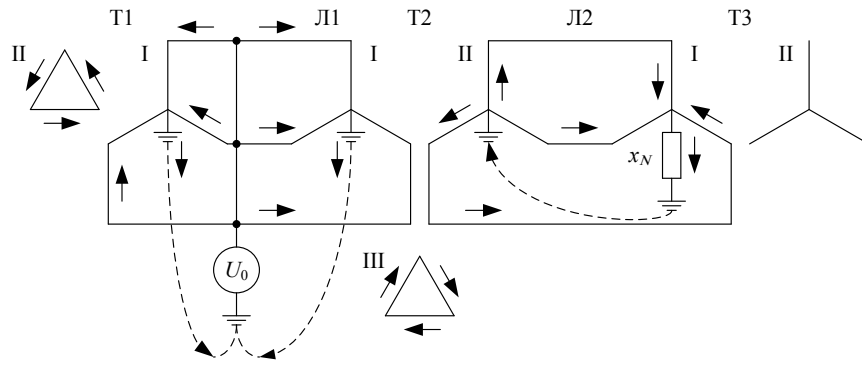


Рис. 8.23

С учетом путей циркуляции токов нулевой последовательности составляем схему замещения (рис. 8.24).

$x_{ОЛ1}$ $x_{ОЛ2}$

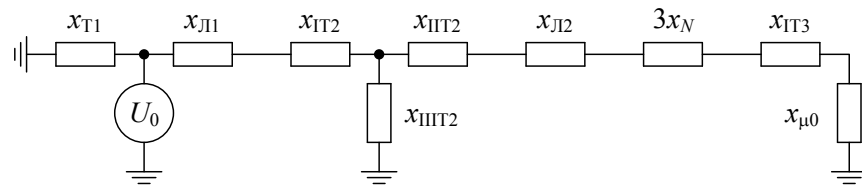


Рис. 8.24

Преобразуя схему:

$$x_1 = x_{\mu 0} + 3x_N + x_{ОЛ2} + x_{ПТ2} + x_{Т3};$$

$$x_2 = x_{ОЛ1} + x_{Т2};$$

$$x_3 = x_1 // x_{ПТ2}, \quad x_4 = x_3 + x_2, \quad x_5 = x_{Т1} // x_4,$$

в итоге получаем (рис. 8.25).

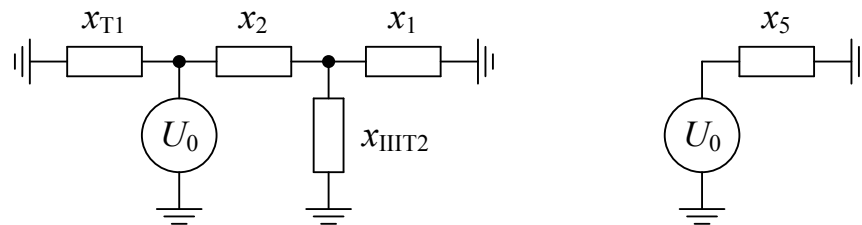


Рис. 8.25

Пример № 2

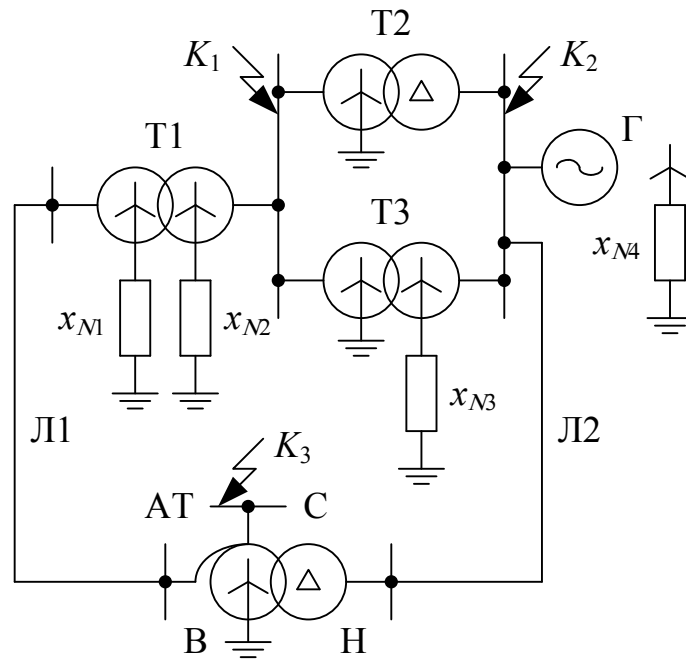


Рис. 8.26

Схемы замещения нулевой последовательности:
 – при КЗ в точке K_1 (рис. 8.27);

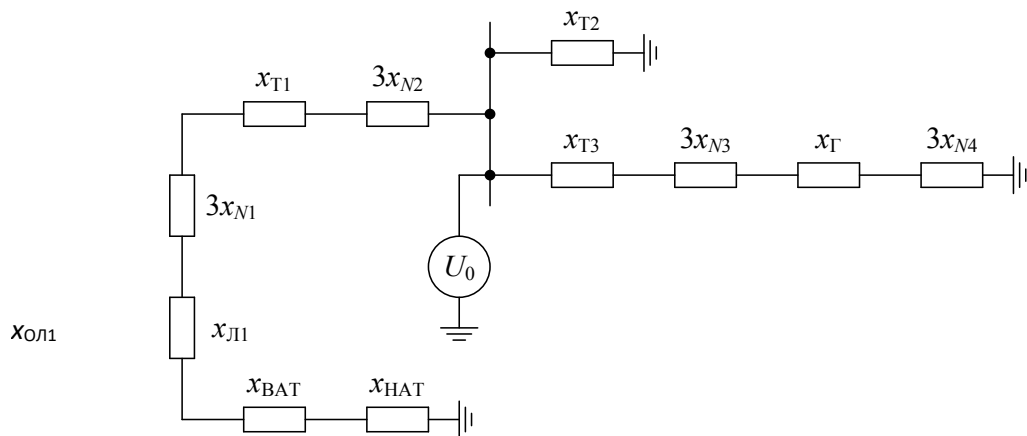


Рис. 8.27

– при КЗ в точке K_2 (рис. 8.28);

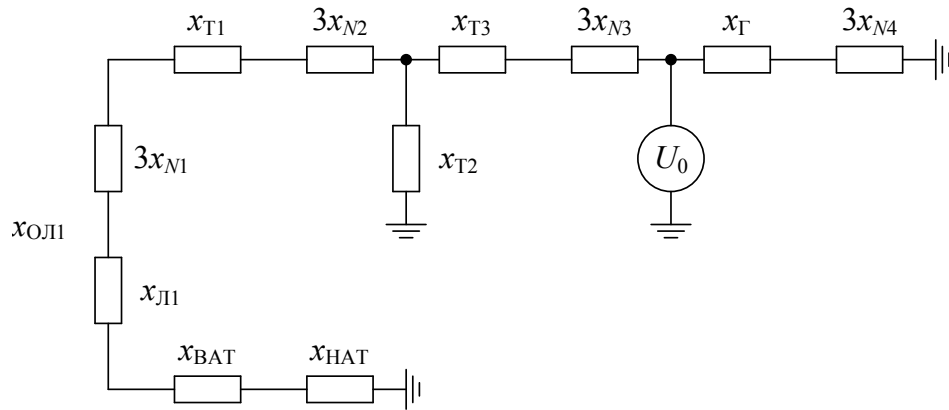


Рис. 8.28

– при КЗ в точке K_3 (рис. 8.29).

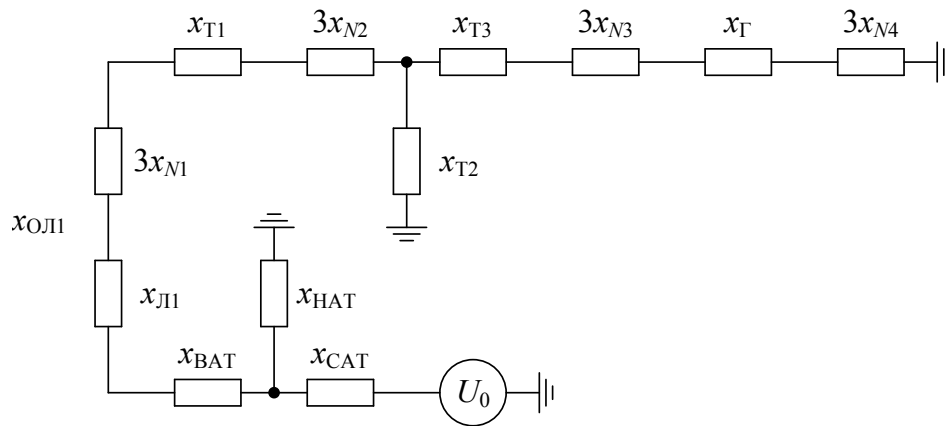


Рис. 8.29

9. Однократная поперечная несимметрия. Токи и напряжения при различных видах несимметричных коротких замыканий

Рассмотрим три вида несимметричных КЗ: однофазное, двухфазное и двухфазное КЗ на землю. Симметричные составляющие токов и напряжений определяются на основе уравнений по второму закону Кирхгофа для каждой последовательности с учетом граничных условий в месте повреждения при каждом виде КЗ. Будем считать, что в особых условиях в месте повреждения находится фаза A , индекс которой в записях будем опускать. Повреждение в рассматриваемой точке будем считать металлическим.

Симметричные составляющие токов и напряжений в месте несимметричных КЗ, как показано в разделе 8.1, связаны между собой следующими выражениями по второму закону Кирхгофа:

$$\dot{E}_1 = \dot{U}_1 + j\dot{I}_1 x_{\Sigma 1}; \quad (9.1)$$

$$0 = \dot{U}_2 + j\dot{I}_2 x_{\Sigma 2}; \quad (9.2)$$

$$0 = \dot{U}_0 + j\dot{I}_0 x_{\Sigma 0}. \quad (9.3)$$

Чтобы решить систему этих уравнений, необходимо составить еще три уравнения, вытекающие из граничных условий соответствующего вида несимметричного КЗ. Для внесения определенности в граничные условия предполагают, что КЗ происходит на ответвлении, сопротивление проводников которого равно нулю.

9.1. Двухфазное короткое замыкание

Двухфазное КЗ представлено на рис. 9.1.

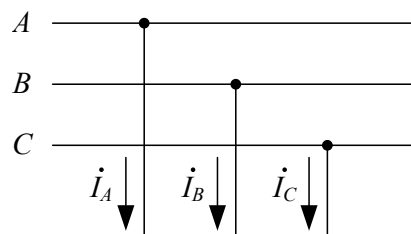


Рис. 9.1

Граничные условия для данного вида КЗ:

$$\dot{I}_A = 0; \quad (9.4)$$

$$\dot{I}_B = -\dot{I}_C; \quad (9.5)$$

$$\dot{U}_B = \dot{U}_C. \quad (9.6)$$

Очевидно:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_0 = 0. \quad (9.7)$$

Токи прямой, обратной и нулевой последовательностей:

$$\dot{I}_1 = \frac{1}{3}(\dot{I}_A + a\dot{I}_B + a^2\dot{I}_C) = \frac{1}{3}(a - a^2)\dot{I}_B; \quad (9.8)$$

$$\dot{I}_2 = \frac{1}{3}(\dot{I}_A + a^2\dot{I}_B + a\dot{I}_C) = \frac{1}{3}(a^2 - a)\dot{I}_B; \quad (9.9)$$

$$\dot{I}_0 = \frac{1}{3}(\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C) = 0. \quad (9.10)$$

В силу того, что система уравновешенная, то есть нет замыкания на землю, и что $\dot{I}_0 = 0$, с учетом (9.8) и (9.9) получим:

$$\dot{I}_1 = -\dot{I}_2. \quad (9.11)$$

Напряжения прямой и обратной последовательностей:

$$\dot{U}_1 = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a\dot{U}_B + a^2\dot{U}_C) = \frac{1}{3}[\dot{U}_A + (a + a^2)\dot{U}_B], \quad (9.12)$$

$$\dot{U}_2 = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a^2\dot{U}_B + a\dot{U}_C) = \frac{1}{3}[\dot{U}_A + (a^2 + a)\dot{U}_B], \quad (9.13)$$

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2. \quad (9.14)$$

Так как $\dot{I}_0 = 0$, то из (9.3) следует, что $\dot{U}_0 = 0$.

Вычтем из (9.1) (9.2) и с учетом (9.11) и (9.14) получим:

$$\dot{E}_1 = \dot{U}_1 - \dot{U}_2 + j\dot{I}_1 x_{\Sigma 1} - j\dot{I}_2 x_{\Sigma 2} = j\dot{I}_1 (x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2}). \quad (9.15)$$

Отсюда

$$\dot{i}_1 = \frac{\dot{E}_1}{j(x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2})}. \quad (9.16)$$

Действующее значение тока прямой последовательности при двухфазном КЗ:

$$I_1^{(2)} = \frac{E_1}{x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2}}. \quad (9.17)$$

Запишем, чему будут равны токи поврежденных фаз:

$$\dot{i}_B = \dot{i}_{B_1} + \dot{i}_{B_2} + \dot{i}_{B_0} = a^2 \dot{i}_1 + a \dot{i}_2 = (a^2 - a) \dot{i}_1 = -j\sqrt{3} \dot{i}_1; \quad (9.18)$$

$$\dot{i}_C = \dot{i}_{C_1} + \dot{i}_{C_2} + \dot{i}_{C_0} = a \dot{i}_1 + a^2 \dot{i}_2 = (a - a^2) \dot{i}_1 = j\sqrt{3} \dot{i}_1; \quad (9.19)$$

$$I_B = -I_C = \sqrt{3} I_1^{(2)}. \quad (9.20)$$

Определим, чему будут равны напряжения фаз в месте двухфазного КЗ:

$$\dot{U}_A = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0 = 2\dot{U}_1; \quad (9.21)$$

$$\dot{U}_B = \dot{U}_{B_1} + \dot{U}_{B_2} + \dot{U}_{B_0} = a^2 \dot{U}_1 + a \dot{U}_2 = (a^2 + a) \dot{U}_1 = -\dot{U}_1; \quad (9.22)$$

$$\dot{U}_C = \dot{U}_{C_1} + \dot{U}_{C_2} + \dot{U}_{C_0} = a \dot{U}_1 + a^2 \dot{U}_2 = (a^2 + a) \dot{U}_1 = -\dot{U}_1; \quad (9.23)$$

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 = -j \dot{I}_2 x_{\Sigma 2} = j \dot{I}_1 x_{\Sigma 2}; \quad (9.24)$$

$$U_1^{(2)} = I_1^{(2)} x_{\Sigma 2}. \quad (9.25)$$

На основании полученных соотношений построим векторные диаграммы напряжений и токов в месте двухфазного КЗ (рис. 9.2).

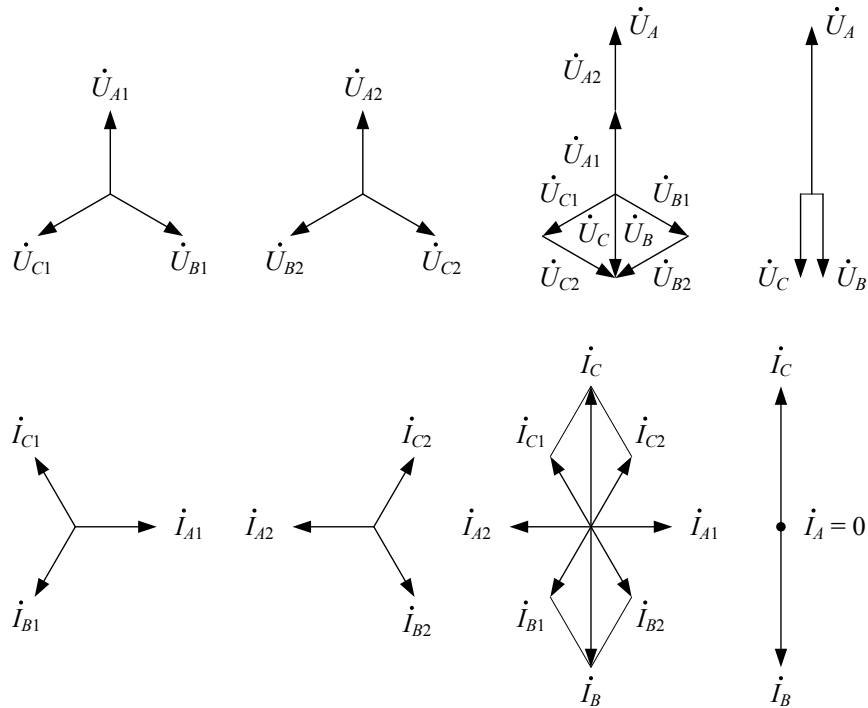


Рис. 9.2

9.2. Однофазное короткое замыкание

Однофазное КЗ представлено на рис. 9.3.

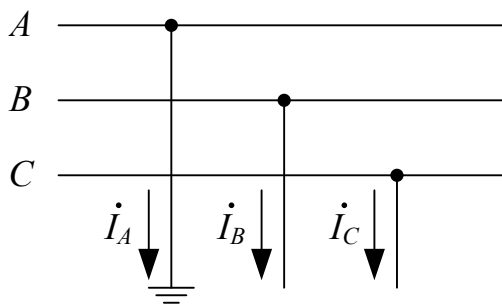


Рис. 9.3

Граничные условия для данного вида КЗ:

$$i_B = 0; \quad (9.26)$$

$$i_C = 0; \quad (9.27)$$

$$\dot{U}_A = 0. \quad (9.28)$$

Для особой фазы A запишем:

$$\dot{U}_A = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0 = 0; \quad (9.29)$$

$$\dot{i}_1 = \frac{1}{3}(\dot{I}_A + a\dot{I}_B + a^2\dot{I}_C) = \frac{1}{3}\dot{I}_A; \quad (9.30)$$

$$\dot{i}_2 = \frac{1}{3}(\dot{I}_A + a^2\dot{I}_B + a\dot{I}_C) = \frac{1}{3}\dot{I}_A; \quad (9.31)$$

$$\dot{i}_0 = \frac{1}{3}(\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C) = \frac{1}{3}\dot{I}_A; \quad (9.32)$$

$$\dot{i}_1 = \dot{i}_2 = \dot{i}_0. \quad (9.33)$$

Просуммируем уравнения (9.1)–(9.3) с учетом (9.29) и (9.33), получим:

$$\begin{aligned} \dot{E}_1 = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0 + j\dot{I}_1 x_{\Sigma 1} + j\dot{I}_2 x_{\Sigma 2} + j\dot{I}_0 x_{\Sigma 0} = \\ = j\dot{I}_1 (x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}), \end{aligned} \quad (9.34)$$

откуда

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}_1}{j(x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0})}. \quad (9.35)$$

Действующее значение тока прямой последовательности при однофазном КЗ

$$I_1^{(1)} = \frac{E_1}{x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}}. \quad (9.36)$$

Из уравнения (9.29) следует:

$$\dot{U}_1 = -(\dot{U}_2 + \dot{U}_0). \quad (9.37)$$

Из уравнений (9.2) и (9.3):

$$\dot{U}_2 = -j\dot{I}_2 x_{\Sigma 2} = -j\dot{I}_1 x_{\Sigma 2}; \quad (9.38)$$

$$\dot{U}_0 = -j\dot{I}_0 x_{\Sigma 0} = -j\dot{I}_1 x_{\Sigma 0}; \quad (9.39)$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= j\dot{I}_1 x_{\Sigma 2} + j\dot{I}_1 x_{\Sigma 0} = j\dot{I}_1 (x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}); \\ U_1^{(1)} &= I_1^{(1)} (x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}).\end{aligned}\quad (9.40)$$

Запишем, чему будут равны ток поврежденной фазы и напряжения здоровых фаз:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_0 = 3\dot{I}_1. \quad (9.41)$$

Ток при однофазном КЗ в три раза превышает ток прямой последовательности при данном виде КЗ:

$$I_A = 3I_1^{(1)}. \quad (9.42)$$

Этот же ток поступает в землю в месте однофазного КЗ:

$$I_3 = 3I_0^{(1)} = 3I_1^{(1)}. \quad (9.43)$$

Напряжения неповрежденных фаз:

$$\begin{aligned}\dot{U}_B &= \dot{U}_{B_1} + \dot{U}_{B_2} + \dot{U}_{B_0} = a^2 \dot{U}_1 + a \dot{U}_2 + \dot{U}_0 = \\ &= a^2 j\dot{I}_1 (x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}) + a(-j\dot{I}_1 x_{\Sigma 2}) - j\dot{I}_1 x_{\Sigma 0} = \\ &= j\dot{I}_1 [(a^2 - a)x_{\Sigma 2} + (a^2 - 1)x_{\Sigma 0}];\end{aligned}\quad (9.44)$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_C &= \dot{U}_{C_1} + \dot{U}_{C_2} + \dot{U}_{C_0} = a \dot{U}_1 + a^2 \dot{U}_2 + \dot{U}_0 = \\ &= aj\dot{I}_1 (x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}) - ja^2 \dot{I}_1 x_{\Sigma 2} - j\dot{I}_1 x_{\Sigma 0} = \\ &= j\dot{I}_1 [(a - a^2)x_{\Sigma 2} + (a - 1)x_{\Sigma 0}].\end{aligned}\quad (9.45)$$

На основании полученных соотношений построим векторные диаграммы токов и напряжений в месте однофазного КЗ (рис. 9.4 и 9.5).

Угол θ изменяется от 60° до 180° и зависит от величины $x_{\Sigma 0}$:
при

$$x_{\Sigma 0} \rightarrow 0, \quad \theta \rightarrow 180^\circ;$$

при

$$x_{\Sigma 0} \rightarrow \infty, \quad \theta \rightarrow 60^\circ;$$

если

$$x_{\Sigma 0} = x_{\Sigma 2}, \text{ то } \theta = 120^\circ.$$

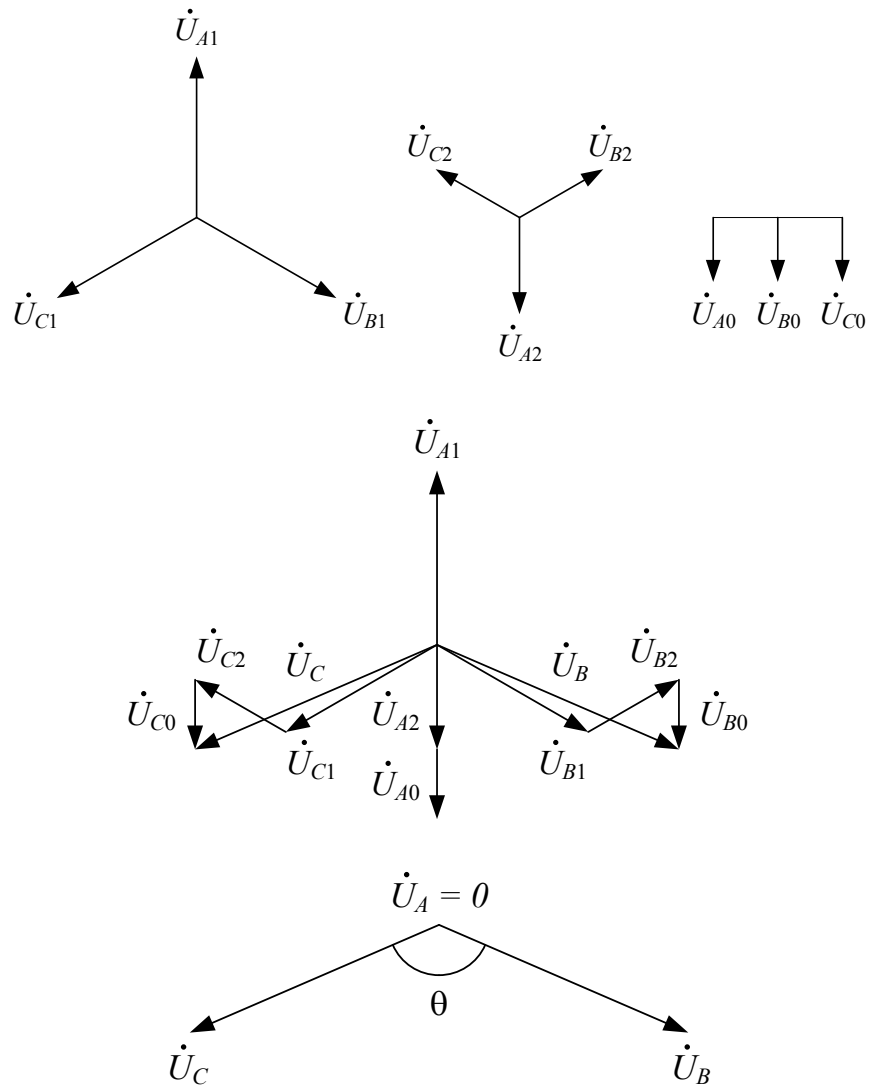


Рис. 9.4

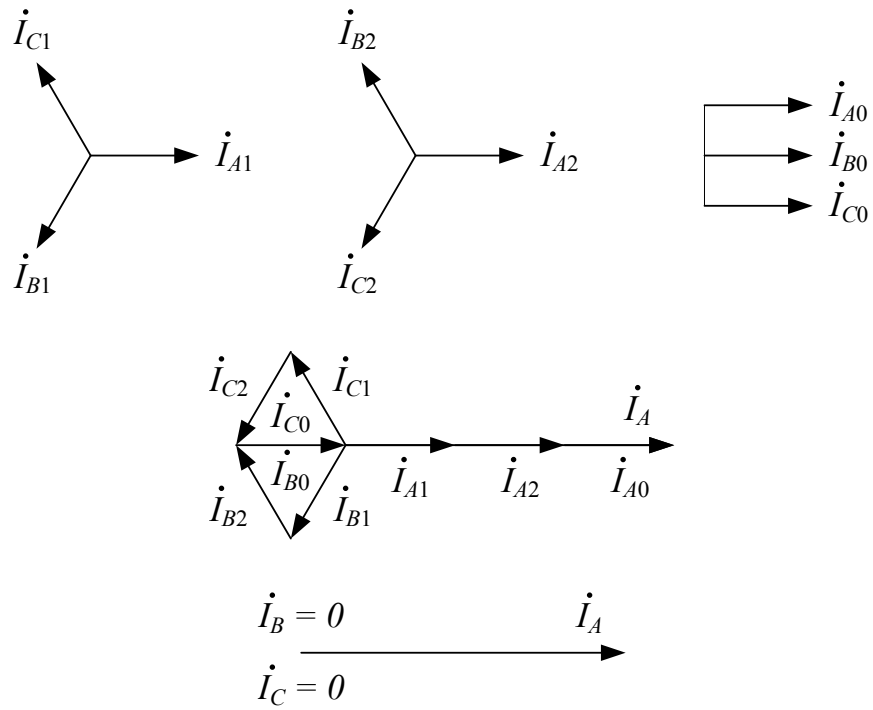


Рис. 9.5

9.3. Двухфазное короткое замыкание на землю

Двухфазное КЗ на землю (рис. 9.6).

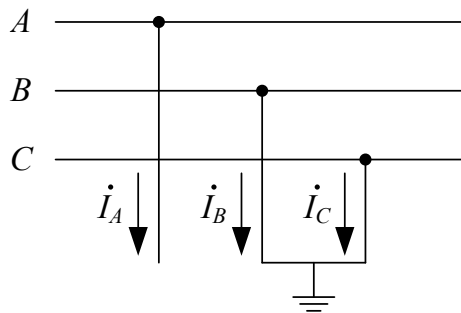


Рис. 9.6

Граничные условия для данного вида КЗ:

$$\dot{U}_B = 0; \quad (9.46)$$

$$\dot{U}_C = 0; \quad (9.47)$$

$$i_A = 0. \quad (9.48)$$

Для особой фазы запишем:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 0; \quad (9.49)$$

$$\dot{U}_1 = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a\dot{U}_B + a^2\dot{U}_C) = \frac{1}{3}\dot{U}_A; \quad (9.50)$$

$$\dot{U}_2 = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a^2\dot{U}_B + a\dot{U}_C) = \frac{1}{3}\dot{U}_A; \quad (9.51)$$

$$\dot{U}_0 = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C) = \frac{1}{3}\dot{U}_A; \quad (9.52)$$

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 = \dot{U}_0; \quad (9.53)$$

$$\dot{U}_A = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0 = 3\dot{U}_1. \quad (9.54)$$

Выразим из (9.2) \dot{U}_2 , а из (9.3) \dot{U}_0 , и приравняем их между собой:

$$j\dot{I}_2 x_{\Sigma 2} = j\dot{I}_0 x_{\Sigma 0}. \quad (9.55)$$

Из (9.55) можно записать:

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_2 \frac{x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 0}}; \quad (9.56)$$

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_0 \frac{x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 2}}. \quad (9.57)$$

Пользуясь выражением (9.49) и (9.56), получим:

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_2 \frac{x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 0}} = 0.$$

Откуда

$$\dot{I}_2 = -\dot{I}_1 \frac{x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}}. \quad (9.58)$$

Если воспользоваться выражениями (9.49) и (9.57), то

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_0 \frac{x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 2}} + \dot{I}_0 = 0.$$

Откуда

$$\dot{I}_0 = -\dot{I}_1 \frac{x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}}. \quad (9.59)$$

Вычтем из (9.1) уравнение (9.2) с учетом (9.53) и (9.58), получим:

$$\begin{aligned} \dot{E}_1 &= \dot{U}_1 - \dot{U}_2 + j\dot{I}_1 x_{\Sigma 1} - j\dot{I}_2 x_{\Sigma 2} = \\ &= j\dot{I}_1 x_{\Sigma 1} + j\dot{I}_1 \frac{x_{\Sigma 0} x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 2}} = j\dot{I}_1 \left(x_{\Sigma 1} + \frac{x_{\Sigma 0} x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 2}} \right). \end{aligned} \quad (9.60)$$

Отсюда можно записать

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}_1}{j \left(x_{\Sigma 1} + \frac{x_{\Sigma 0} x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 2}} \right)}. \quad (9.61)$$

Действующее значение тока прямой последовательности при двухфазном КЗ на землю:

$$I_1^{(1,1)} = \frac{E_1}{x_{\Sigma 1} + \frac{x_{\Sigma 0} x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 2}}}. \quad (9.62)$$

Комплексное и действующее значения напряжения прямой последовательности при двухфазном КЗ на землю:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 = \dot{U}_0 = -j\dot{I}_2 x_{\Sigma 2} = j\dot{I}_1 \frac{x_{\Sigma 0} x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 2}}. \quad (9.63)$$

$$U_1^{(1,1)} = I_1^{(1,1)} \frac{x_{\Sigma 0} x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 2}}. \quad (9.64)$$

Запишем, чему будут равны токи поврежденных фаз:

$$\begin{aligned} \dot{I}_B &= \dot{I}_{B_1} + \dot{I}_{B_2} + \dot{I}_{B_0} = a^2 \dot{I}_1 + a \dot{I}_2 + \dot{I}_0 = \\ &= a^2 \dot{I}_1 + a \left(-\dot{I}_1 \frac{x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 2}} \right) - \dot{I}_1 \frac{x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 2}} = \\ &= \dot{I}_1 \left(a^2 - a \frac{x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 2}} - \frac{x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 2}} \right). \end{aligned} \quad (9.65)$$

$$\begin{aligned}
 \dot{I}_C &= \dot{I}_{C_1} + \dot{I}_{C_2} + \dot{I}_{C_0} = a\dot{I}_1 + a^2\dot{I}_2 + \dot{I}_0 = \\
 &= a\dot{I}_1 - a^2\dot{I}_1 \frac{x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 2}} - \dot{I}_1 \frac{x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 2}} = \quad (9.66) \\
 &= \dot{I}_1 \left(a - a^2 \frac{x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 2}} - \frac{x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 2}} \right).
 \end{aligned}$$

Действующее значение тока поврежденных фаз будет определяться

$$I_B = I_C = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{\Sigma 0} x_{\Sigma 2}}{(x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 2})^2}} I_1^{(1,1)}. \quad (9.67)$$

Построим векторные диаграммы напряжений и токов в месте двухфазного КЗ на землю (рис. 9.7 и 9.8).

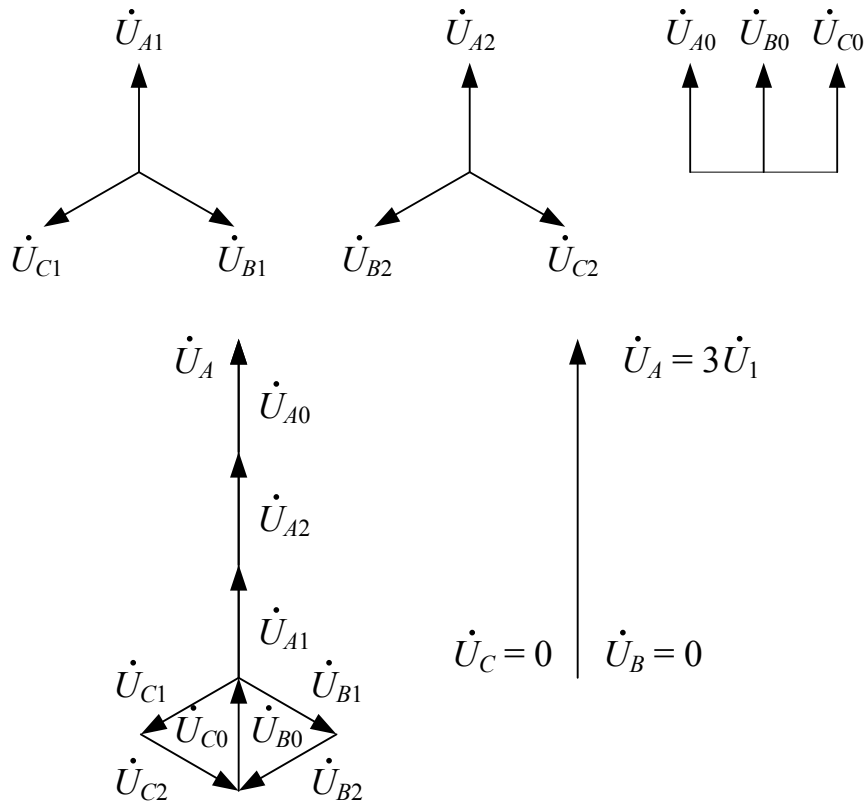


Рис. 9.7

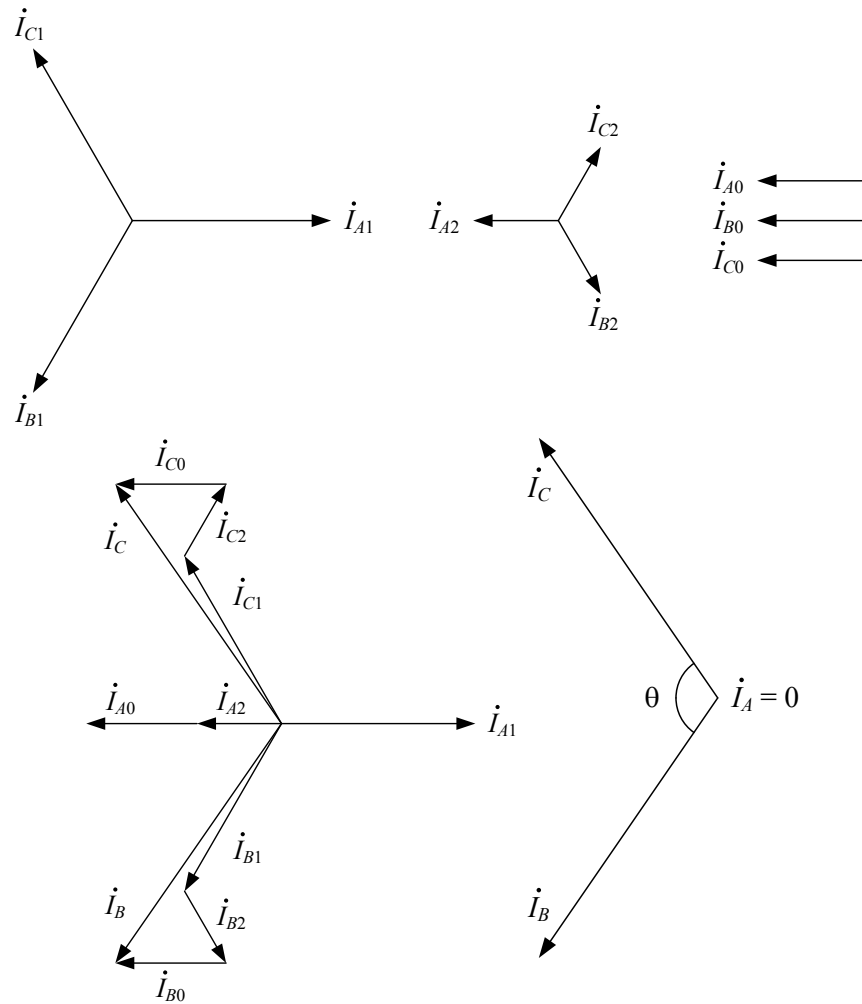


Рис. 9.8

Ток, протекающий в земле при данном виде повреждения, равен утроенному значению тока нулевой последовательности, то есть

$$I_3 = 3I_0^{(1,1)} = 3I_1^{(1,1)} \frac{x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 2}}. \quad (9.68)$$

10. Соотношения между токами трехфазного короткого замыкания и токами несимметричных коротких замыканий

1. Соотношение между токами трехфазного и двухфазного КЗ:

$$I^{(3)} = \frac{E_1}{x_{\Sigma 1}}, \quad I^{(2)} = \sqrt{3}I_1^{(2)}, \quad I_1^{(2)} = \frac{E_1}{x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2}}, \quad (10.1)$$

$$\frac{I^{(2)}}{I^{(3)}} = \frac{\sqrt{3}E_1 x_{\Sigma 1}}{E_1 (x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 2})} = \frac{\sqrt{3}x_{\Sigma 1}}{x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2}}.$$

Если принять, что $x_{\Sigma 1} = x_{\Sigma 2}$, то $\frac{I^{(2)}}{I^{(3)}} = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0,866$.

2. Соотношение между токами трехфазного и однофазного КЗ:

$$I^{(3)} = \frac{E_1}{x_{\Sigma 1}}, \quad I^{(1)} = 3I_1^{(1)},$$

$$I_1^{(1)} = \frac{E_1}{x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}}, \quad (10.2)$$

$$\frac{I^{(1)}}{I^{(3)}} = \frac{3E_1 x_{\Sigma 1}}{E_1 (x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0})} = \frac{3x_{\Sigma 1}}{x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}}.$$

Если $x_{\Sigma 1} = x_{\Sigma 2} = x_{\Sigma 0}$, то $I^{(1)} = I^{(3)}$.

Если $x_{\Sigma 1} = x_{\Sigma 2}$, а $x_{\Sigma 0} \rightarrow 0$, то $\frac{I^{(1)}}{I^{(3)}} = 1,5$.

В силу того, что величина тока однофазного КЗ зависит от $x_{\Sigma 0}$, регулируя в сети количество заземленных нейтралей, можно изменять величину тока однофазного КЗ.

3. Соотношение между токами трехфазного и двухфазного КЗ на землю

$$I^{(3)} = \frac{E_1}{x_{\Sigma 1}}, \quad I^{(1,1)} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{\Sigma 2} x_{\Sigma 0}}{(x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0})^2}} I_1^{(1,1)},$$

$$I_1^{(1,1)} = \frac{E_1}{x_{\Sigma 1} + \frac{x_{\Sigma 2} x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}}}, \quad (10.3)$$

$$\frac{I_1^{(1,1)}}{I^{(3)}} = \frac{\sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{\Sigma 2} x_{\Sigma 0}}{(x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0})^2}} E_1 x_{\Sigma 1}}{\left(x_{\Sigma 1} + \frac{x_{\Sigma 2} x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}} \right) E_1} = \frac{\sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{\Sigma 2} x_{\Sigma 0}}{(x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0})^2}} x_{\Sigma 1}}{x_{\Sigma 1} + \frac{x_{\Sigma 2} x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}}}.$$

При $x_{\Sigma 1} = x_{\Sigma 2}$ и $x_{\Sigma 0} \rightarrow 0$

$$\frac{I_1^{(1,1)}}{I^{(3)}} = \sqrt{3}.$$

При $x_{\Sigma 1} = x_{\Sigma 2}$ и $x_{\Sigma 0} \rightarrow \infty$

$$\frac{I_1^{(1,1)}}{I^{(3)}} = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0,866.$$

11. Учет переходных сопротивлений в месте повреждения при несимметричных коротких замыканиях

Короткие замыкания, происходящие в энергосистемах, как правило, не являются чисто металлическими, а в месте повреждения горит электрическая дуга, которая характеризуется активным сопротивлением.

Наличие сопротивления дуги в месте повреждения существенно влияет на расчет переходного процесса при несимметричных КЗ.

При анализе несимметричных КЗ в этом случае пользуются следующим приемом.

11.1. Двухфазное короткое замыкание

Двухфазное КЗ изображено на рис. 11.1.

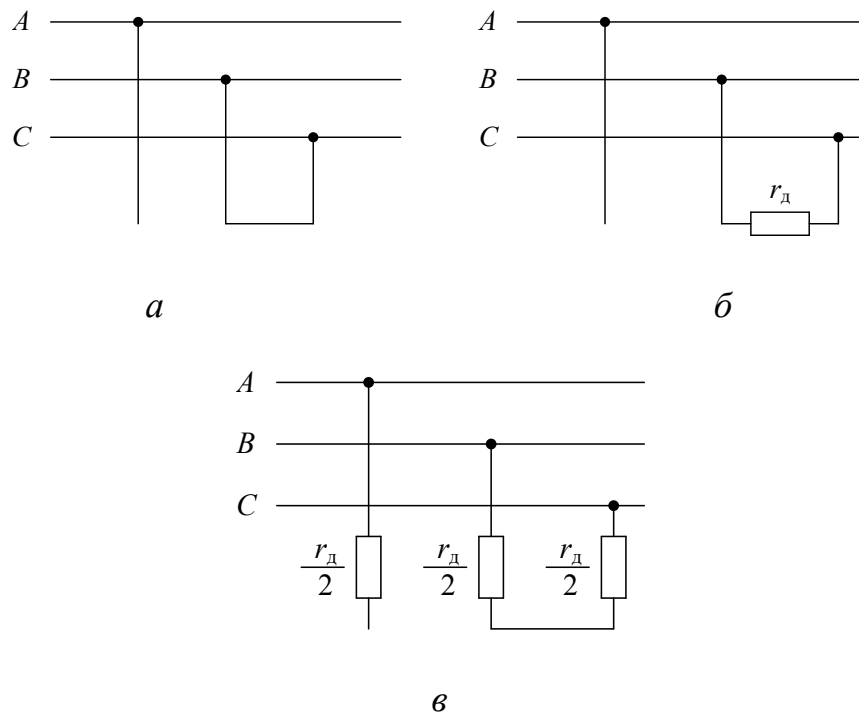


Рис. 11.1

Такое замыкание можно представить как глухое двухфазное КЗ на ответвлении, фазы которого имеют одинаковые сопротивления $\frac{r_d}{2}$. Таким приемом несимметричный участок трехфазной цепи приводят к симметричному (рис. 11.1, в).

С учетом этого

$$Z_{\Sigma 1} = jx_{\Sigma 1} + \frac{r_d}{2};$$

$$Z_{\Sigma 2} = jx_{\Sigma 2} + \frac{r_d}{2};$$

$$I_1^{(2)} = \frac{\dot{E}_1}{Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 2}} = \frac{\dot{E}_1}{r_d + j(x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2})}.$$

Напряжение прямой последовательности

$$U_1^{(2)} = I_1^{(2)} \left(jx_{\Sigma 2} + \frac{r_d}{2} \right).$$

11.2. Однофазное короткое замыкание

Однофазное КЗ изображено на рис. 11.2.

Для приведения несимметричного участка трехфазной цепи к симметричному включим сопротивления r_d на ответвлении в другие фазы (рис. 11.2, в).

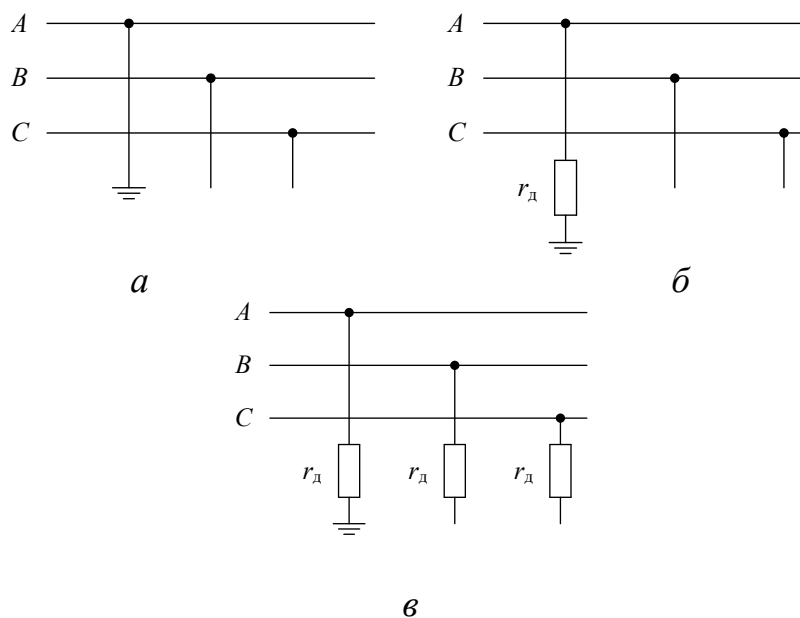


Рис. 11.2

В этом случае изменятся результирующие сопротивление прямой, обратной и нулевой последовательностей:

$$Z_{\Sigma 1} = jx_{\Sigma 1} + r_d;$$

$$Z_{\Sigma 2} = jx_{\Sigma 2} + r_d;$$

$$Z_{\Sigma 0} = jx_{\Sigma 0} + r_d.$$

Соответственно

$$I_1^{(1)} = \frac{\dot{E}_1}{Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 2} + Z_{\Sigma 0}} = \frac{\dot{E}_1}{3r_d + j(x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0})},$$

а напряжение прямой последовательности

$$U_1^{(1)} = I_1^{(1)} [2r_d + j(x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0})].$$

11.3. Двухфазное короткое замыкание на землю

Двухфазное КЗ на землю приведено на рис. 11.3.

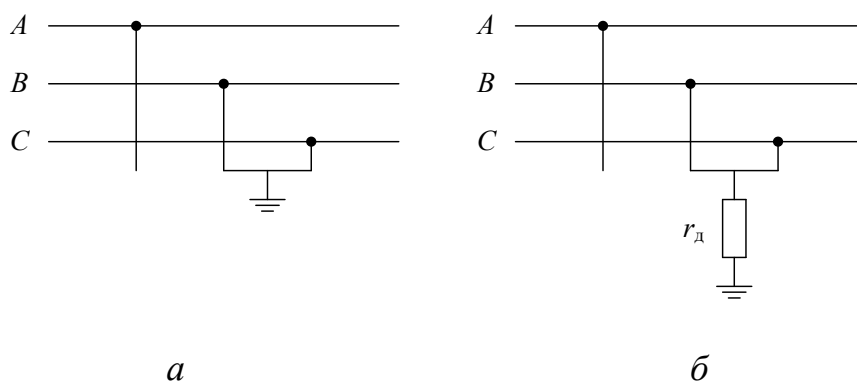


Рис. 11.3

В этом случае через сопротивление r_d протекает только ток нулевой последовательности утроенной величины. В связи с этим изменится лишь сопротивление нулевой последовательности $Z_{\Sigma 0} = jx_{\Sigma 0} + 3r_d$, а $x_{\Sigma 1}$ и $x_{\Sigma 2}$ останутся неизменными.

Поэтому ток прямой последовательности в месте замыкания

$$I_1^{(1)} = \frac{\dot{E}_1}{jx_{\Sigma 1} + \frac{jx_{\Sigma 2}(3r_d + jx_{\Sigma 0})}{3r_d + j(x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0})}}.$$

Напряжение прямой последовательности:

$$U_1^{(1)} = I_1^{(1,1)} [jx_{\Sigma 2} // (3r_d + jx_{\Sigma 0})] = I_1^{(1,1)} \frac{jx_{\Sigma 2}(3r_d + jx_{\Sigma 0})}{3r_d + j(x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0})}.$$

12. Правило эквивалентности прямой последовательности (правило Щедрина) и его применение в расчетах

Материал, рассмотренный в предыдущих параграфах, показывает, что токи обратной и нулевой последовательностей и напряжения всех последовательностей пропорциональны току прямой последовательности в месте несимметричного КЗ. Следовательно, задача расчета любого несимметричного КЗ прежде всего состоит в нахождении тока прямой последовательности в месте рассматриваемого вида КЗ:

$K^{(3)}$ (трехфазное КЗ)

$$I_1^{(3)} = \frac{E_1}{x_{\Sigma 1}};$$

$K^{(2)}$ (двухфазное КЗ)

$$I_1^{(2)} = \frac{E_1}{x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2}};$$

$K^{(1)}$ (однофазное КЗ)

$$I_1^{(1)} = \frac{E_1}{x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}};$$

$K^{(1,1)}$ (однофазное КЗ на землю)

$$I_1^{(1,1)} = \frac{E_1}{x_{\Sigma 1} + \frac{x_{\Sigma 2} x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}}}.$$

В самом общем виде можно записать:

$$I_1^{(n)} = \frac{E_1}{x_{\Sigma 1} + \Delta x^{(n)}},$$

где $\Delta x^{(n)}$ – дополнительное сопротивление, или сопротивление шунта, зависящее от вида короткого замыкания;

n – вид несимметричного КЗ.

Обобщенное выражение для определения тока прямой последовательности и есть математическая запись правила эквивалентности прямой последовательности, которое сформулировал Н. Н. Щедрин.

Ток прямой последовательности при любом виде КЗ может быть определен как ток при симметричном трехфазном КЗ при условии, что действительная точка КЗ удалена на дополнительную реактивность $\Delta x^{(n)}$, называемую шунтом, не зависящую от сопротивления схемы прямой последовательности, а определяемую видом повреждения и результирующим сопротивлением схем обратной и нулевой последовательностей относительно рассматриваемой точки КЗ.

$$\Delta x^{(3)} = 0, \quad \Delta x^{(2)} = x_{\Sigma 2};$$

$$\Delta x^{(1)} = x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}, \quad \Delta x^{(1,1)} = \frac{x_{\Sigma 2} x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}}.$$

Схемная интерпретация этого положения для различных видов КЗ выглядит следующим образом (рис. 12.1).

Полные (аварийные) токи при различных видах несимметричных КЗ определяются через токи прямой последовательности.

$$I^{(3)} = I_1^{(3)}, \quad I^{(2)} = \sqrt{3} I_1^{(2)},$$

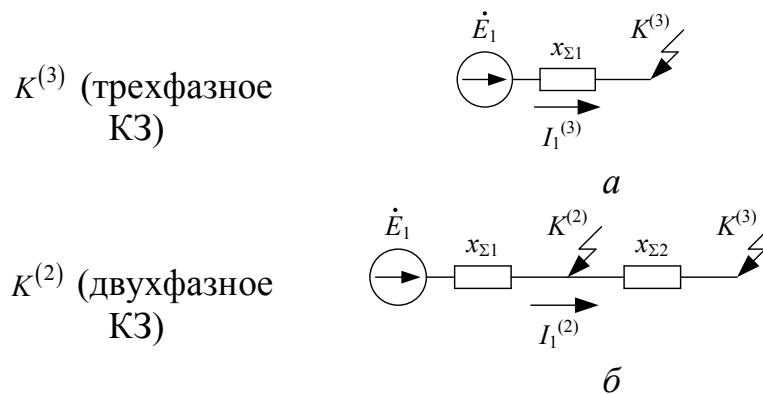
$$I^{(1)} = 3 I_1^{(1)}, \quad I^{(1,1)} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{\Sigma 2} x_{\Sigma 0}}{(x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0})^2}} I_1^{(1,1)}.$$

Или в общем виде

$$I^{(n)} = m^{(n)} I_1^{(n)},$$

где m – коэффициент пропорциональности;

$$m^{(3)} = 1, \quad m^{(2)} = \sqrt{3}, \quad m^{(1)} = 3, \quad m^{(1,1)} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{\Sigma 2} x_{\Sigma 0}}{(x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0})^2}}.$$



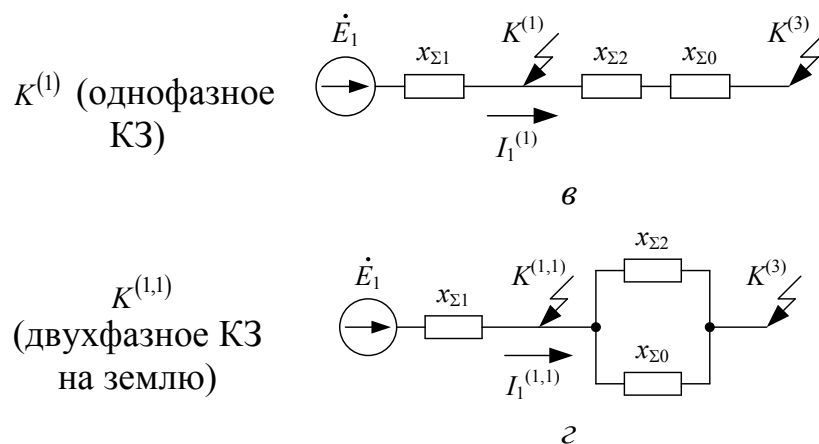


Рис. 12.1

Напряжения прямой последовательности в месте повреждения соответственно равны:

$$U_1^{(3)} = 0, U_1^{(2)} = I_1^{(2)} x_{\Sigma 2},$$

$$U_1^{(1)} = I_1^{(1)} (x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}),$$

$$U_1^{(1,1)} = I_1^{(1,1)} \frac{x_{\Sigma 2} x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}},$$

или в общем виде

$$U_1^{(n)} = I_1^{(n)} \Delta x^{(n)}.$$

Эта формула является следствием из правила эквивалентности прямой последовательности.

Другими словами, напряжение прямой последовательности в месте несимметричного КЗ равно падению напряжения от протекания тока прямой последовательности по сопротивлению $\Delta x^{(n)}$.

13. Аналитический расчет несимметричных коротких замыканий

При аналитическом расчете несимметричных КЗ в самом общем случае необходимо составить схемы замещения всех трех последовательностей (прямой, обратной и нулевой). Схема прямой последовательности составляется с учетом рассматриваемой стадии переходного процесса. Схемы обратной и нулевой последовательностей не зависят от стадии переходного процесса. По результатам преобразования схем обратной и нулевой последовательностей определяют $x_{\Sigma 2}$ и $x_{\Sigma 0}$, а затем $\Delta x^{(n)}$ в зависимости от рассматриваемого вида КЗ.

Величину шунта $\Delta x^{(n)}$ переносят в схему прямой последовательности и действительную точку КЗ удаляют за этот шунт, рассматривая в новой точке трехфазное КЗ.

Пользуясь правилом эквивалентности прямой последовательности, определяют относительное значение тока прямой последовательности при рассматриваемом несимметричном виде КЗ.

По току прямой последовательности, зная коэффициент пропорциональности $m^{(n)}$ для рассматриваемого вида КЗ, определяют полный ток КЗ. Полученный результат умножают на базисный ток и находят значение аварийного тока (тока КЗ) в именованных единицах.

14. Расчет несимметричных коротких замыканий по расчетным кривым

Расчетные кривые могут использоваться для определения тока прямой последовательности в любой момент переходного процесса при любом несимметричном КЗ. Для этого в схеме замещения прямой последовательности в соответствии с правилом эквивалентности прямой последовательности действительную точку КЗ необходимо удалить на величину шунта $\Delta x^{(n)}$ и рассматривать в новой точке симметричное трехфазное КЗ (рис. 14.1).

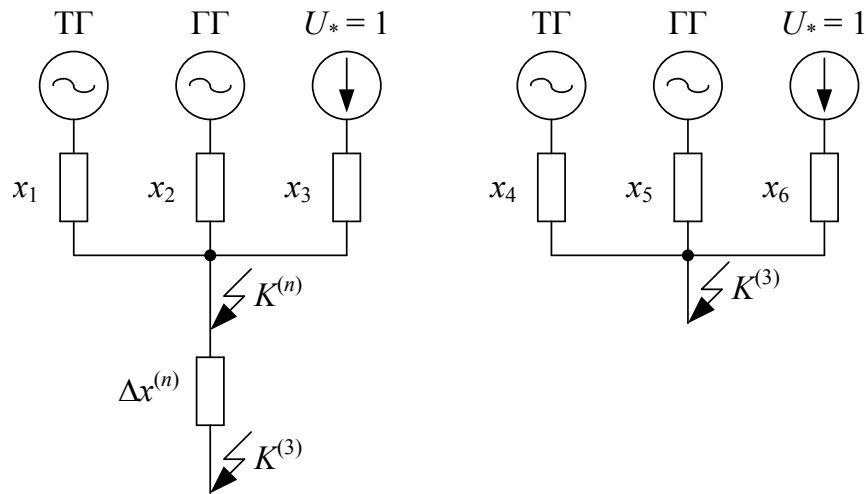


Рис. 14.1

Далее определяют расчетные значения сопротивлений всех лучей схемы, кроме луча системы, при рассматриваемом несимметричном виде КЗ.

$$x_{4 \text{ расч}}^{(n)} = x_4 \frac{S_{\text{нТГ}}}{S_6},$$

$$x_{5 \text{ расч}}^{(n)} = x_5 \frac{S_{\text{нГГ}}}{S_6},$$

где $S_{\text{нТГ}}$ – суммарная мощность ветви турбогенераторов;

$S_{\text{нГГ}}$ – суммарная мощность ветви гидрогенераторов.

Зная расчетные сопротивления лучей, взяв соответствующие кривые, определяют относительные значения периодической составляющей тока прямой последовательности для интересующих нас моментов времени при рассматриваемом виде КЗ (рис. 14.2).

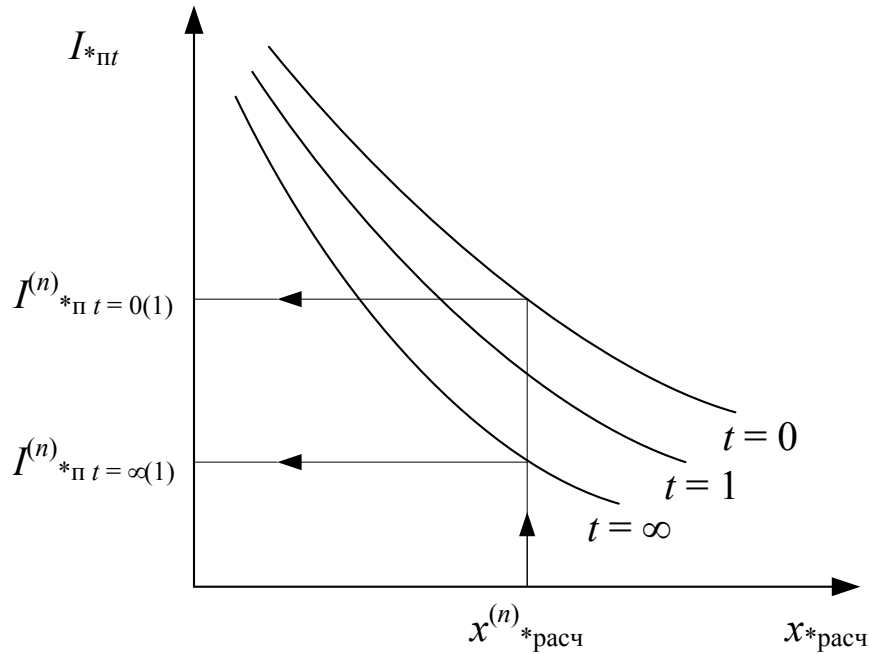


Рис. 14.2

Ток прямой последовательности от луча системы для любого момента времени будет определяться

$$I_{*пт(1)с}^{(n)} = I_{*пт∞(1)с}^{(n)} = \frac{1}{x_6}.$$

Для получения действительных значений токов прямой последовательности каждого луча необходимо относительные значения токов умножить на номинальные токи лучей, а для луча системы – на базисный ток. Все токи должны быть приведены к ступени напряжения, на которой находится точка КЗ.

$$I_{н\Gamma\Gamma} = \frac{S_{н\Gamma\Gamma}}{\sqrt{3}U_{срн}}, \text{ кА}, \quad I_{н\Gamma\Gamma} = \frac{S_{н\Gamma\Gamma}}{\sqrt{3}U_{срн}}, \text{ кА};$$

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_{срн}}, \text{ кА};$$

$$I_{пт(1)t=0\Gamma\Gamma}^{(n)} = I_{*пт(1)t=0\Gamma\Gamma}^{(n)} I_{н\Gamma\Gamma}, \text{ кА};$$

$$I_{пт(1)t=\infty\Gamma\Gamma}^{(n)} = I_{*пт(1)t=\infty\Gamma\Gamma}^{(n)} I_{н\Gamma\Gamma}, \text{ кА};$$

$$I_{пт(1)t=0\Gamma\Gamma}^{(n)} = I_{*пт(1)t=0\Gamma\Gamma}^{(n)} I_{н\Gamma\Gamma}, \text{ кА};$$

$$I_{п(1)t=\infty_{\Gamma}}^{(n)} = I_{*п(1)t=\infty_{\Gamma}}^{(n)} I_{п\Gamma\Gamma}, \text{ кА};$$

$$I_{п(1)t=0_{\text{С}}}^{(n)} = I_{п(1)t=\infty_{\text{С}}}^{(n)} = I_{*п(1)\text{С}}^{(n)} I_{\text{б}}, \text{ кА}.$$

Зная ток прямой последовательности от каждого из лучей, для интересующих моментов времени получают ток прямой последовательности в месте рассматриваемого несимметричного КЗ.

$$I_{(1)}^{n(n)} = I_{п(1)t=0_{\Gamma\Gamma}}^{(n)} + I_{п(1)t=0_{\Gamma\Gamma}}^{(n)} + I_{п(1)t=0_{\text{С}}}^{(n)};$$

$$I_{(1)\infty}^{(n)} = I_{п(1)t=\infty_{\Gamma\Gamma}}^{(n)} + I_{п(1)t=\infty_{\Gamma\Gamma}}^{(n)} + I_{п(1)t=\infty_{\text{С}}}^{(n)}.$$

Аварийный (полный) ток в поврежденных фазах получают путем умножения тока прямой последовательности на коэффициент пропорциональности $m^{(n)}$ для рассматриваемого вида несимметричного КЗ.

$$I^n^{(n)} = m^{(n)} I_{(1)}^{n(n)}, \quad I_{\infty}^{(n)} = m^{(n)} I_{(1)\infty}^{(n)}.$$

15. Распределение и трансформация токов и напряжений различных последовательностей при несимметричных коротких замыканиях

Фазные токи и напряжения при несимметричных КЗ удобнее всего определять путем суммирования симметричных составляющих этих токов и напряжений. Для определения составляющих токов в любой ветви и напряжений в любой точке схемы при несимметричных КЗ в конкретной точке находят распределение токов и напряжений каждой последовательности в одноименных схемах, пользуясь при этом известными правилами и законами распределения токов и напряжений в линейных электрических цепях.

При определении фазных величин за трансформаторами нужно иметь в виду, что токи и напряжения при переходе через трансформатор изменяются не только по величине, но и по фазе, в зависимости от группы соединения обмоток трансформатора.

Для составляющих прямой последовательности при трансформации со стороны звезды на треугольник происходит поворот векторов на угол $e^{-j30^\circ N}$, а векторов обратной последовательности – на угол $e^{j30^\circ N}$, где N – номер группы соединения обмоток трансформатора.

С учетом сказанного:

$$\dot{F}_{a1} = \dot{F}_{A1} e^{-j30^\circ N} \frac{1}{K};$$

$$\dot{F}_{a2} = \dot{F}_{A2} e^{j30^\circ N} \frac{1}{K},$$

где \dot{F}_{A1} \dot{F}_{A2} – векторы прямой и обратной последовательности обмотки, соединенной в звезду;

\dot{F}_{a1} и \dot{F}_{a2} – векторы прямой и обратной последовательностей обмотки, соединенной в треугольник;

$K = \frac{\sqrt{3}W_Y}{W_\Delta}$ – линейный коэффициент трансформации;

W_Y и W_Δ – число витков фазных обмоток.

Для трансформатора со схемой соединения Y_0/Δ -11:

$$\dot{F}_{a1} = \dot{F}_{A1} e^{-j330^\circ N} \frac{1}{K} = \frac{1}{K} \dot{F}_{A1} e^{j30^\circ};$$

$$\dot{F}_{a2} = \frac{1}{K} \dot{F}_{A2} e^{-j30^\circ}.$$

Отсюда видим, что для трансформатора с такой группой соединения обмоток, векторы прямой последовательности поворачиваются на угол 30° в направлении вращения векторов, а векторы обратной последовательности – на 30° в противоположном направлении (рис. 15.1).

$$\dot{F}_a = \dot{F}_{a1} + \dot{F}_{a2} = \frac{1}{K} (\dot{F}_{A1} e^{j30^\circ} + \dot{F}_{A2} e^{-j30^\circ}).$$

При переходе через трансформатор в обратном направлении угловые смещения симметричных составляющих меняют свой знак на противоположный.

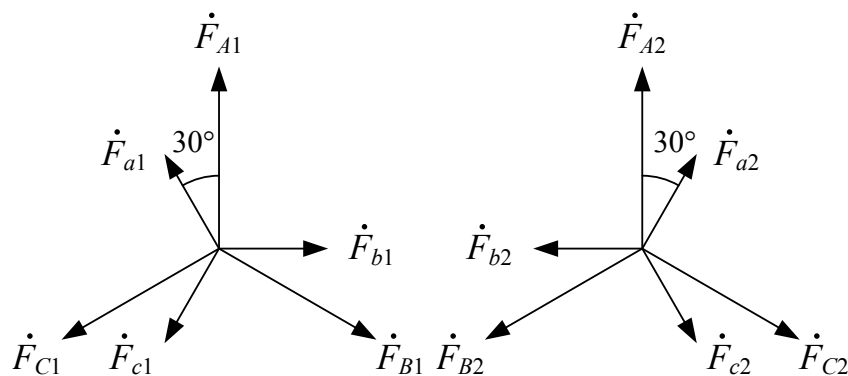


Рис. 15.1

Наиболее простые соотношения получаются для трансформатора с соединением обмоток по группе $Y_0/Y-12$, так как в этом случае угловые смещения токов и напряжений вообще отсутствуют. Из выражений, полученных для трансформатора с соединением обмоток по схеме $Y_0/\Delta-11$, следует, что токи и напряжения за треугольником не содержат составляющих нулевой последовательности.

Если, например, трансформатор имеет группу соединений $Y_0/\Delta-11$, то для фазы A на низкой стороне трансформатора будем иметь

$$\dot{U}_a = \frac{1}{K} (\dot{U}_{A1} e^{j30^\circ} + \dot{U}_{A2} e^{-j30^\circ});$$

$$\dot{I}_a = (\dot{I}_{A1} e^{j30^\circ} + \dot{I}_{A2} e^{-j30^\circ}) K.$$

В случае, когда имеется соединение обмоток трансформатора Y_0/Y_0 , должны быть учтены трансформируемые составляющие нулевой последовательности.

Следует особо подчеркнуть, что если токи и напряжения выражены в относительных единицах, то при их трансформации должны учитываться только угловые сдвиги.

16. Комплексные схемы замещения для исследования различных видов несимметричных коротких замыканий

Установленные в предыдущих темах соотношения для симметричных составляющих токов и напряжений при различных несимметричных КЗ позволяют для каждого конкретного вида КЗ соединить между собой схемы отдельных последовательностей и тем самым получить комплексную схему замещения. Эти схемы особенно удобны при использовании в расчетах несимметричных КЗ расчетных столов и моделей, так как в этом случае имеется возможность с помощью приборов замерить напряжение отдельных последовательностей в тех или иных узлах и токи отдельных последовательностей в тех или иных ветвях схемы.

1. Трехфазное КЗ – $K^{(3)}$ (рис. 16.1).

$$\dot{U}_1^{(3)} = \dot{U}_2^{(3)} = \dot{U}_0^{(3)} = 0;$$

$$\dot{I}_1^{(3)} = \dot{I}^{(3)}.$$

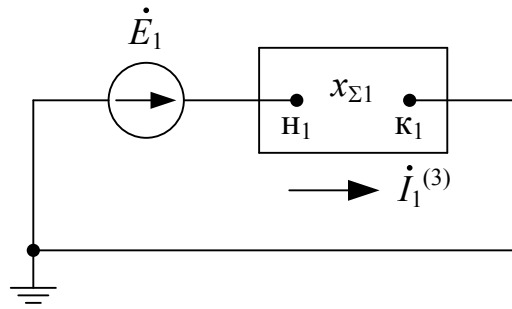


Рис. 16.1

2. Двухфазное КЗ – $K^{(2)}$ (рис. 16.2).

$$\dot{U}_1^{(2)} = \dot{U}_2^{(2)};$$

$$\dot{i}_1^{(2)} = -\dot{i}_2^{(2)}.$$

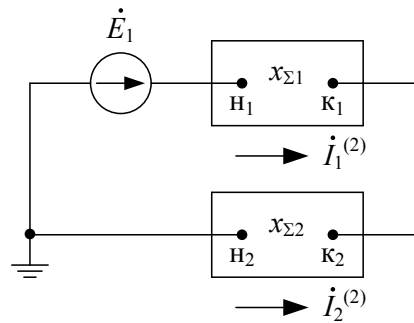


Рис. 16.2

3. Однофазное КЗ – $K^{(1)}$ (рис. 16.3).

$$\dot{U}_1^{(1)} = -(\dot{U}_2^{(1)} + \dot{U}_0^{(1)});$$

$$\dot{i}_1^{(1)} = \dot{i}_2^{(1)} = \dot{i}_0^{(1)}.$$

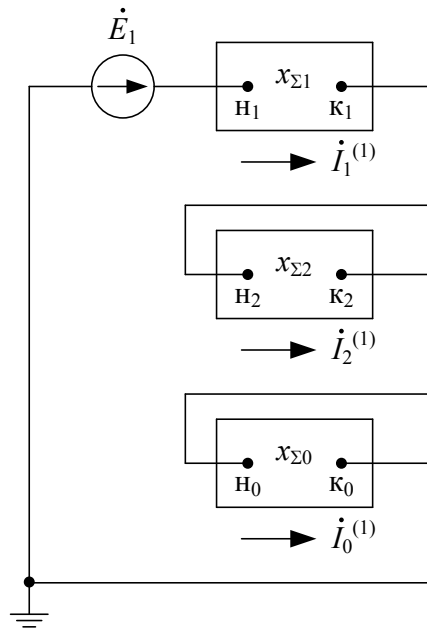


Рис. 16.3

4. Двухфазное КЗ на землю – $K^{(1,1)}$ (рис. 16.4).

$$\dot{U}_1^{(1,1)} = \dot{U}_2^{(1,1)} = \dot{U}_0^{(1,1)};$$

$$I_1^{(1,1)} = -(I_2^{(1,1)} + I_0^{(1,1)}).$$

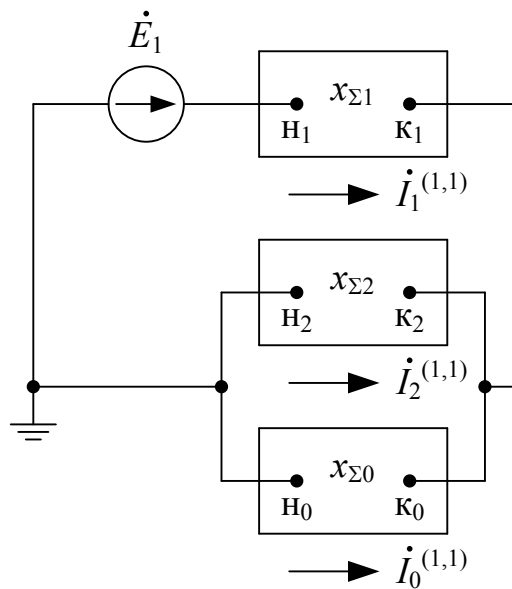


Рис. 16.4

17. Расчет переходного процесса при продольной несимметрии

Продольная несимметрия имеет место в энергетической системе при обрыве фаз линии или неодновременном замыкании контактов высоковольтных выключателей. Продольную несимметрию в точке трехфазной сети можно представить как включение в этой точке неодинаковых сопротивлений в каждую фазу (рис. 17.1).

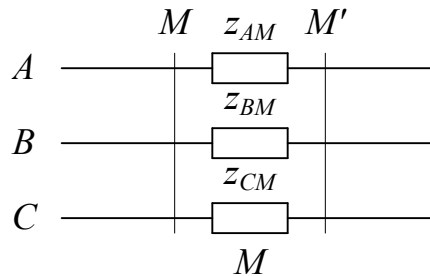


Рис. 17.1

$$Z_{AM} \neq Z_{BM} \neq Z_{CM}.$$

Падения напряжений в точке $M \Delta \dot{U}_M$ будут несимметричны, и их можно разложить на симметричные составляющие (рис. 17.2).

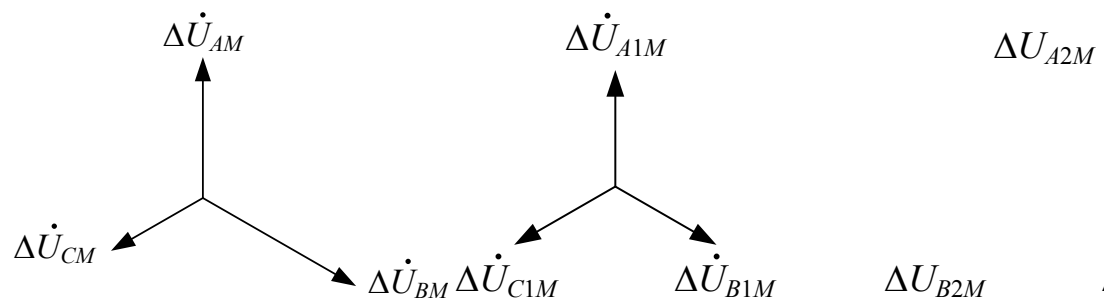
В этом случае в сети протекают асимметричные токи, которые также можно разложить на симметричные составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей.

При данном виде несимметрии по образу и подобию поперечной несимметрии (несимметричные КЗ) для каждой из последовательностей можно записать уравнения связи между симметричными составляющими:

$$\dot{E}_1 = \Delta \dot{U}_1 + j \dot{I}_1 x_{\Sigma 1}, \quad (17.1)$$

$$0 = \Delta \dot{U}_2 + j \dot{I}_2 x_{\Sigma 2}, \quad (17.2)$$

$$0 = \Delta \dot{U}_0 + j \dot{I}_0 x_{\Sigma 0}. \quad (17.3)$$



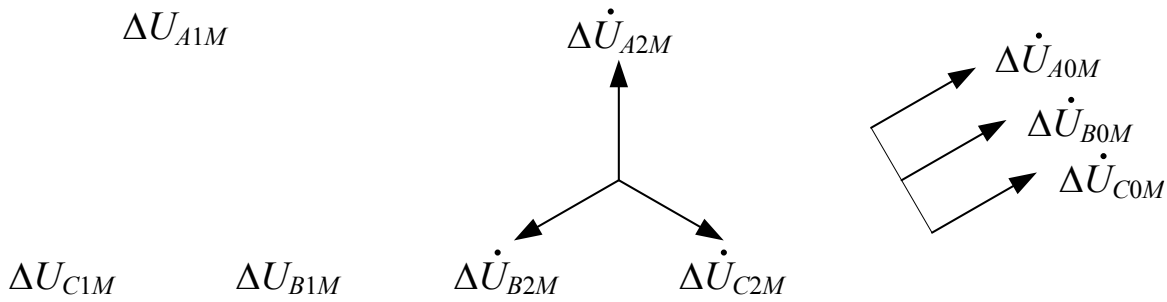


Рис. 17.2

Для решения данной системы уравнений недостающие три уравнения будут записываться из граничных условий каждого конкретного вида продольной несимметрии.

При составлении схем замещения отдельных последовательностей при продольной несимметрии падения напряжений отдельных последовательностей необходимо включать в рассечку фазы в месте повреждения соответствующей схемы замещения.

Рассмотрим пример составления схем замещения отдельных последовательностей при поперечной несимметрии в точке K и продольной в точке M (рис. 17.3).

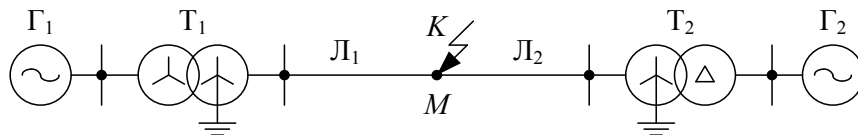


Рис. 17.3

Схемы замещения прямой последовательности:

а) поперечная несимметрия (КЗ) в точке K (рис. 17.4);

$$x_{\Sigma 1} = (x_{\Gamma 1} + x_{T1} + x_{Л1}) // (x_{\Gamma 2} + x_{T2} + x_{Л2}), \quad (17.4)$$

$$E_{\text{экв}} = \frac{E_1(x_{\Gamma 2} + x_{T2} + x_{Л2}) + E_2(x_{\Gamma 1} + x_{T1} + x_{Л1})}{x_{\Gamma 1} + x_{T1} + x_{Л1} + x_{\Gamma 2} + x_{T2} + x_{Л2}}; \quad (17.5)$$

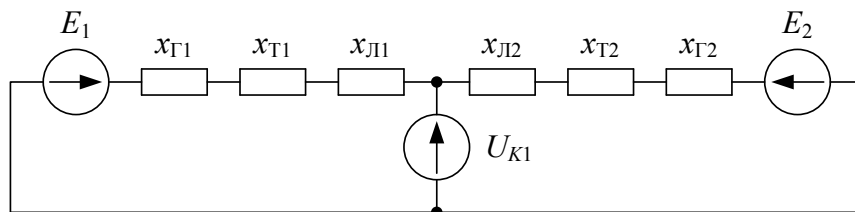


Рис. 17.4

б) продольная несимметрия (обрыв фазы) в точке M (рис. 17.5);

$$x_{\Sigma 1} = x_{Г1} + x_{Т1} + x_{Л1} + x_{Г2} + x_{Т2} + x_{Л2}. \quad (17.6)$$

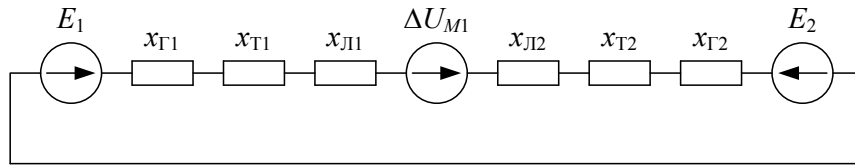


Рис. 17.5

Наибольшее значение ЭДС может быть

$$E_{\text{эКВ}} = E_1 + E_2. \quad (17.7)$$

Схемы замещения обратной последовательности:

а) поперечная несимметрия (КЗ) в точке K (рис. 17.6);

$$x_{\Sigma 2} = (x_{Г1} + x_{Т1} + x_{Л1}) // (x_{Г2} + x_{Т2} + x_{Л2}); \quad (17.8)$$

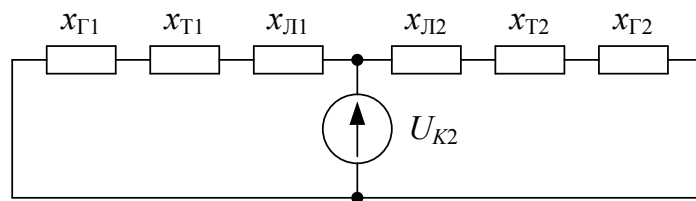


Рис. 17.6

б) продольная несимметрия (обрыв фазы) в точке M (рис. 17.7);

$$x_{\Sigma 2} = x_{Г1} + x_{Т1} + x_{Л1} + x_{Г2} + x_{Т2} + x_{Л2}. \quad (17.9)$$

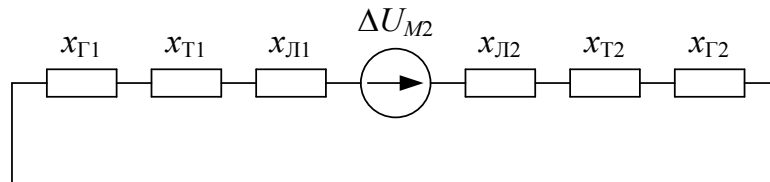


Рис. 17.7

Схемы нулевой последовательности:

а) поперечная несимметрия (КЗ) в точке K (рис. 17.8);

$$x_{\Sigma 0} = (x_{\mu 0} + x_{Г1} + x_{Л1}) // (x_{Т2} + x_{Л2}); \quad (17.10)$$

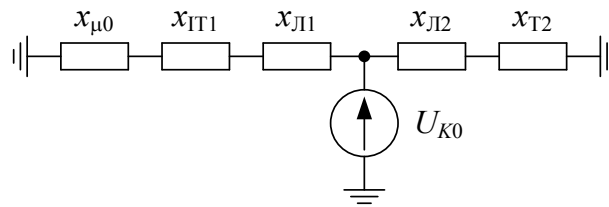


Рис. 17.8

б) продольная несимметрия (обрыв фазы) в точке M (рис. 17.9);

$$x_{\Sigma 0} = x_{\mu 0} + x_{ГТ1} + x_{Л1} + x_{Т2} + x_{Л2}. \quad (17.11)$$

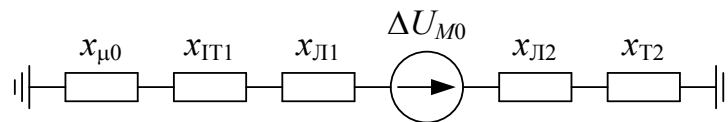


Рис. 17.9

17.1. Разрыв одной фазы

Разрыв одной фазы (рис. 17.10).

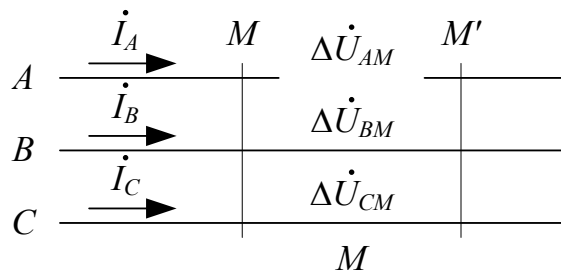


Рис. 17.10

Симметричные составляющие падения напряжений в месте разрыва и симметричные составляющие токов, протекающих в сети, связаны между собой следующими уравнениями:

$$\dot{E}_1 = \Delta \dot{U}_{1M} + j\dot{I}_1 x_{\Sigma 1}; \quad (17.12)$$

$$0 = \Delta \dot{U}_{2M} + j\dot{I}_2 x_{\Sigma 2}; \quad (17.13)$$

$$0 = \Delta \dot{U}_{0M} + j\dot{I}_0 x_{\Sigma 0}. \quad (17.14)$$

Граничные условия при данном виде повреждения

$$\dot{I}_A = 0; \quad (17.15)$$

$$\Delta \dot{U}_{BM} = 0; \quad (17.16)$$

$$\Delta \dot{U}_{CM} = 0. \quad (17.17)$$

Уравнения, описывающие переходный процесс при этом виде повреждения, аналогичны уравнениям, описывающим переходный процесс при двухфазном КЗ на землю.

Решая совместно систему уравнений (17.12)–(17.17), мы получим аналогичные зависимости, как и при двухфазном КЗ на землю, для расчета симметричных составляющих тока и падения напряжения.

$$\dot{I}_{M_1} = \frac{\dot{E}_1}{j(x_{\Sigma 1} + \Delta x_M^{(1)})}; \quad (17.18)$$

$$\Delta x_M^{(1)} = x_{\Sigma 2} // x_{\Sigma 0}; \quad (17.19)$$

$$\dot{I}_{M_2} = -\dot{I}_{M_1} \frac{x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}}; \quad (17.20)$$

$$\dot{I}_{M_0} = -\dot{I}_{M_1} \frac{x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}}; \quad (17.21)$$

$$\Delta \dot{U}_{M_1} = \Delta \dot{U}_{M_2} = \Delta \dot{U}_{M_0} = j \dot{I}_{M_1} \Delta x_M^{(1)}; \quad (17.22)$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{AM} &= \Delta \dot{U}_{M_1} + \Delta \dot{U}_{M_2} + \Delta \dot{U}_{M_0} = \\ &= 3 \Delta \dot{U}_{M_1} = 3 j \dot{I}_{M_1} \Delta x_M^{(1)}; \end{aligned} \quad (17.23)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{BM} &= \dot{I}_{BM_1} + \dot{I}_{BM_2} + \dot{I}_{BM_0} = \\ &= a^2 \dot{I}_{M_1} + a \dot{I}_{M_2} + \dot{I}_{M_0} = \dot{I}_{M_1} \left(a^2 - \frac{ax_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 2}} \right); \end{aligned} \quad (17.24)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{CM} &= \dot{I}_{CM_1} + \dot{I}_{CM_2} + \dot{I}_{CM_0} = \\ &= a \dot{I}_{M_1} + a^2 \dot{I}_{M_2} + \dot{I}_{M_0} = \dot{I}_{M_1} \left(a - \frac{a^2 x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 2}} \right); \end{aligned} \quad (17.25)$$

$$I_{BM} = I_{CM} = I_{M_1} \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{\Sigma 0} x_{\Sigma 2}}{(x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 2})^2}}. \quad (17.26)$$

17.2. Разрыв двух фаз

Разрыв двух фаз (рис. 17.11).

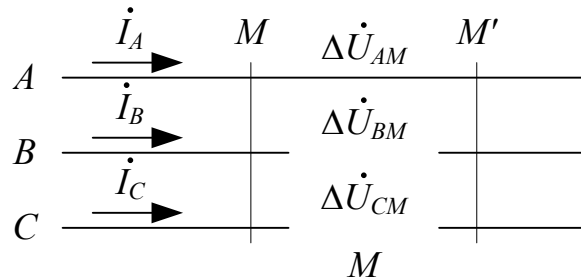


Рис. 17.11

Уравнения, связывающие между собой симметричные составляющие токов и падений напряжений в месте несимметрии, в этом случае те же, что и при разрыве одной фазы, то есть (17.12)–(17.14).

Граничные условия при данном виде повреждения будут:

$$\Delta \dot{U}_{AM} = 0; \quad (17.27)$$

$$\dot{I}_B = 0; \quad (17.28)$$

$$\dot{I}_C = 0. \quad (17.29)$$

Система уравнений (17.12)–(17.14) и (17.27)–(17.29), описывающая переходный процесс при данном виде повреждения, аналогична уравнениям, описывающим переходный процесс при однофазном КЗ. Следовательно, при решении данной системы получим аналогичные выражения для определения симметричных составляющих токов и падений напряжений, как и при однофазном КЗ:

$$\dot{I}_{M_1} = \frac{\dot{E}_1}{j(x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0})}; \quad (17.30)$$

$$\dot{I}_{M_1} = \dot{I}_{M_2} = \dot{I}_{M_0}; \quad (17.31)$$

$$\dot{I}_{AM} = \dot{I}_{M_1} + \dot{I}_{M_2} + \dot{I}_{M_0} = 3\dot{I}_{M_1}; \quad (17.32)$$

$$\Delta \dot{U}_{M_1} = j\dot{I}_{M_1}(x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}); \quad (17.33)$$

$$\Delta \dot{U}_{M_2} = -j\dot{I}_{M_1}x_{\Sigma 2}; \quad (17.34)$$

$$\Delta\dot{U}_{M_0} = -j\dot{I}_{M_1}x_{\Sigma 0}; \quad (17.35)$$

$$\begin{aligned} \Delta\dot{U}_{BM} &= \Delta\dot{U}_{BM_1} + \Delta\dot{U}_{BM_2} + \Delta\dot{U}_{BM_0} = \\ &= \Delta\dot{U}_{M_1} a^2 + a\Delta\dot{U}_{M_2} + \Delta\dot{U}_{M_0} = \\ &= j\dot{I}_{M_1} \left[a^2(x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}) - ax_{\Sigma 2} - x_{\Sigma 0} \right] = \\ &= j\dot{I}_{M_1} \left[(a^2 - a)x_{\Sigma 2} + (a^2 - 1)x_{\Sigma 0} \right]; \end{aligned} \quad (17.36)$$

$$\begin{aligned} \Delta\dot{U}_{CM} &= \Delta\dot{U}_{CM_1} + \Delta\dot{U}_{CM_2} + \Delta\dot{U}_{CM_0} = \\ &= a\Delta\dot{U}_{M_1} + a^2\Delta\dot{U}_{M_2} + \Delta\dot{U}_{M_0} = \\ &= j\dot{I}_{M_1} \left[a(x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}) - a^2x_{\Sigma 2} - x_{\Sigma 0} \right] = \\ &= j\dot{I}_{M_1} \left[(a - a^2)x_{\Sigma 2} + (a - 1)x_{\Sigma 0} \right]. \end{aligned} \quad (17.37)$$

18. Порядок расчета однократной продольной несимметрии

Характер выражений для симметричных составляющих, полученных при рассмотрении различных видов продольной несимметрии, позволяет сформулировать общий для всех видов продольной несимметрии порядок расчета.

1. Составляют схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей, в которых в месте разрыва включены падения напряжений симметричных составляющих $\Delta U_1, \Delta U_2, \Delta U_0$.

2. Определяют суммарные сопротивления схем прямой, обратной и нулевой последовательностей относительно точки разрыва.

3. Находят эквивалентную ЭДС $E_{\Sigma 1}$ схемы прямой последовательности.

4. Определяют ток прямой последовательности

$$i_1^{(n)} = \frac{E_{\Sigma 1}}{j(x_{\Sigma 1} + \Delta x^{(n)})}$$

5. По известной величине тока прямой последовательности $i_1^{(n)}$ определяют симметричные составляющие токов и падений напряжений в месте несимметрии.

6. Отдельно для схемы каждой последовательности вычисляют напряжение одного края разрыва. Для этого потенциал начала схем отдельных последовательностей принимают равным нулю и по известным токам определяют потенциалы точек с другого края разрыва.

7. Зная симметричные составляющие токов и падений напряжения по краям несимметрии, рассчитывают их полные значения.

19. Общий порядок расчета сложных видов повреждений

При однократной несимметрии (поперечной или продольной), для анализа составлялось 6 уравнений, с помощью которых устанавливалась связь между симметричными составляющими токов и напряжений рассматриваемого вида повреждения.

При двукратной несимметрии (сложный вид повреждения) определению подлежат 12 неизвестных (симметричные составляющие токов и напряжений в каждом из мест повреждений). Поэтому для анализа такого вида повреждения необходимо составить 12 уравнений, 6 из которых будут связывать симметричные составляющие токов и напряжений в каждом из мест

повреждений, а другие 6 получаются из граничных условий с учетом конкретных видов повреждения.

При n -кратной несимметрии необходимо составлять $6n$ уравнений, решая которые, определяют несимметричные составляющие токов и напряжений в каждом из мест повреждения. Для уточнения порядка расчета сложных видов повреждений представим себе схему, в которой в точках M и N одновременно имеются однофазные КЗ (рис. 19.1).

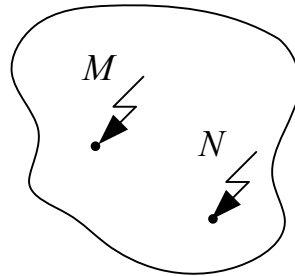
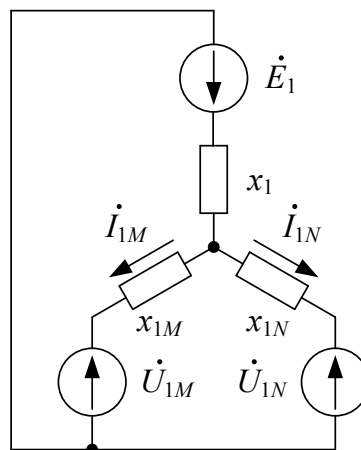


Рис. 19.1

Составляя схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей, после преобразования их можно привести к следующему виду (рис. 19.2).



a

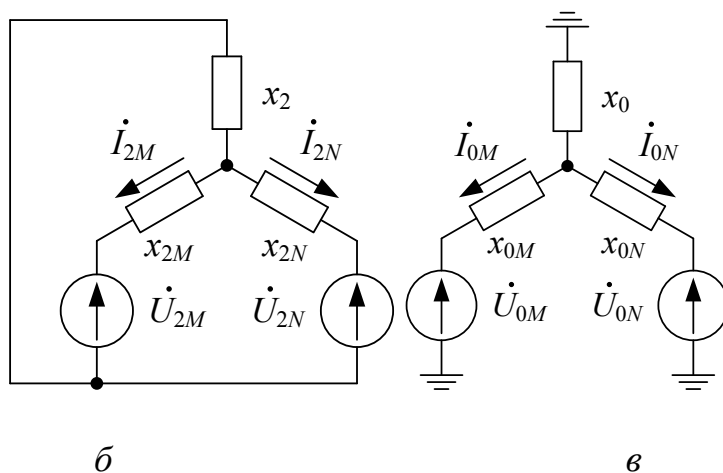


Рис. 19.2

Для каждой из схем можно записать по два уравнения, связывающие симметричные составляющие токов и напряжений.

$$M: \dot{E}_1 = \dot{U}_{1M} + \dot{I}_{1M} jx_{1M} + jx_1 (\dot{I}_{1M} + \dot{I}_{1N}),$$

$$N: \dot{E}_1 = \dot{U}_{1N} + \dot{I}_{1N} jx_{1N} + jx_1 (\dot{I}_{1M} + \dot{I}_{1N}),$$

$$M: 0 = \dot{U}_{2M} + \dot{I}_{2M} jx_{2M} + jx_2 (\dot{I}_{2M} + \dot{I}_{2N});$$

$$N: 0 = \dot{U}_{2N} + \dot{I}_{2N} jx_{2N} + jx_2 (\dot{I}_{2M} + \dot{I}_{2N});$$

$$M: 0 = \dot{U}_{0M} + \dot{I}_{0M} jx_{0M} + jx_0 (\dot{I}_{0M} + \dot{I}_{0N});$$

$$N: 0 = \dot{U}_{0N} + \dot{I}_{0N} jx_{0N} + jx_0 (\dot{I}_{0M} + \dot{I}_{0N}).$$

Недостающие 6 уравнений запишем из граничных условий, предположив что в точке M замкнута на землю фаза B , а в точке N – фаза C (рис. 19.3).

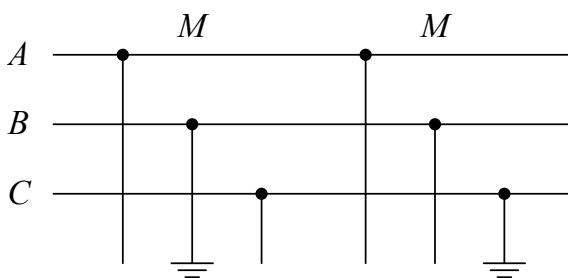


Рис. 19.3

$$M : \dot{I}_C = 0;$$

$$\dot{I}_A = 0;$$

$$\dot{U}_B = 0;$$

$$N : \dot{I}_A = 0;$$

$$\dot{I}_B = 0;$$

$$\dot{U}_C = 0.$$

При рассмотрении однофазного КЗ были получены следующие соотношения для поврежденной фазы:

$$M : \dot{I}_{1B} = \dot{I}_{2B} = \dot{I}_{0B}; \quad (19.1)$$

$$\dot{U}_{1B} + \dot{U}_{2B} + \dot{U}_{0B} = 0; \quad (19.2)$$

$$N : \dot{I}_{1C} = \dot{I}_{2C} = \dot{I}_{0C}; \quad (19.3)$$

$$\dot{U}_{1C} + \dot{U}_{2C} + \dot{U}_{0C} = 0. \quad (19.4)$$

С учетом конкретных видов КЗ в точках M и N перепишем основные уравнения:

$$M : \dot{E}_1 = \dot{U}_{1B} + \dot{I}_{1B} jx_{1M} + jx_1 (\dot{I}_{1B} + \dot{I}_{1C}); \quad (19.5)$$

$$N : \dot{E}_1 = \dot{U}_{1C} + \dot{I}_{1C} jx_{1N} + jx_1 (\dot{I}_{1B} + \dot{I}_{1C}); \quad (19.6)$$

$$M : 0 = \dot{U}_{2B} + \dot{I}_{2B} jx_{2M} + jx_2 (\dot{I}_{2B} + \dot{I}_{2C}); \quad (19.7)$$

$$N : 0 = \dot{U}_{2C} + \dot{I}_{2C} jx_{2N} + jx_2 (\dot{I}_{2B} + \dot{I}_{2C}); \quad (19.8)$$

$$M : 0 = \dot{U}_{0B} + \dot{I}_{0B} jx_{0M} + jx_0 (\dot{I}_{0B} + \dot{I}_{0C}); \quad (19.9)$$

$$N : 0 = \dot{U}_{0C} + \dot{I}_{0C} jx_{0N} + jx_0 (\dot{I}_{0B} + \dot{I}_{0C}). \quad (19.10)$$

Сложив уравнения (19.5), (19.7) и (19.9) для точки M с учетом (19.1) и (19.2), а для точки N уравнения (19.6), (19.8) и (19.10) с учетом (19.3) и (19.4), получим:

$$\begin{aligned} \dot{E}_1 = j\dot{I}_{1B}(x_{1M} + x_{2M} + x_{0M}) + \\ + j(x_1 + x_2 + x_0)(\dot{I}_{1B} + \dot{I}_{1C}); \end{aligned} \quad (19.11)$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_1 = j\dot{I}_{1C}(x_{1N} + x_{2N} + x_{0N}) + \\ + j(x_1 + x_2 + x_0)(\dot{I}_{1B} + \dot{I}_{1C}). \end{aligned} \quad (19.12)$$

Решая уравнения (19.11) и (19.12), определяют токи прямой последовательности поврежденных фаз, а затем все остальные неизвестные.

20. Простое замыкание на землю в сети с изолированной нейтралью

При замыкании на землю одной фазы в системе с изолированной нейтралью, путь для тока, идущего на землю, осуществляется через емкостную проводимость элементов каждой фазы относительно земли. Поступая в землю в месте замыкания, ток возвращается по неповрежденным фазам через их емкостные проводимости относительно земли.

Емкостная проводимость поврежденной фазы оказывается зашунтированной местом повреждения, и ток в этой фазе за местом замыкания отсутствует (рис. 20.1).

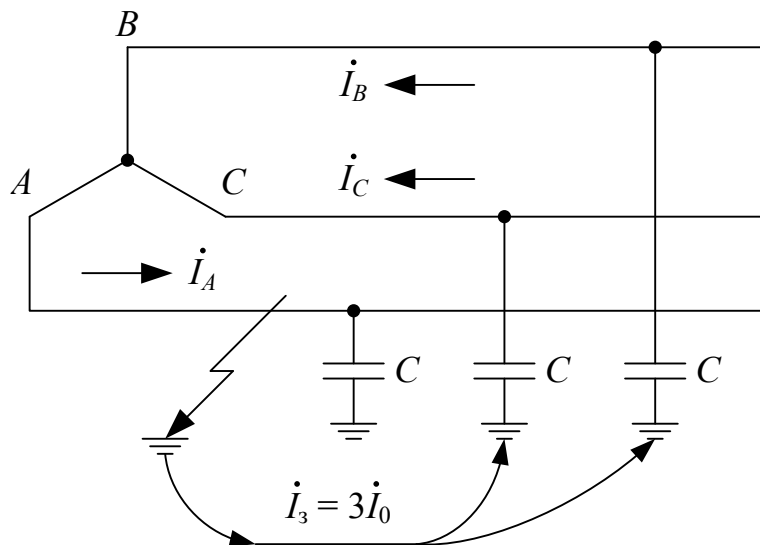


Рис. 20.1

Граничные условия для простого замыкания на землю те же, что и для однофазного короткого замыкания. Поэтому все выражения, полученные при рассмотрении однофазного КЗ, в равной мере относятся к случаю простого замыкания на землю.

Емкостные сопротивления элементов электрической системы значительно превышают их индуктивные и активные сопротивления, что позволяет при определении тока простого замыкания на землю пренебречь последними и, следовательно, считать, что величина этого тока не зависит от места повреждения в рассматриваемой электрически связанной сети.

Так как этот ток относительно мал, то можно считать, что напряжение источника сохраняется неизменным.

При этих допущениях ток в месте замыкания на землю через дугу с сопротивлением r_d будет:

$$I_3 = 3 \frac{\dot{U}_{\text{ф ср}}}{3r_d - jx_{C_{0\Sigma}}},$$

где $x_{C_{0\Sigma}}$ – результирующее емкостное сопротивление нулевой последовательности всех элементов, электрически связанных с точкой замыкания;

$\dot{U}_{\text{ф ср}}$ – среднее фазное напряжение той ступени, где рассматривается замыкание на землю.

Наибольшая величина тока замыкания на землю имеет место при металлическом замыкании, когда $r_d = 0$:

$$I_3 = 3j \frac{\dot{U}_{\text{ф ср}}}{x_{C_{0\Sigma}}},$$

то есть она в три раза превышает емкостный ток на землю одной фазы в нормальном режиме.

Для грубой оценки порядка величины тока замыкания на землю пользуются упрощенной формулой:

$$I_3 = \frac{\sqrt{3}U_{\text{ф ср}}}{N} l, \text{ А},$$

где l – суммарная длина воздушных или кабельных линий, электрически связанных с точкой замыкания на землю, км;

$U_{\text{ф ср}}$ – среднее фазное номинальное напряжение ступени, где рассматривается замыкание на землю, кВ;

N – коэффициент ($N=350$ – для воздушных линий, $N=10$ – для кабельных).

Для ограничения величины тока простого замыкания на землю нейтраль трансформатора целесообразно заземлять через индуктивную катушку. Регулируя индуктивность такой катушки, можно добиться резонанса между индуктивностью и емкостью, что приведет к $x_{0\Sigma} = \infty$, то есть к полной компенсации тока простого замыкания на землю.

Такое условие будет выполняться при

$$x_L = \frac{x_{C_{0\Sigma}}}{3}.$$

Такие катушки называются дугогасящими. Они выполняются с регулированием индуктивности и их настраивают таким образом, чтобы снизить ток замыкания на землю до величины, при которой дуги в месте замыкания не возникает.

Опытом установлено, что это условие выполняется, если ток замыкания на землю не превышает:

при 6 кВ – 30 А; 10 кВ – 20 А;

при 15–20 кВ – 15 А; 35 кВ – 10 А.

Из рассмотрения однофазного КЗ, запишем:

$$\dot{U}_1 = -(\dot{U}_2 + \dot{U}_0);$$

$$\dot{U}_2 = -\dot{I}_1 j x_{\Sigma 2};$$

$$\dot{U}_0 = -\dot{I}_1 j x_{C_{0\Sigma}};$$

$$\dot{I}_1 = j \frac{\dot{U}_{\text{ф ср}}}{x_{C_{0\Sigma}}}.$$

Отсюда можно записать

$$\dot{U}_0 = -\dot{U}_{\text{ф ср}},$$

$\dot{U}_2 = 0$, так как $x_{\Sigma 2} = 0$ при принятых допущениях, а

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_{\text{ф ср}}.$$

На основании полученных соотношений изобразим векторную диаграмму напряжений в месте замыкания (рис. 20.2).

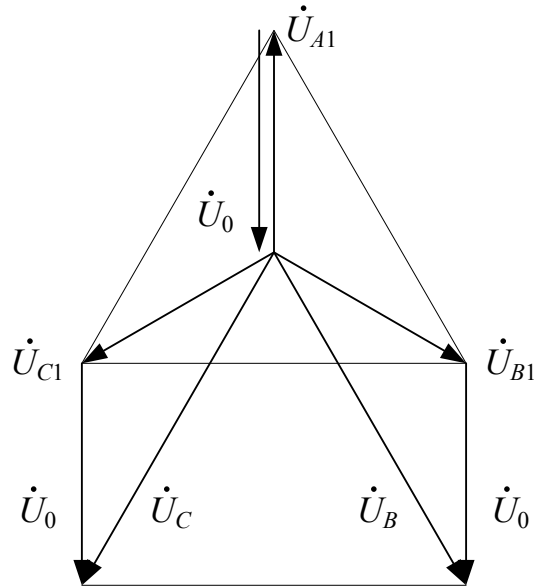


Рис. 20.2

Из векторной диаграммы видно, что при металлическом замыкании на землю напряжения в неповрежденных фазах (\dot{U}_B и \dot{U}_C) возрастают до линейных значений. Треугольник линейных напряжений остается без изменений и лишь перемещается параллельно самому себе. Его положение определяется напряжением нулевой последовательности.

21. Расчет токов короткого замыкания в установках напряжением до 1000 В

Электрические установки напряжением до 1000 В характеризуются, как правило, большой электрической удаленностью относительно источников питания.

Это позволяет считать, что при КЗ в такой сети напряжение за трансформатором, питающим эту сеть, остается неизменным и равным своему номинальному значению (рис. 21.1).

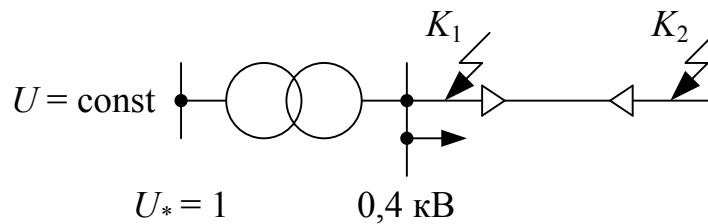


Рис. 21.1

Достоверность расчета токов короткого замыкания в установках до 1000 В главным образом зависит от того, насколько правильно и полно учтены все сопротивления короткозамкнутой цепи.

Наряду с индуктивными сопротивлениями элементов здесь существенную роль играют активные сопротивления, причем они могут преобладать.

На результат расчета заметно влияют сопротивления сборных шин, трансформаторов тока, сопротивления контактных соединений, рубильников, катушек автоматических выключателей, которыми при расчете токов короткого замыкания в установках высокого напряжения всегда пренебрегают.

Точная оценка сопротивлений контактных соединений представляет собой очень трудную и в известной мере неопределенную задачу, так как эти сопротивления зависят от многих факторов (состояния контактных поверхностей, степени затяжки болтов, силы сжатия пружин и прочего). Отказ от учета этих сопротивлений может привести к излишнему преувеличению тока КЗ, что приведет к установке более мощной коммутационной аппаратуры и проводников большего сечения.

При отсутствии достоверных данных о сопротивлении контактных соединений рекомендуется принимать их в пределах 0,015–0,03 Ом. Нижний предел соответствует КЗ у распределительного щита подстанции (K_1), а верхний – при КЗ непосредственно у электроприемников (K_2) (рис. 21.1).

Когда требуется особо повышенная надежность установки до 1000 В, расчет тока КЗ для нее делают без учета сопротивлений контактных соединений, вводя в схему замещения индуктивные и активные сопротивления всех основных элементов цепи.

Поскольку сопротивления большинства элементов рассматриваемых установок задаются в именованных единицах, то весь расчет обычно ведут так же в именованных единицах, при этом ввиду малости самих сопротивлений их выражают в миллиомах (мОм).

В качестве средних номинальных напряжений U_{cp} для соответствующих ступеней трансформации рекомендуется принимать:

$$690, 525, 400, 230, 127 \text{ В.}$$

По найденным результирующим сопротивлениям прямой и нулевой последовательности относительно точки короткого замыкания $r_{\Sigma 1}, r_{\Sigma 0}, x_{\Sigma 1}, x_{\Sigma 0}$ легко определить начальное значение периодической слагающей тока трехфазного короткого замыкания

$$I_k^{(3)} = \frac{U_{cp}}{\sqrt{3} \sqrt{r_{\Sigma 1}^2 + x_{\Sigma 1}^2}} = \frac{U_{cp}, \text{ В}}{\sqrt{3} Z_{\Sigma 1}, \text{ мОм}}, \text{ кА,}$$

а так же однофазного КЗ:

$$I_{\kappa}^{(1)} = \frac{3U_{\text{cp}}}{\sqrt{3}\sqrt{(2r_{\Sigma 1} + r_{\Sigma 0})^2 + (2x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 0})^2}} = \frac{\sqrt{3}U_{\text{cp}}, \text{ В}}{Z^{(1)}, \text{ МОм}}, \text{ кА.}$$

С ростом удаленности короткого замыкания отношение $\frac{x}{r}$, как правило, падает, что приводит к снижению ударного коэффициента.

$k_y = f\left(\frac{x}{r}\right)$ изменяется от 1,05 до 1,5.

22. Расчет переходных процессов с учетом качаний синхронных машин

В соответствии с принятыми допущениями до сих пор предполагалось, что возникший в системе электромагнитный переходный процесс не сопровождается качаниями синхронных машин этой системы.

В действительности же при любом внезапном изменении стационарного режима в той или иной мере проявляются качания всех или части участвующих машин.

Точный анализ поведения синхронного генератора в этих условиях связан с необходимостью одновременного рассмотрения электромагнитных и электромеханических явлений и является задачей исследования динамической устойчивости.

Рассмотрим только качественную сторону влияния качаний синхронных генераторов на величину токов и напряжений в системе при внезапном КЗ.

Будем считать, что известен закон изменения углового сдвига между ЭДС источников питания во времени. Для упрощения теоретических выкладок рассмотрим схему, в которой один генератор (или станция, заменяется эквивалентным генератором) связан с системой бесконечной мощности по сети, обладающей чисто индуктивными сопротивлениями (рис. 22.1).

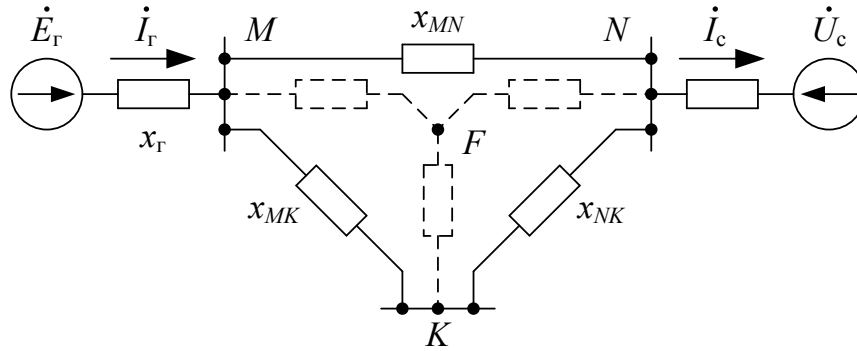


Рис. 22.1

Вся мощность от генератора передается в систему, то есть в промежуточных узлах M , K , N отсутствуют потребители.

Рассмотрим, как изменяется ток генератора и напряжения в указанных узлах M , K , N с увеличением угла δ между ЭДС \dot{E}_g и напряжением \dot{U}_c (рис. 22.2).

С увеличением угла δ разность $\dot{E}_g - \dot{U}_c$ возрастает и пропорционально ей возрастает ток генератора.

Соответственно увеличиваются падения напряжения на участках сети, что приводит к снижению напряжений во всех точках.

Напряжение узла K очевидно будет таким же, как и узла F .

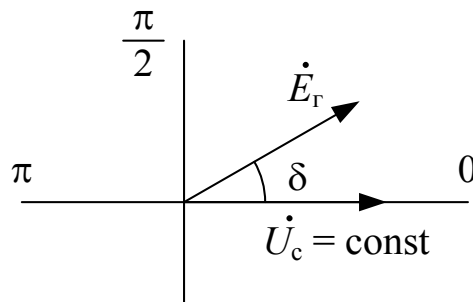


Рис. 22.2

Наибольший ток и соответственно наименьшее напряжение в узлах будет иметь место при $\delta = \pi$, то есть когда \dot{E}_g и \dot{U}_c находятся в противофазе. Построим эпюры тока и напряжений в узлах в зависимости от угла δ , причем за единицу тока и напряжений каждого узла принимаем их значения при $\delta = 0$ (рис. 22.3).

Из характера кривых следует, что изменение угла δ сказывается весьма существенно на изменении тока и напряжения в узлах. Особенно резко оно отражается на изменении напряжения узла K , где последнее падает до нуля. Однако нужно заметить, что это стало следствием заданных исходных условий. Достаточно изменить соотношения между реактивностями схемы

или между величинами \dot{E}_r и \dot{U}_c , чтобы напряжение в этом узле не снижалось до нуля.

Точку энергосистемы, где напряжение имеет наименьшую величину при рассматриваемом исходном режиме, называют электрическим центром.

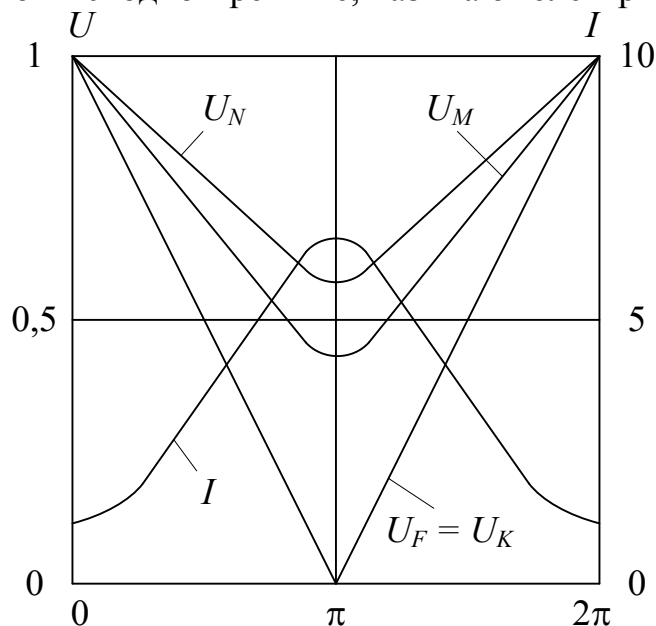


Рис. 22.3

Его положение в системе меняется по мере изменения ее режима.

Теперь представим себе, что именно в точке K схемы произошло трехфазное КЗ. В этом случае характер изменения тока в месте короткого замыкания в функции угла δ аналогичен характеру кривой изменения напряжения U_K , то есть каждый раз, как только \dot{E}_r и \dot{U}_c будут в противофазе, ток в месте короткого замыкания будет снижаться до нуля. В цепях генератора и системы с увеличением угла δ ток будет возрастать, достигая своей наибольшей величины при $\delta = \pi$.

Изложенное дополнительно проиллюстрируем векторной диаграммой (рис. 22.4). Ток в месте короткого замыкания определяется суммой взаимных токов от системы i_c и генератора i_r , сдвинутых относительно друг друга на угол δ .

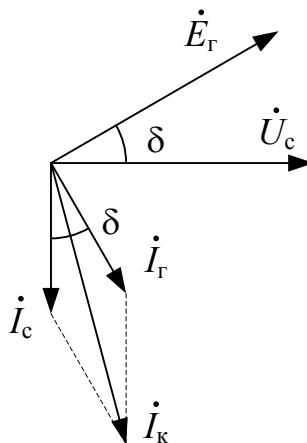


Рис. 22.4

Модуль тока в месте КЗ можно определить:

$$I_K = \sqrt{I_r^2 + I_c^2 + 2I_r I_c \cos \delta}.$$

Максимальное значение тока КЗ имеет место, когда $I_r = I_c = I$.

В этом случае

$$I_K = I\sqrt{2(1 + \cos \delta)}.$$

Наибольшее снижение тока КЗ I_K при заданном угле δ характеризует следующее отношение:

$$\frac{I_K}{I_K(\delta=0)} = \frac{I_K}{2I} = \frac{I\sqrt{2(1 + \cos \delta)}}{2I} = \sqrt{\frac{1 + \cos \delta}{2}}.$$

При угле $\delta \leq 37^\circ$ это отношение не выходит за пределы 0,95.

Другими словами, если сдвиг между векторами ЭДС источников не превышает примерно 40° , пренебрежение качанием генераторов приводит к превышению тока в месте короткого замыкания не более чем на 5 %, что находится в рамках точности практических расчетов.

23. Качество электромагнитных переходных процессов

Анализ электромагнитных процессов с оценкой их качества необходим для проектирования и правильной эксплуатации электроэнергетических систем.

Качество переходных процессов с точки зрения согласования с требованиями, предъявляемыми к энергетическим системам и их элементам, характеризуют качественными и количественными показателями.

Показателям качества переходных процессов дают оценку по следующим свойствам, характеристикам:

1. По длительности переходного процесса. Это время, в течение которого энергетическая система переходит из одного устойчивого состояния работы в другое установившееся состояние.

Время существования аварийного режима стремятся сократить:

$$\tau = t_{p.з} + t_{с\text{отк}},$$

где $t_{p.з}$ – время действия релейной защиты;

$t_{с\text{отк}}$ – время отключения выключателя.

2. По характеру переходного процесса, который оценивают по изменению тока во времени.

Характер электромагнитного переходного процесса зависит от мощности источников, параметров сети, наличия АРВ и АПВ, он может быть апериодическим, колебательным с неизменной или апериодической амплитудой, монотонным.

Качественную оценку характера переходного процесса оценивают по амплитуде, а количественными оценками характера переходного процесса являются:

– коэффициент затухания периодической составляющей тока КЗ

$$\gamma_{пт} = \frac{I_{пт}}{I''};$$

– коэффициент затухания апериодической составляющей тока КЗ

$$\gamma_{ат} = \frac{i_{ат}}{i_{ат=0}}.$$

3. По опасности последствий для оборудования, которая оценивается электродинамической стойкостью элементов (проверяется по $i_y^{(3)}$), и термической стойкостью (оценивается по тепловому импульсу):

$$B_k = \int_0^t i_k^2(t) dt.$$

где $i_k(t)$ – полный ток КЗ в произвольный момент времени t , А.

4. По существенности влияния параметров аварийного переходного процесса на нормальные режимы работы энергосистемы и ее элементов, которое отражается в показателях качества электроэнергии:

– коэффициент несинусоидальности

$$K_{нс} = \frac{S_{па}}{S_{кз}} \leq 0,05,$$

где $S_{па}$ – мощность преобразовательных агрегатов;

$S_{кз}$ – мощность короткого замыкания;

– коэффициент несимметрии

$$P_n = \frac{S_{но}}{S_{кз}} \leq 0,02,$$

где $S_{но}$ – мощность однофазной нагрузки;

– колебания напряжения

$$\delta U = \frac{\Delta P \frac{R_{рез}}{x_{рез}} + \Delta Q}{S_{кз}},$$

которые пропорциональны набросу мощности реактивной нагрузки ΔQ и обратно пропорциональны $S_{кз}$;

– колебания частоты

$$\Delta f = \frac{\frac{\Delta P}{2\pi S_{кз}}}{\Delta t},$$

которые пропорциональны скорости наброса активной мощности.

5. По стоимости дополнительных мероприятий для улучшения требуемых характеристик переходного процесса.

Значения токов КЗ могут иметь такие значения, что без их ограничения обойтись нельзя. Это потребует дополнительных капитальных вложений. Как видно, показатели качества переходных процессов по-разному характеризуют условия функционирования систем электроснабжения и электроприемников.

С точки зрения снижения стоимости элементов систем электроснабжения и облегчения условий их работы желательно уменьшить

уровни токов КЗ и мощности $S_{КЗ}$, а с точки зрения качества электроэнергии у электроприемников необходим их высокий уровень.

24. Способы и технические средства ограничения токов короткого замыкания

Реализация различных способов ограничения токов КЗ предусматривает применение специальных технических средств, а так же принятие при проектировании и эксплуатации решений о структуре схем соединения элементов электроустановки.

Специальные технические средства, благодаря своему конструктивному исполнению, ограничивают значение или продолжительность воздействия тока КЗ.

К таким устройствам относятся:

- аппараты и устройства, реализующие автоматическое деление сети;
- силовые трансформаторы и автотрансформаторы с особым исполнением конструкции и соединения обмоток;
- токоограничивающие элементы и устройства;
- токоограничивающие коммутационные аппараты;
- устройства изменения режима работы нейтрали силовых трансформаторов.

Автоматическое деление сети реализуется с применением устройств противоаварийной автоматики и коммутационных аппаратов, устанавливаемых на мощных присоединениях (рис. 24.1).

При КЗ в точке K отключаются в первую очередь B_3 и B_2 , а затем B_1 .

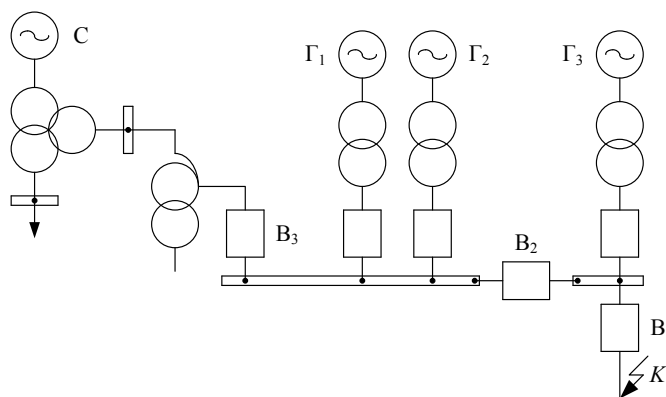


Рис. 24.1

Силовые трансформаторы могут выполняться с расщепленными обмотками низшего напряжения. Ограничение тока КЗ достигается большим значением u_k между частями расщепленной обмотки. Токи несимметричных КЗ зависят от схем соединения обмоток трансформаторов и автотрансформаторов.

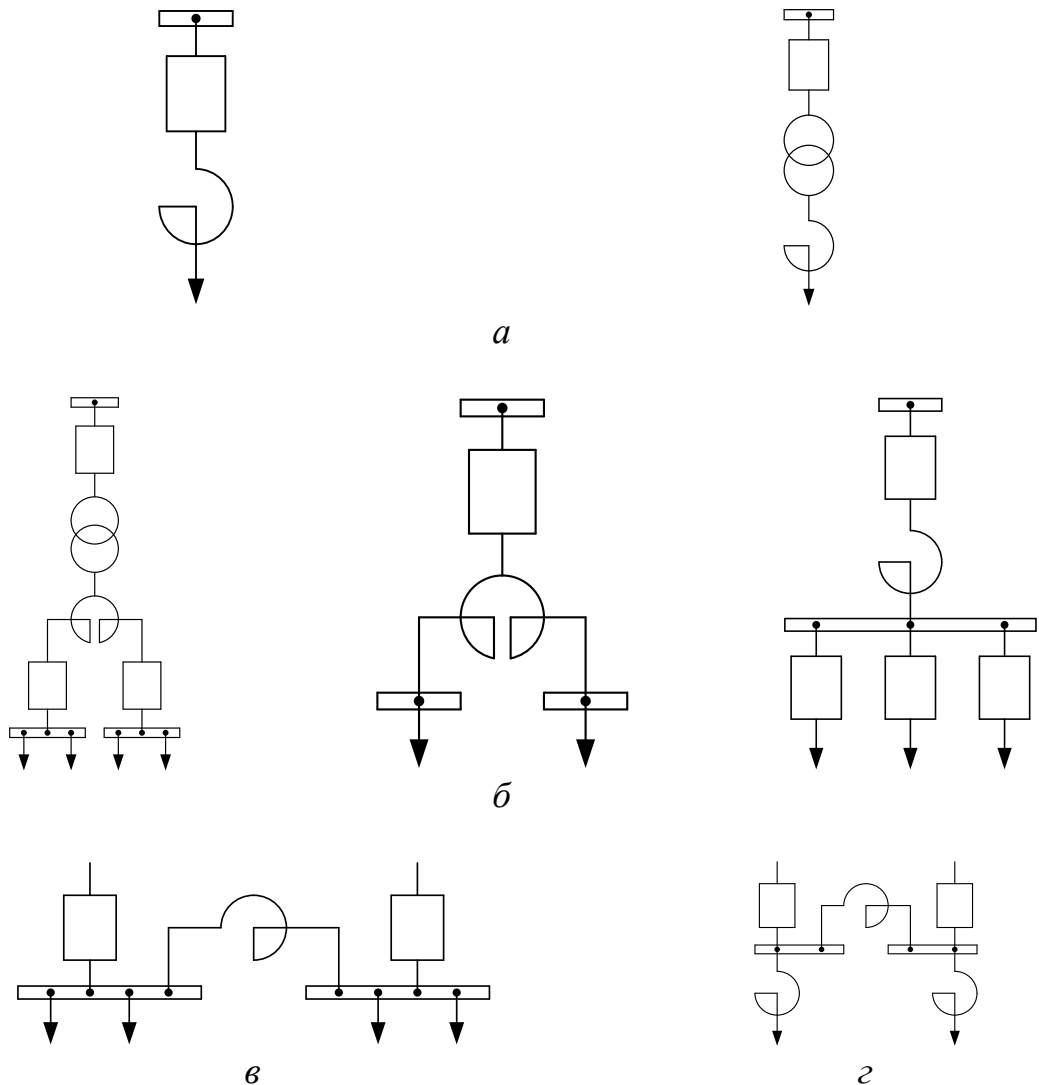


Рис. 24.2

Токоограничивающие реакторы представляют собой реактивные сопротивления и предназначены для снижения тока КЗ за реактором и сохранения требуемого уровня остаточного напряжения в узловых точках сети перед реактором.

В зависимости от места включения реакторов различают реактированные присоединения (рис. 24.2, *а*), вводов (рис. 24.2, *б*), секций (рис. 24.2, *в*) – и их сочетания (рис. 24.2, *г*).

Токоограничивающие коммутационные аппараты совмещают функции ограничения наибольших значений токов КЗ и защиты от воздействия сверхтоков на электроустановки путем их отключения.

К ним относятся быстродействующие токоограничивающие предохранители, ограничители ударного тока.

Изменяя режим работы нейтрали силовых трансформаторов, можно существенно изменить значения токов КЗ при несимметричных КЗ (рис. 24.3).

Для ограничения токов КЗ на землю разземляют нейтраль части силовых трансформаторов (рис. 24.3, *а*), включают в цепь нейтрали элементов сети реакторы с линейной характеристикой (рис. 24.3, *б*), насыщающиеся реакторы (рис. 24.3, *в*), дугогасящие реакторы и резисторы (рис. 24.3, *г*), нелинейные сопротивления (рис. 24.3, *д*).

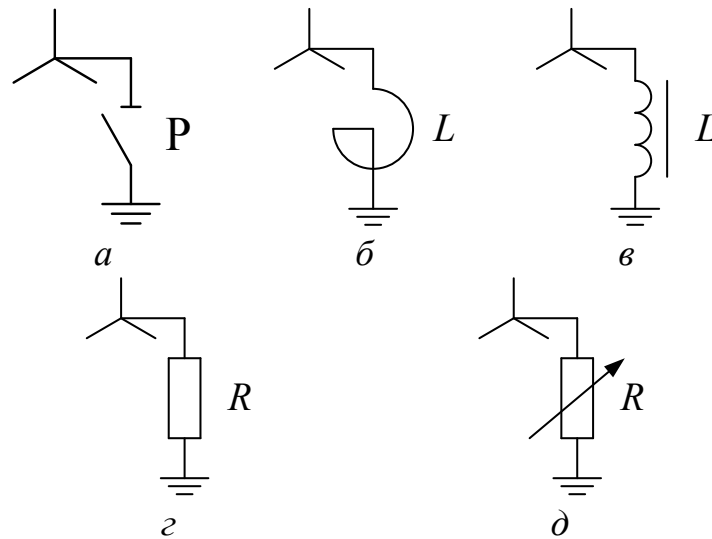


Рис. 24.3

Библиографический список

1. Ульянов, С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах : учебник / С. А. Ульянов. – Москва: Энергия, 1970. – 520 с.
2. Ульянов, С. А. Сборник задач по электромагнитным переходным процессам в электроэнергетических системах : учебное пособие для вузов / С. А. Ульянов. – Москва: Энергия, 1968. – 496 с.
3. Переходные процессы в системах электроснабжения : учебник для вузов / Г. Г. Пивняк [и др.]. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергоатомиздат, Днепропетровск : Национальный горный университет, 2003. – 548 с.
4. Силюк С. М. Электромагнитные переходные процессы : учебное пособие для вузов / С. М. Силюк, Л. Н. Свита. – Минск: Технопринт, 2000. – 262 с.
5. Силюк С. М. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах : методическое пособие к курсовой работе по дисциплине «Переходные процессы в электроэнергетических системах» для специальностей 1-43 01 01 «Электрические станции», 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети», 1-43 01 03 «Электроснабжение», 1-53 01 04 «Автоматизация и управление энергетическими процессами» дневной и заочной форм обучения / С. М. Силюк, Л. Н. Свита. – Минск: БНТУ, 2004. – 103 с.
6. Сборник задач по дисциплинам «Электромагнитные переходные процессы» и «Переходные процессы в электроэнергетических системах» для студентов специальностей 1-43 01 01 «Электрические станции», 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети», 1-43 01 03 «Электроснабжение» и 1-53 01 04 «Автоматизация и управление энергетическими процессами» специализации 1-53 01 04 03 «Автоматизация и релейная защита электроустановок» / сост.: С. М. Силюк, В. А. Булат, Е. В. Булойчик. – Минск: БНТУ, 2010. – 71 с.
7. Евминов, Л. И. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах : учебное пособие / Л. И. Евминов, Г. И. Селиверстов ; М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2010. – 418 с.
8. Крючков, И. П. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах : учебное пособие для вузов / И. П. Крючков. – Москва: Изд-во МЭИ, 2000. – 168 с.
9. Методы расчета токов короткого замыкания. Сборник задач: учебное пособие по курсу «Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах» / под ред. И. П. Крюčkова. – Москва: Изд-во МЭИ, 2000. – 59 с.
10. Переходные процессы в электроэнергетических системах : учебное пособие для вузов / И. П. Крючков [и др.]; под ред.

И. П. Крючкова. – 2-е изд., стер. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2009. – 414 с.

11. Короткие замыкания и несимметричные режимы электроустановок : учебное пособие для вузов по специальностям «Электрические станции», «Электроснабжение» направления «Электроэнергетика» / И. П. Крючков [и др.]. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2008 . – 472 с.

12. Щедрин, В. А. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах : учебное пособие / В. А. Щедрин. – Чебоксары : Изд-во Чуваш. Ун-та, 2007. – 422 с.

13. Методические указания по расчету токов короткого замыкания в сети напряжением до 1 кВ электрических станций и подстанций с учетом влияния электрической дуги: СТП 09110.20.145–07. – Введ. 02.04.2007. – Минск: ГПО «Белэнерго», 2007. – 60 с.

14. Жуков, В. В. Короткие замыкания в электроустановках напряжением до 1 кВ / В. В. Жуков. – Москва: Изд-во МЭИ, 2004. – 192 с.

15. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ: ГОСТ 27514–87. – Введ. 01.01.1989. – Москва: Издательство стандартов, 1989. – 40 с.

16. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ: ГОСТ Р 52735–2007. – Введ. 01.07.2008. – Москва: Стандартинформ, 2007. – 35 с.

17. Короткие замыкания и выбор электрооборудования : учебное пособие для вузов / И. П. Крючков [и др.]; под ред. И. П. Крючкова, В. А. Старшинова. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2012. – 568 с.

II – Практический раздел

2.1 «Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах». Лабораторный практикум в двух частях. Часть 1.

Введение

Настоящий лабораторный практикум по дисциплинам «Электромагнитные переходные процессы» и «Переходные процессы в электроэнергетических системах» подготовлен в соответствии рабочими программами дисциплин для электротехнических специальностей вузов применительно к лаборатории переходных процессов кафедры «Электрические станции» БНТУ. В него включены лабораторные работы по следующим разделам курса: «Электромагнитные переходные процессы при сохранении симметрии трехфазной цепи», «Электромагнитные переходные процессы при нарушении симметрии трехфазной системы» и «Электромагнитные переходные процессы при особых условиях».

Большинство лабораторных работ включенных в данный практикум поставлены с использованием персональной ЭВМ. Отдельные работы поставлены на стендах, оборудованных соответствующим набором регулируемых элементов цепей и измерительных средств.

Выполнение каждой лабораторной работы предполагается фронтальным методом (вся подгруппа выполняет одну и ту же работу одновременно) непосредственно после изучения соответствующей темы или раздела курса на лекции. Наличие на стенде регулируемых элементов позволяет задавать каждой бригаде студентов свой индивидуальный вариант исходных данных к работе.

Программа лабораторных работ построена по принципу «расчет-эксперимент», т. е. данные предварительных теоретических расчетов трехфазных электрических цепей должны проверяться соответствующими измерениями на стендах и расчетами и исследованиями на ЭВМ. Такая методика выполнения работ развивает у студентов творческое мышление и способствует более глубокому усвоению материала.

Объем каждой лабораторной работы рассчитан в среднем на 4 часа, из которых 2 час отводится на самостоятельную подготовку к работе и выполнение ее расчетной части и 2 часа – на выполнение экспериментальных исследований непосредственно в лаборатории.

Авторы выражают благодарность коллективу кафедры «Электрические станции» и рецензентам за ряд ценных замечаний, сделанных при подготовке настоящего практикума.

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ И ПРАВИЛА РАБОТЫ В ЛАБОРАТОРИЯХ КАФЕДРЫ «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ»

1. К работе в лаборатории студенты допускаются только после инструктажа по технике безопасности.

2. Каждая лабораторная работа имеет свой стенд, установленный на лабораторном столе. Для питания стендов используются напряжения ~ 220 В и $=110$ В. Напряжения на стенды подаются от щитков, установленных на стенах лаборатории, с помощью разъемов. На каждом стенде имеется контактор, управляемый тумблером. Контактторы обеспечивают оперативную подачу и съем напряжения со схемы стенда. Напряжения, используемые в лаборатории, являются опасными для жизни, поэтому при выполнении лабораторных работ необходимо быть предельно собранными, внимательными и осторожными.

3. Перед сборкой электрической цепи необходимо убедиться, что ее элементы не находятся под напряжением. На столах и стендах не должно быть посторонних предметов (портфелей, книг, чертежей и т. п.).

4. При сборке электрической цепи рекомендуется избегать излишнего перекрещивания проводов и соединения нескольких проводов одним зажимом. В первую очередь следует собирать токовые цепи, затем цепи напряжения.

5. Перед включением источника питания на регулируемых элементах должны быть установлены заданные параметры, а регулятор ЛАТРа должен находиться в нулевом положении.

6. Включение цепи под напряжение производится только после проверки ее преподавателем или лаборантом.

7. Любые изменения в структуре цепи производятся только при отключенном источнике питания. Измененная цепь должна быть проверена преподавателем или лаборантом.

8. Запрещается выполнение лабораторных работ при отсутствии преподавателя или лаборанта.

9. При выполнении работы нельзя прикасаться к открытым токоведущим элементам цепи, а также к трубам и радиаторам отопительной системы.

10. При обнаружении неисправностей, могущих вызвать поражение электрическим током или порчу оборудования, следует немедленно отключить источник питания и поставить об этом в известность преподавателя или лаборанта.

11. При несчастном случае следует немедленно отключить источник питания и поставить в известность преподавателя.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Выполнение лабораторной работы осуществляется в три этапа.

Первый этап – подготовка к работе – выполняется во время, предусмотренное для самостоятельной работы. На этом этапе студент обязан:

- изучить инструкцию к работе, уяснить цель и программу работы;
- изучить теоретический материал к работе по рекомендуемой литературе и конспекту лекций и быть готовым ответить на контрольные вопросы;
- выполнить расчетную часть задания: произвести расчет цепи и определить требуемые в задании величины;
- оформить расчетную часть отчета по работе: заполнить титульный лист, зарисовать требуемые схемы цепей и таблицы, внести расчетные данные в соответствующие графы таблиц, построить по результатам расчета требуемые заданием диаграммы.

Без оформленного отчета студент не допускается к выполнению экспериментальной части работы.

Второй этап работы – экспериментальная часть – выполняется непосредственно в лаборатории в течение первого часа занятий.

Получив разрешение (допуск) преподавателя, рабочая бригада (2–4 студента) собирает исследуемую электрическую схему и проводит необходимые измерения.

Результаты измерений обрабатываются и вносятся непосредственно в таблицы отчета для сравнения их с соответствующими данными расчета.

При выполнении экспериментальной части работы следует соблюдать правила техники безопасности и правила работы в лаборатории.

По окончании экспериментальных исследований рабочая бригада приступает к третьему этапу работы – анализу результатов, который выполняется на втором часу занятий непосредственно в лаборатории. Студенты обязаны провести анализ результатов работы, сопоставить результаты измерений с расчетными данными, в письменной форме сделать выводы по работе.

Полностью оформленный отчет в конце занятия представляется преподавателю для утверждения. При защите отчета студенту могут быть заданы контрольные вопросы.

Без защиты отчета по выполненной работе студент не допускается к выполнению очередной лабораторной работы.

Отчет по лабораторной работе должен содержать: титульный лист; цель работы; схемы исследуемых цепей; таблицу исходных данных к работе с указанием в ней номера варианта задания; таблицы результатов расчетов и измерений, предусмотренные заданием диаграммы; выводы по работе. Содержание отчета приводится в инструкции к работе.

Отчет представляется написанным от руки разборчивым почерком на бумаге формата А4 или в тетради.

В отчете должны применяться электротехнические термины, установленные ГОСТ 604-343-85 «Короткие замыкания в электроустановках. Основные понятия. Термины и определения», а также общепринятые в научно-технической литературе.

При оформлении отчета подлежат обязательному применению единиц Международной системы СИ, а также десятичные кратные и дольные от них (ГОСТ 6.417-81).

Точность обработки результатов измерений должна согласовываться с точностью самих измерений. Рекомендуется придерживаться следующего правила: ошибка вычислений должна быть на порядок меньше погрешности измерения. Результаты расчета должны содержать не менее трех значащих десятичных цифр мантиссы числа.

Графический материал отчета (таблицы, схемы, диаграммы) выполняются карандашом или пастой в виде эскизов, а также могут быть распечатаны на принтере.

Элементы на схемах изображают условными графическими обозначениями, установленными в стандартах ЕСКД. Каждый элемент схемы должен иметь графическое и буквенно-цифровое позиционное обозначение по ГОСТ 2.710-86.

Лабораторная работа № 1

Исследование распределения токов короткого замыкания и остаточных напряжений при коротких замыканиях

Цель работы

Определение токов короткого замыкания (КЗ) и остаточных напряжений для установившегося режима трехфазного КЗ в различных точках схемы.

Краткие теоретические сведения

Большинство повреждений в электрических системах приводит к КЗ фаз между собой и на землю.

Коротким замыканием называют всякое не предусмотренное нормальными условиями работы замыкание между фазами, а в сетях с глухо- и эффективно-заземленными нейтральными также замыкание одной или двух фаз на землю.

КЗ возникают при нарушении изоляции электрических цепей. Причины таких нарушений различны: старение и вследствие этого пробой изоляции, набросы на провода линий электропередачи, обрывы проводов с падением на землю, механические повреждения изоляции кабельных линий при земляных работах, удары молнии в линии электропередачи, ошибки персонала при операциях (отключение разъединителей под нагрузкой, включение их на ошибочно оставленное заземление и т. д.).

В трехфазных электроустановках возникают трехфазные и двухфазные КЗ. Кроме того в трехфазных сетях с глухо- и эффективно-заземленными нейтральными дополнительно могут возникать также однофазные и двухфазные КЗ на землю (замыкание двух фаз между собой с одновременным соединением их с землей). При трехфазном КЗ все фазы электрической сети оказываются в одинаковых условиях, поэтому его называют симметричным.

КЗ являются наиболее опасным и тяжелым видом повреждения. При КЗ электродвижущая сила (ЭДС) источника питания (генератора) замыкается «накоротко» через относительно малое сопротивление генераторов, трансформаторов и линий. Поэтому в контуре замкнутой накоротко ЭДС возникает большой ток I_{ϵ} , называемый *током короткого замыкания*.

При КЗ, вследствие увеличения тока, возрастает падение напряжения в элементах системы, что приводит к понижению напряжения во всех точках сети. Наибольшее снижение напряжения происходит в месте КЗ и в непосредственной близости от него. В точках сети, удаленных от места повреждения, напряжение снижается в меньшей степени.

Происходящие в результате КЗ увеличение тока и снижение напряжения приводят к ряду опасных последствий.

1. Ток КЗ I_k выделяет в активном сопротивлении R цепи, по которой он протекает в течение времени t , тепло $Q = kI_k^2 R t$. Это тепло и пламя электрической дуги в месте повреждения производят большие разрушения, размеры которых тем больше, чем больше ток I_k и время t . Проходя по неповрежденному оборудованию и линиям электропередачи, ток КЗ I_k нагревает их выше допустимого предела, что может вызвать повреждения изоляции и токоведущих частей.

2. Понижение напряжения при КЗ нарушает работу потребителей.

Основными потребителями электроэнергии являются асинхронные электродвигатели. Момент вращения двигателей M_d пропорционален квадрату напряжения U на зажимах $M_d = kU^2$. Поэтому при глубоком снижении напряжения момент вращения электродвигателя может оказаться меньше момента сопротивления механизмов, что приводит к их остановке.

Нормальная работа осветительных установок, составляющих вторую значительную часть потребителей электроэнергии, при снижении напряжения также нарушается.

3 Наиболее тяжелым последствием снижения напряжения является нарушение устойчивости параллельной работы генераторов. Это может привести к системной аварии, т. е. прекращению питания всех ее потребителей.

Для уменьшения последствий КЗ необходимо как можно быстрее отключить поврежденный участок, что достигается применением быстродействующих выключателей и релейной защиты с минимальной выдержкой времени. Немаловажную роль играет автоматическое регулирование возбуждения (АРВ) генераторов, позволяющие поддерживать напряжение в аварийном режиме на необходимом уровне. К мерам, уменьшающим опасность развития аварий, относится также правильный выбор аппаратов по условиям КЗ, применение токоограничивающих устройств и т. п.

Для осуществления указанных мероприятий необходимо уметь определить ток и остаточное напряжение на шинах при КЗ в различных точках схемы.

Ток КЗ определяется по закону Ома:

$$I_k^{(3)} = \frac{E_\Sigma}{x_\Sigma},$$

где E_Σ и x_Σ – соответственно результирующая ЭДС и сопротивление схемы относительно точки КЗ.

Величину остаточного напряжения в какой-либо точке схемы можно определить как падение напряжения от протекания установившегося тока КЗ по сопротивлению участка цепи ($x_{\text{вн}}$) от точки КЗ до рассматриваемой точки:

$$U_{\text{ост}} = I_{\text{к}}^{(3)} x_{\text{вн}}.$$

В установившемся режиме КЗ нагрузка шунтирует поврежденную ветвь (рис. 1.1) и тем самым уменьшает внешнее сопротивление цепи статора генератора. Это приводит к увеличению тока генератора, уменьшению его напряжения и соответственно уменьшению тока в месте КЗ. С увеличением удаленности КЗ влияние нагрузки сказывается сильнее. В то же время нагрузка, присоединенная непосредственно к точке КЗ, в установившемся режиме не играет никакой роли.

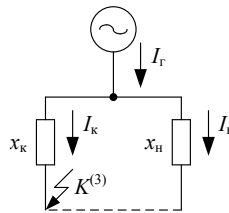


Рис. 1.1

Точный учет нагрузки сложен. Поэтому для упрощения практических расчетов ее учитывают относительным сопротивлением, равным $x_{*н} = 1,2$, которое относится к полной мощности нагрузки. ЭДС нагрузки в установившемся режиме трехфазного КЗ принимается равной нулю $E_{*н} = 0$.

Методические указания к выполнению работы

Лабораторная работа выполняется с использованием программы Electronic Workbench.

В соответствии с заданным преподавателем вариантом исходных данных (табл. 1.1) составить схему замещения электрической сети (рис. 1.2) и рассчитать ее параметры. Расчет вести в относительных единицах.

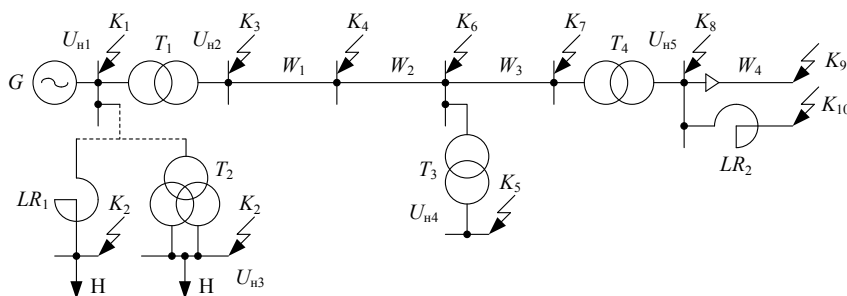


Рис. 1.2. Схема исследуемой электрической сети:
 для вариантов 1–4 нагрузка Н подключена через реактор LR_1 ,
 для вариантов 5–8 нагрузка подключена через двухобмоточный
 трансформатор с расщепленной обмоткой низкого напряжения T_2

Таблица 1.1

Варианты исходных данных

Вариант №		1	2	3	4	5	6	7	8
G	S_H , МВА	40	78,75	125	137,5	188	258,3	235,3	353
	E^*_{∞}	2,58	2,0	2,1	2,35	2,18	2,15	2,22	2,45
	x^*_{∞}	2,65	1,92	1,91	2,04	1,71	1,68	1,84	2,11
T_1	S_H , МВА	40	80	125	200	200	250	250	400
	U_K , %	10,5	11	10,5	11	11	10,5	10,5	11,5
T_2	S_H , МВА	–	–	–	–	25	40	32	64
	$U_{кВН-НН}$, %	–	–	–	–	10,5	12,7	12,7	12,7
	$U_{кНН1-НН2}$, %	–	–	–	–	15	20	20	20
T_3	S_H , МВА	25	63	40	80	125	100	32	160
	U_K , %	10	10,5	10	10,5	10,5	10,5	10	11
T_4	S_H , МВА	16	32	25	40	10	25	63	80
	U_K , %	10	10,5	10	10,5	8	10	11	10
LR_1	U_H , кВ	10	10	10	10	–	–	–	–
	I_H , А	630	1000	630	1600	–	–	–	–
	x_p , %	4,4	5,6	3,5	4,4	–	–	–	–
LR_2	U_H , кВ	10	10	10	10	10	10	10	10
	I_H , А	400	1600	630	1000	2000	3200	2500	2150
	x_p , %	5,5	3,8	5	6,5	4	6	6	5
H	S_H , МВА	10	25	12	16	21	36	28	55
W_1 , км		50	106	55	192	130	52	65	185
W_2 , км		50	93	61	160	99	63	41	165
W_3 , км		50	100	47	138	121	49	57	200
W_4 , км		3	5	3,8	4	4,7	3,3	4,5	3,5
U_{H1} , кВ		6,3	6,3	10,5	10,5	18	15,75	15,75	20
U_{H2} , кВ		110	220	110	330	220	110	110	330
U_{H3} , кВ		10	10	6	10	6	6	10	6
U_{H4} , кВ		11	10	6	35	35	10	10	35
U_{H5} , кВ		6	10	11	10	10	11	6	10

Собрать схему замещения с рассчитанными параметрами в программе Electronic Workbench для заданной точки КЗ.

С помощью программных вольтметра и амперметра определить токи в различных ветвях схемы и остаточные напряжения на шинах. Результаты занести в табл. 1.2. В свойствах прибора на вкладке «Value» в графе «Mode»

необходимо выбрать «АС». Так как параметры схемы замещения рассчитываются в относительных единицах, то показания приборов также снимаются в о. е., однако следует учитывать приставки $m - 10^{-3}$, $\mu - 10^{-6}$.

Таблица 1.2

Результаты выполнения работы

Значения токов и напряжений		Номера точек КЗ									
		K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8	K_9	K_{10}
I	опытное, о. е.										
	действительное, кА										
	расчетное, кА										
U	опытное, о. е.										
	действительное, кВ										
	расчетное, кВ										

Определить действительные значения токов и напряжений. Результаты занести в табл. 1.2.

Произвести исследование качественного влияния нагрузки на величину тока в цепи генератора и в аварийной ветви при КЗ в заданной точке. С этой целью замеры в этих цепях произвести как при включенной нагрузке, так и при отключенной.

Определить расчетным путем значения токов в тех же ветвях и остаточные напряжения на шинах при КЗ в той же точке.

Результаты расчета занести в табл. 1.2. Построить эпюры распределения напряжения.

Сравнить результаты измерений с данными расчета и сделать заключение о степени их соответствия и о причинах возможного расхождения результатов.

Пример

Вариант № 1, точка K_3 с учетом нагрузки.

Принимаем $S_6 = 100$ МВА, $U_{61} = 6,3$ кВ, $U_{62} = 115$ кВ.

Тогда

$$I_{61} = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_{61}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 9,16 \text{ кА,}$$

$$I_{62} = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_{62}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,5 \text{ кА.}$$

Параметры схемы замещения (рис. 1.3):

$$E_1 = E_{*_{\infty}} = 2,58,$$

$$E_2 = E_{*_{н}} = 0,0,$$

$$x_1 = \frac{x_{*H} S_{\bar{0}}}{S_H} = \frac{2,65 \cdot 100}{40} = 6,625,$$

$$x_2 = \frac{x_{*p\%} I_{\bar{0}} U_H}{100 I_H U_{\text{ср.н}}} = \frac{4,4 \cdot 9,16 \cdot 10}{100 \cdot 0,63 \cdot 6,3} = 1,015,$$

$$x_3 = \frac{x_{*H} S_{\bar{0}}}{S_H} = \frac{1,2 \cdot 100}{10} = 12,0,$$

$$x_4 = \frac{U_K S_{\bar{0}}}{100 S_H} = \frac{10,5 \cdot 100}{100 \cdot 40} = 0,263.$$

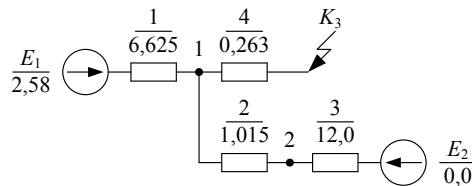


Рис. 1.3. Схема замещения

Аналитический расчет (рис. 1.4).

$$E_{\text{экв}} = \frac{E_1(x_2 + x_3) + E_2 x_1}{x_2 + x_3 + x_1} = \frac{2,58 \cdot (1,015 + 12) + 0 \cdot 6,625}{1,015 + 12 + 6,625} = 1,71.$$

$$x_{\text{экв}} = x_5 = \frac{x_1(x_2 + x_3)}{x_2 + x_3 + x_1} = \frac{6,625 \cdot (1,015 + 12)}{1,015 + 12 + 6,625} = 4,39.$$

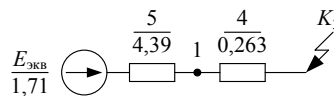


Рис. 1.4

Ток в точке короткого замыкания:

$$I_{*K_3} = \frac{E_{\text{экв}}}{x_5 + x_4} = \frac{1,71}{4,39 + 0,263} = 0,3675,$$

$$I_{K_3} = I_{*K_3} I_{\bar{0}2} = 0,3675 \cdot 0,5 = 0,184 \text{ кА.}$$

Остаточное напряжение на шинах генератора:

$$U_{*\text{ост1}} = I_{*K_3} x_4 = 0,3675 \cdot 0,263 = 0,09665,$$

$$U_{\text{ост1}} = U_{*\text{ост1}} \frac{U_{\bar{0}1}}{\sqrt{3}} = 0,09665 \cdot \frac{6,3}{\sqrt{3}} = 0,352 \text{ кВ.}$$

Ток в ветви генератора:

$$I_{*K_1} = \frac{E_1 - U_{*\text{ост1}}}{x_1} = \frac{2,58 - 0,09665}{6,625} = 0,3748,$$

$$I_{K_1} = I_{*K_1} I_{\bar{0}1} = 0,3748 \cdot 9,16 = 3,433 \text{ кА.}$$

Ток в ветви нагрузки:

$$I_{*K_2} = I_{*K_1} - I_{*K_3} = 0,3748 - 0,3675 = 0,0073,$$

$$I_{K_2} = I_{*K_2} I_{\delta 1} = 0,0073 \cdot 9,16 = 0,067 \text{ кА.}$$

Результаты измерений в Electronic Workbench (рис. 1.5):

$$I_{*K_1} = 0,3748,$$

$$I_{K_1} = I_{*K_1} I_{\delta 1} = 0,3748 \cdot 9,16 = 3,433 \text{ кА,}$$

$$I_{*K_2} = 0,00745,$$

$$I_{K_2} = I_{*K_2} I_{\delta 1} = 0,00745 \cdot 9,16 = 0,0683 \text{ кА,}$$

$$I_{*K_3} = 0,3673,$$

$$I_{K_3} = I_{*K_3} I_{\delta 2} = 0,3673 \cdot 0,5 = 0,184 \text{ кА,}$$

$$U_{*ocr1} = 0,09697,$$

$$U_{ocr1} = U_{*ocr1} \frac{U_{\delta 1}}{\sqrt{3}} = 0,09697 \cdot \frac{6,3}{\sqrt{3}} = 0,353 \text{ кВ.}$$

Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Схема исследуемой электрической сети.
- 3 Исходные данные для заданного варианта.

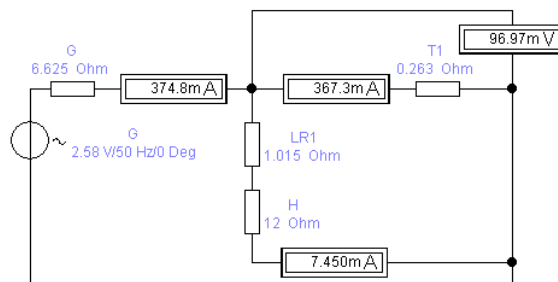


Рис. 1.5

4 Результаты измерений и аналитического расчета токов и напряжений (табл. 1.2).

5 Аналитический расчет токов и остаточных напряжений установившегося режима трехфазного КЗ в заданной точке.

6 Эпюры распределения напряжения, построенные по результатам расчетов и замеров.

7 Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Дать определение КЗ. Что понимают под металлическим КЗ?
2. Причины возникновения КЗ.
3. Каковы последствия КЗ?
4. Каково влияние нагрузки на величины токов в отдельных ветвях при установившемся режиме КЗ?
5. Как проявляется действие АРВ в установившемся режиме КЗ и какие режимы возможны у генератора с АРВ?
6. На чем основано составление приближенной схемы замещения?
7. Почему на результат расчета тока КЗ в относительных единицах не влияет выбор базисных условий?
8. Как наиболее просто определить величину установившегося тока в генераторе при КЗ на его выводах?
9. Какие методы преобразования схем замещения используются при расчете КЗ?

Литература: [1], с. 91–112, [2], с. 5–17.

Лабораторная работа № 2

Переходный процесс в простейшей трехфазной цепи при внезапном коротком замыкании

Цель работы

Изучение переходного процесса (величины тока и его изменения во времени) при КЗ в трехфазной цепи в зависимости от параметров цепи и тока предыдущего режима на персональной ЭВМ (ПЭВМ).

Краткие теоретические сведения

Простейшей трехфазной цепью называют симметричную трехфазную цепь с сосредоточенными активным и индуктивным сопротивлениями при отсутствии в ней трансформаторных связей. На рис. 2.1 приведена простейшая симметричная трехфазная цепь. В ней условно принято, что на одном ее участке имеется взаимоиנדукция между фазами M , а на другом она отсутствует. Цепь присоединена к источнику синусоидального напряжения с неизменными амплитудой и частотой.

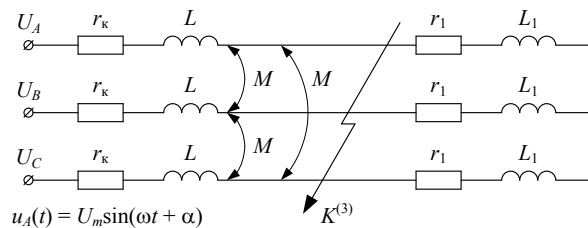


Рис. 2.1

До КЗ в цепи протекал ток нагрузки

$$i_i = I_{mi} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_i), \quad (2.1)$$

где $I_{mH} = \frac{U_m}{z_H}$ – амплитудное значение периодической составляющей тока нагрузки;

U_m – амплитудное значение напряжения;

$z_H = \sqrt{r_H^2 + x_H^2}$ – полное сопротивление цепи;

$r_H = r_1 + r_k$ – активное сопротивление цепи;

$x_H = \omega(L_1 + L)$ – индуктивное сопротивление цепи;

α – фаза включения (начальная фаза) напряжения источника в момент $t = 0$;
 $\varphi_n = \arctg \frac{x_n}{r_n}$ – сдвиг фаз между напряжением и током той же фазы.

Короткое замыкание делит цепь на две части; правую – с сопротивлениями r_1 и $x_1 = \omega L_1$ в каждой фазе и левую – содержащую источник питания и сопротивления цепи КЗ r_k и $x_k = \omega L_k$.

Переходные процессы в обеих частях схемы при трехфазном КЗ протекают независимо.

Правая часть рассматриваемой цепи оказывается зашунтированной КЗ, и ток в ней будет поддерживаться лишь до тех пор, пока запасенная в индуктивности L_1 энергия магнитного поля не перейдет в тепло, поглощаемое активным сопротивлением r_1 .

Дифференциальное уравнение равновесия в каждой фазе этой части имеет вид:

$$0 = i_j r_1 + L_1 \frac{di_j}{dt}, \quad (2.2)$$

где $j = A, B, C$.

Его решение общеизвестно:

$$i = i_0 e^{-\frac{t}{T_{a1}}}. \quad (2.3)$$

Оно показывает, что здесь имеется лишь свободный ток, который затухает по экспоненте с постоянной времени

$$T_{a1} = \frac{L_1}{r_1} = \frac{x_1}{\omega r_1}, \text{ с.} \quad (2.4)$$

Начальное значение свободного тока в каждой фазе зашунтированной части цепи равно предшествующему мгновенному значению тока, поскольку в цепи с индуктивностью не может произойти внезапного (скачком) изменения тока. В общем случае свободные токи в фазах различны (вследствие углового сдвига между токами фаз).

Из сказанного следует, что величина тока в правой части не превысит величины тока нормального режима.

Рассмотрим левую часть цепи, которая осталась присоединенной к источнику питания.

Дифференциальное уравнение равновесия для любой фазы, например, фазы A , описывающее переходный процесс этой цепи,

$$U_A = i_A r_k + L \frac{di_A}{dt} + M \frac{di_B}{dt} + M \frac{di_C}{dt}, (2.5)$$

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

$$U = i r_k + L_k \frac{di}{dt}, (2.6)$$

где i , U – соответственно мгновенные значения тока и напряжения рассматриваемой фазы;

$L_k = L - M$ – результирующая индуктивность фазы.

Решение этого уравнения дает выражение для мгновенного значения тока в любой момент времени t от начала КЗ

$$i_{\hat{e},t} = I_{m\hat{e}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_{\hat{e}}) + i_{a0} e^{-\frac{t}{T_a}}, (2.7)$$

где $I_{m\pi} = \frac{U_m}{z_k}$ – амплитудное значение периодической составляющей тока;

z_k – полное сопротивление присоединенного к источнику участка короткозамкнутой цепи;

φ_k – угол сдвига между током и напряжением короткозамкнутой цепи;

T_a – постоянная времени цепи КЗ

$$T_a = \frac{L_k}{r_k} = \frac{x_k}{\omega r_k}, \text{ с.} \quad (2.8)$$

Как видно из (2.7), полный ток КЗ складывается, из двух составляющих: вынужденной, обусловленной действием напряжения источника питания (первый член в правой части уравнения), и свободной, обусловленной изменением запаса энергии магнитного поля в индуктивности L_k (второй член уравнения).

Вынужденная составляющая тока КЗ имеет периодический характер с частотой, равной частоте напряжения источника. Называют эту составляющую обычно периодическим током КЗ.

Свободная составляющая тока имеет аperiodический характер изменения, на основании чего эту составляющую называют также аperiodической составляющей тока КЗ.

Начальное значение аperiodической составляющей тока КЗ в каждой фазе определится по выражению (2.7) для момента времени $t=0$ ($i_{a,0} = i_{k,0} - i_{n,0}$). Здесь $i_{\varepsilon,0}$ – начальное значение тока КЗ, которое с учетом невозможности изменения тока скачком в цепи с индуктивностью равно $i_{i(0)}$ – току предшествующего режима в данной фазе к моменту $t=0$. Значение периодической составляющей тока при $t=0$ определяется как

$$i_{n,0} = I_{m\pi} \sin(\alpha - \varphi_k). \quad (2.9)$$

Таким образом, выражение для исследования переходного процесса в рассматриваемой фазе простейшей цепи можно записать в следующем виде:

$$i = I_{m\pi} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_{\varepsilon}) + [I_{m\pi} \sin(\alpha - \varphi_1) - I_{m\pi} \sin(\alpha - \varphi_{\varepsilon})] e^{-\frac{t}{T_a}}. \quad (2.10)$$

Из (2.10) следует, что величина тока во время переходного процесса определяется не только временем t , фазой включения α , углом φ_{ε} и постоянной времени T_a , но также предшествующим режимом цепи.

Представляют определенный интерес условия возникновения максимально возможного значения полного тока КЗ и его апериодической составляющей. При $x_k \gg r_k$ и $\varphi_k = 90^\circ$ следует, что максимальное значение тока $i_{a,0}$ будет в случае, если напряжение в момент возникновения КЗ проходит через нулевое значение ($\alpha = 0$), и тока в цепи до КЗ нет, т. е. $i_i(0) = 0$. При этом $i_{a,0} = -I_{mn}$.

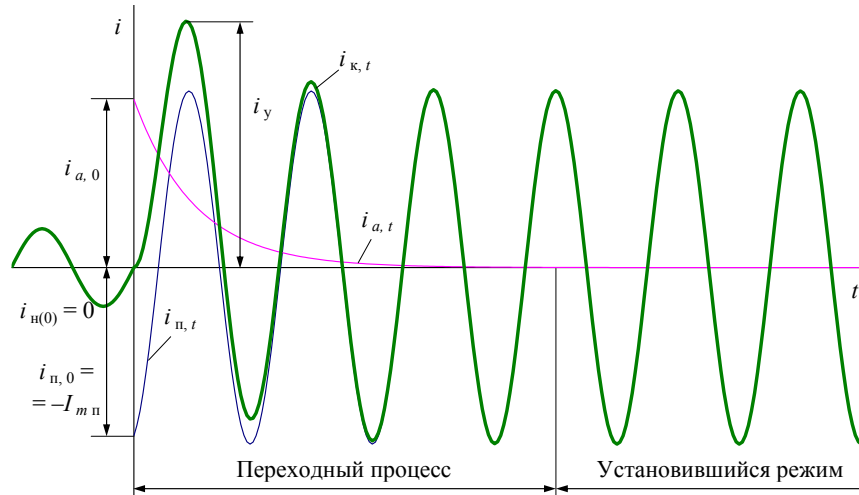


Рис. 2.2

Кривая изменения тока при условии максимального значения апериодической составляющей, тока КЗ показана на рис. 2.2.

Максимальное мгновенное значение полного тока наступает обычно через 0,01 с после начала процесса КЗ (рис. 2.2). Оно носит название **ударного тока** и обозначается $i_{\dot{o}}$. Ударный ток определяется из выражения (2.10) для $i_{n(0)} = 0$, $\alpha = 0$, $\varphi_k = 90^\circ$ и $t = 0,01$ с.

$$i_y = I_{mn} + I_{mn} e^{\frac{0,01}{T_a}} = I_{mn} k_y \quad (2.11)$$

где

$$k_y = 1 + e^{\frac{0,01}{T_a}} \quad (2.12)$$

ударный коэффициент, который показывает превышение ударного тока над амплитудой периодической слагающей; его величина находится в пределах $1 < k_y < 2$, что соответствует предельным значениям T_a , т. е. $T_a = 0$ (при $L_k = 0$) и $T_a = \infty$ (при $r_k = 0$).

Действующее значение тока для произвольного момента времени КЗ равно:

– периодической составляющей

$$I_{п,t} = \frac{I_{mп}}{\sqrt{2}}, (2.13)$$

– аperiodической составляющей

$$I_{a,t} = i_{a,t}; (2.14)$$

– полного тока КЗ

$$I_{к,t} = \sqrt{I_{п,t}^2 + I_{a,t}^2}. (2.15)$$

Наиболее просто можно исследовать протекание переходного процесса в простейшей трехфазной цепи по выражению (2.10) на ПЭВМ. В этом случае имеется возможность проследить характер изменения и величину тока при различных начальных условиях I_{mn} и φ_n , различных значениях φ_k , α , T_a и др.

Техника безопасности

Все операции по включению и отключению ПЭВМ осуществлять под контролем преподавателя. При выполнении работы следует соблюдать «Инструкцию по технике безопасности при работе в лаборатории персональных ЭВМ ВЦ ЭФ».

Порядок выполнения работы

1. Изучить переходный процесс при внезапном КЗ в простейшей трехфазной цепи.

2. В соответствии с заданным преподавателем вариантом (табл. 2.1) в среде MathCAD с использованием программного модуля TKZ.xmcd, расположенного на рабочем столе компьютера в одноименной папке TKZ, произвести корректировку исходных данных, построить и проанализировать графики переходного процесса $i_{k,t}$, $i_{a,t}$ и $i_{n,t}$.

Таблица 2.1

Номер варианта	U_m , кВ	α , град	z_n , Ом	φ_n , град	r_k , Ом	L_k , Гн
1	110	0	100	0	1,0	0,08
2	110	45	200	-30	1,15	0,07
3	220	60	300	90	1,0	0,1
4	110	30	150	30	1,2	0,1
5	220	0	200	-90	1,0	0,09
6	220	15	250	0	1,2	0,08

3. По заданию преподавателя провести исследование зависимостей токов при различных значениях φ_k , α , T_a .

4. Результаты исследования (один вариант зависимостей) вывести на печать.

5. Из графиков определить величины φ_k и T_a и занести их в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Величина	φ_k , град	T_a , с	$I_{н(0)}$, кА	$I_{мп}$, кА	i_y , кА
Расчетные					
Опытные			—	—	—

6. Определить расчетным путем величины φ_k , $I_{н(0)}$, T_a , i_y , $I_{мп}$. Результаты занести в табл. 2.2.

Содержание отчета

1. Цель работы, дифференциальные уравнения равновесия напряжений для фаз *A*, *B* и *C*.
2. Распечатка программы исследования переходного процесса по заданному варианту вместе с графиком (одна на бригаду).
3. Расчетные и определенные из графика величины (табл. 2.2).
4. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Почему в момент возникновения КЗ в простейшей цепи мгновенное значение тока в каждой фазе остается неизменным, т. е. равным мгновенному значению тока предшествующего режима.
 2. Во всех ли фазах трехфазной цепи начальные значения свободных составляющих токов при КЗ будут одинаковыми?
 3. Как определяется начальное значение свободной составляющей тока?
 4. В каких условиях полный ток КЗ в простейшей цепи будет иметь максимальное значение?
 5. Что такое ударный ток?
 6. От чего зависит величина ударного коэффициента и в каких пределах она находится?
 7. Как влияет на характер протекания переходного процесса постоянная времени цепи и каков ее физический смысл?
 8. Как из графика можно определить постоянную времени?
 9. Действующие значения полного тока КЗ и его отдельных составляющих.
- Литература: [1], с. 58–69.

Лабораторная работа № 3

Замыкание фазы на землю в сети с изолированной и резонансно-заземленной нейтралью

Цель работы

Исследование токов и напряжений в сетях с изолированной и резонансно-заземленной нейтралью в нормальном режиме и режиме однофазного замыкания на землю.

Краткие теоретические сведения

Нейтралями электроустановок называют общие точки обмотки генераторов или трансформаторов, соединенные в звезду. В зависимости от режима работы нейтрали электрические сети разделяют на четыре группы:

- 1) сети с эффективно-заземленными нейтралями;
- 2) сети с глухозаземленными нейтралями;
- 3) сети с изолированными нейтралями;
- 4) сети с резонансно-заземленными нейтралями.

В Республике Беларусь к первой группе относятся сети напряжением 110 кВ и выше. Ко второй группе – сети напряжением 220, 380 и 660 В. В сетях этих групп однофазное замыкание на землю вызывает появление больших аварийных токов и поэтому требует немедленного отключения поврежденной цепи.

К третьей и четвертой группам относятся сети от 3 до 35 кВ, нейтрали генераторов и трансформаторов которых изолированы от земли или заземлены через дугогасящий реактор. В этих сетях сравнительно малые токи замыкания на землю не опасны для оборудования и релейная защита действует на сигнал, привлекая внимание обслуживающего персонала.

В связи с этим, в системах с изолированной и резонансно-заземленной нейтралью замыкание одной из фаз на землю называют простым замыканием.

Рассмотрим замыкание на землю фазы A в начале трехфазной линии, присоединенной к источнику переменного тока (рис. 3.1). Распределенные вдоль линии емкости фаз относительно земли условно представлены сосредоточенными емкостями в конце линии. Частичные емкости между фазами для простоты не показаны, так как их влияние на ток замыкания на землю очень мало. Для упрощения принимаем, что нагрузка сети отключена.

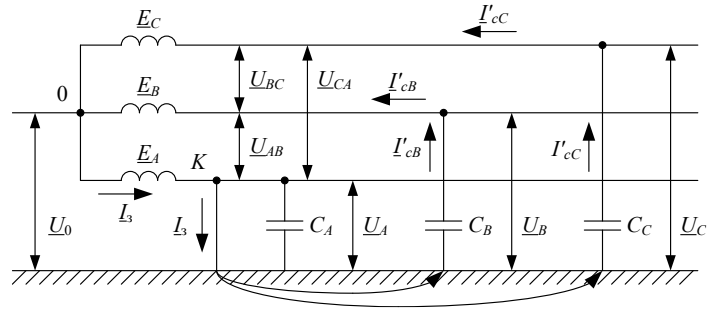


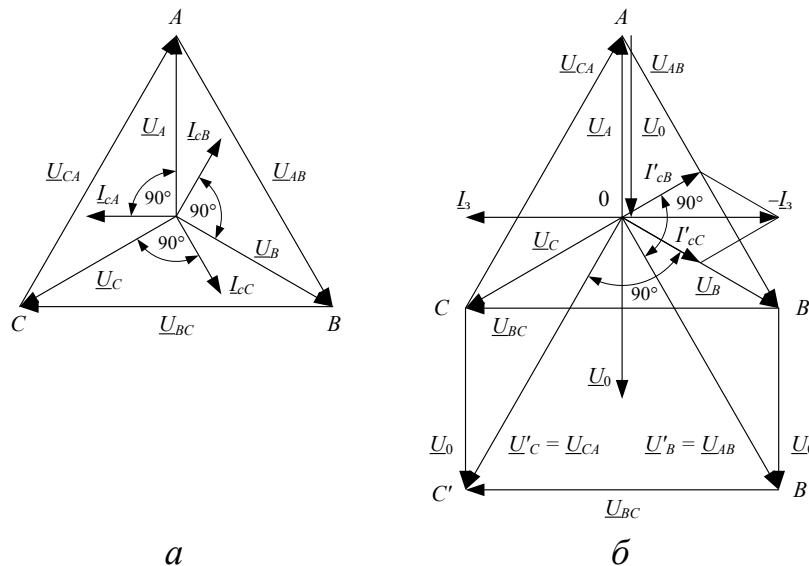
Рис. 3.1. Токи и напряжения при замыкании на землю одной фазы в сети с изолированной нейтралью

В нормальном режиме напряжения фаз A , B и C относительно земли равны соответствующим фазным напряжениям \underline{U}_A , \underline{U}_B , \underline{U}_C , которые в свою очередь равны ЭДС источника питания \underline{E}_A , \underline{E}_B , \underline{E}_C , поскольку нагрузка отключена. Векторы этих фазных напряжений образуют симметричную звезду (рис. 3.2а), а их сумма равна нулю, в результате чего напряжение в нейтрали 0 отсутствует, т. е. $U_0 = 0$.

Под действием фазных напряжений через емкости фаз относительно земли C_A , C_B и C_C проходят токи, опережающие напряжения на 90° :

$$\underline{I}_{cA} = \frac{\underline{U}_A}{-jx_{cA}}; \quad \underline{I}_{cB} = \frac{\underline{U}_B}{-jx_{cB}}; \quad \underline{I}_{cC} = \frac{\underline{U}_C}{-jx_{cC}}. \quad (3.1)$$

где x_{cA} , x_{cB} , x_{cC} — соответствующие емкостные реактивные сопротивления фаз относительно земли:



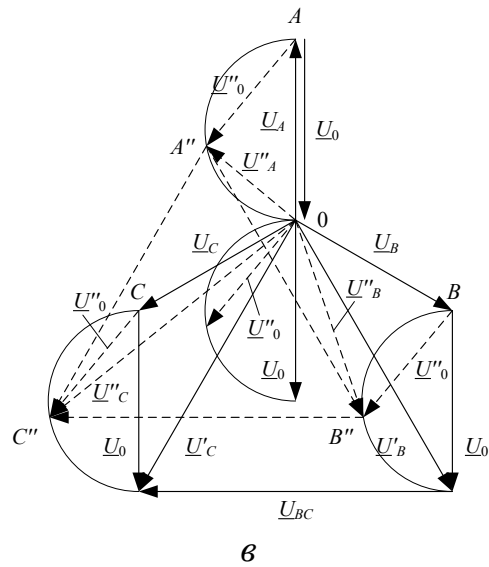


Рис. 3.2. Векторные диаграммы токов и напряжений при замыкании на землю одной фазы в сети с изолированной нейтралью: *a* – в нормальном режиме; *б* – при металлическом замыкании на землю ($r_{\text{д}} = 0$); *в* – при замыкании на землю фазы *A* и $r_{\text{д}} \neq 0$

$$x_{cA} = \frac{1}{\omega C_A}, \quad x_{cB} = \frac{1}{\omega C_B}, \quad x_{cC} = \frac{1}{\omega C_C}.$$

Сумма емкостных токов, проходящих по фазам в нормальном режиме, равна нулю, и поэтому I_0 отсутствует (см. рис. 3.2а).

При металлическом замыкании фазы A на землю (переходное сопротивление в месте замыкания $r_d = 0$) ее напряжение снижается до нуля ($U_A = 0$), так как в результате соединения с землей точка K приобретает потенциал земли.

Напряжение нейтрали \underline{U}_0 по отношению к земле становится равным напряжению между точками K и 0 (рис. 3.1), т. е. напряжению, равному по величине и обратному по знаку фазному напряжению поврежденной фазы:

$$\underline{U}_0 = \underline{U}_{k0} = -\underline{U}_{kA}. \quad (3.2)$$

Напряжения неповрежденных фаз B и C (U'_B и U'_C) относительно земли повышается до междуфазного, т. е. в $\sqrt{3}$ раз. Действительно, на рис. 3.1 видно, что напряжение фазы B относительно земли равно напряжению между проводом B и точкой K , следовательно, $\underline{U}'_B = \underline{U}_{BA}$. В этом случае к вектору напряжения фазы B необходимо добавить вектор напряжения нейтрали $\underline{U}_0 = -\underline{U}_{KA}$ (рис. 3.2б)

$$\underline{U}'_B = \underline{U}_B + \underline{U}_0 = \underline{U}_B - \underline{U}_{KA} = \underline{U}_{AB}.$$

Аналогично напряжение фазы C по отношению к земле $\underline{U}'_C = \underline{U}_{CA}$.

На основе полученных выражений на рис. 3.2б приведена векторная диаграмма напряжений.

Путь циркуляции тока замыкания на землю указан стрелками на рис. 3.1. Емкостной ток поврежденной фазы A будет равен нулю $I_{cA} = 0$, поскольку $\underline{U}_A = 0$. В двух других фазах под действием напряжения \underline{U}'_B и \underline{U}'_C появляются токи, опережающие на 90° повышенные напряжения на неповрежденных фазах:

$$\underline{I}'_{cB} = \frac{\underline{U}'_B}{-jx_{cB}}; \quad \underline{I}'_{cC} = \frac{\underline{U}'_C}{-jx_{cC}}.$$

Ток \underline{I}_φ в месте повреждение равен геометрической сумме токов в фазах B и C и противоположен им по фазе, что видно из токораспределения на рис. 3.1 и векторной диаграммы рис. 3.2б.

$$\begin{aligned} \underline{I}_\varphi &= -(\underline{I}'_{cB} + \underline{I}'_{cC}) = -\left(\frac{\underline{U}'_B}{-jx_{cB}} + \frac{\underline{U}'_C}{-jx_{cC}}\right) = \\ &= -\left(\frac{\underline{U}'_B \omega C_B}{-j} + \frac{\underline{U}'_C \omega C_C}{-j}\right) = j(\underline{U}'_B \omega C_B + \underline{U}'_C \omega C_C) = \\ &= j(\sqrt{3}\underline{U}_B \omega C_B + \sqrt{3}\underline{U}_C \omega C_C) = j\sqrt{3}(\underline{U}_B \omega C_B + \underline{U}_C \omega C_C). \end{aligned}$$

Угол между векторами токов \underline{I}'_{cB} и \underline{I}'_{cC} равен 60° (рис. 3.2б). Таким образом, модуль вектора тока замыкания на землю будет равен

$$|\underline{I}_3| = \sqrt{3}\sqrt{3}|\underline{U}_B \omega C_B| = 3|\underline{U}_C \omega C_C| = 3\underline{U}_\phi \omega C_\phi = 3\underline{U}_\phi \omega C_0 l, \quad (3.4)$$

где $\underline{U}_\delta = \underline{U}_B = \underline{U}_C$ – напряжение фаз сети до замыкания на землю, кВ;

$C_\delta = C_B = C_C$ – емкости фаз сети по отношению к земле, мкФ;

C_0 – емкость 1 км фазы сети относительно земли, мкФ/км;

l – длина фазы сети, км.

Таким образом, ток \underline{I}_3 равен утроенному значению емкостного тока фазы на землю в нормальном режиме и зависит от напряжения сети и емкости фаз относительно земли. Емкость фаз относительно земли в воздушных линиях значительно меньше, чем в кабельных.

Упрощенно ток замыкания на землю можно определить:

– для воздушной линии

$$I_3 = \frac{U_\pi l}{350},$$

где U_π – линейное напряжение сети, кВ.

– для кабельной

$$I_3 = \frac{U_\pi l}{10}.$$

Ток в месте замыкания на землю при наличии электрической дуги в месте повреждения может быть определен (электрическая дуга представляет собой активное сопротивление r_d):

$$\underline{I}_3 = \frac{3\underline{U}_\phi}{3r_d - jx_C}.$$

При возникновении электрической дуги ($r_d \neq 0$) и увеличении ее сопротивления конец вектора напряжения нейтрали \underline{U}''_0 перемещается по

полуокружности, опирающейся на вектор \underline{U}_0 при $r_d = 0$ (рис. 3.2в). Концы векторов \underline{U}''_A , \underline{U}''_B , \underline{U}''_C скользят соответственно по аналогичным полуокружностям, пристроенным к концам векторов соответствующих фазных напряжений. На диаграмме (рис. 3.2в) пунктиром показано положение векторов при отношении $\frac{r_d}{3\omega C} = 1$. Треугольник междуфазных напряжений (A'' , B'' , C'') остается неизменным и, следовательно, нарушение нормального состояния сети не влияет на работу присоединенных на линейное напряжение сети приемников электроэнергии.

Отношение максимального напряжения неповрежденного провода относительно земли в установившемся режиме замыкания фазы на землю к фазному номинальному напряжению называется коэффициентом заземления сети k_3 . Для сетей с изолированной нейтралью его значение равно примерно $\sqrt{3}$.

Однофазное замыкание на землю через дугу более опасно, так как дуга может повредить оборудование и вызвать двух- или трехфазное КЗ (последнее часто наблюдается при однофазных замыканиях на землю одной из жил трехфазного кабеля). Особенно опасны дуги внутри машин и аппаратов, возникающие при однофазных замыканиях на заземлённые корпуса.

При определённых условиях (увеличении тока замыкания) в месте замыкания на землю может возникать так называемая перемежающаяся дуга, т. е. дуга, которая периодически гаснет и зажигается вновь. Перемежающаяся дуга сопровождается возникновением перенапряжений на фазах относительно земли, которые могут достигать $3,5\underline{U}_\phi$. Эти перенапряжения распространяются на всю электрически связанную сеть, в результате чего возможны пробой изоляции, образование КЗ в частях установки с ослабленной изоляцией.

Наиболее вероятно возникновение перемежающихся дуг при емкостном токе замыкания на землю более 10–30 А в зависимости от напряжения, причем опасность дуговых перенапряжений для изоляции возрастает с увеличением напряжения сети. Допустимые значения тока замыкания нормируются ПУЭ и не должны превышать значений, приведенных в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Напряжение сети, кВ	3–6	10	15–20	35
Емкостной ток замыкания на землю, А	30	20	15	10

В сетях 3–35 кВ для уменьшения тока замыкания на землю с целью удовлетворения вышеуказанных норм и предотвращения перенапряжений применяется заземление нейтралей через дугогасящие реакторы (ДР).

В нормальном режиме работы ток через реактор практически равен нулю, т. к. напряжение на нейтрали $U_0 = 0$. При замыкании на землю фазы A дугогасящий реактор оказывается под фазным напряжением, и через место замыкания на землю протекает наряду с емкостным током I_C также индуктивный ток реактора I_L (рис. 3.3а). Так как индуктивный и емкостной ток отличаются по фазе на угол 180° (рис. 3.3б), то в месте замыкания на землю они компенсируют друг друга. Если $I_C = I_L$ (резонанс), то через место замыкания на землю ток протекать не будет. Благодаря этому дуга вместе повреждения не возникает и устраняются связанные с ней опасные последствия.

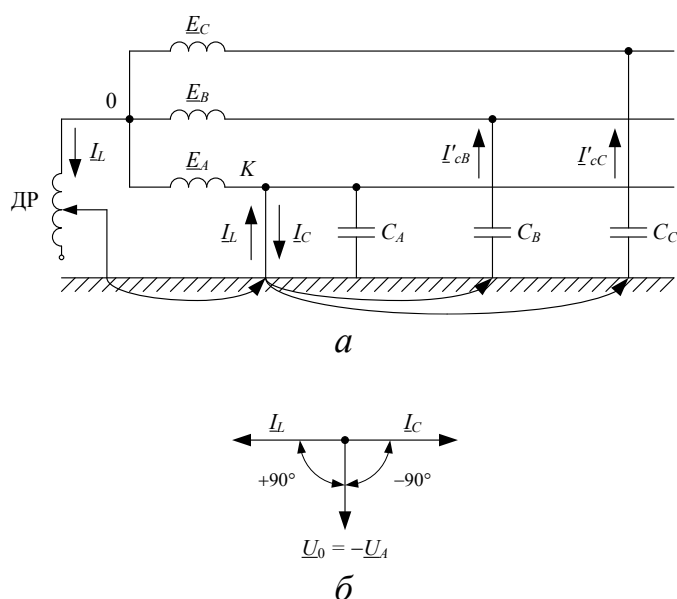


Рис. 3.3. Однофазное замыкание на землю в резонансно-заземленной сети:

a – прохождение токов при замыкании на землю;
б – векторная диаграмма токов в месте повреждения

В этом случае ток I_3 в месте повреждения равен

$$I_3 = 3(I_L - I_C).$$

Индуктивность дугогасящего реактора выбирают таким образом, чтобы $I_3 = 0$. Условием этого является равенство:

$$I_L = I_C; \quad \frac{U_\phi}{x_L} = \frac{3U_\phi}{x_C}; \quad 3\omega L = \frac{1}{\omega C_\phi}; \quad L = \frac{1}{3\omega^2 C_\phi}.$$

ДР выполняют с регулированием индуктивности для того, чтобы производить их настройку при изменениях в защищаемой сети.

Изменение индуктивности ДР может производиться ступенчато переключением числа витков или автоматически плавно: путем изменения воздушного зазора магнитопровода, а также путем подмагничивания магнитопровода постоянным током.

Таким образом, простое замыкание на землю не является КЗ и не сопровождается поэтому снижением линейных напряжений и появлением повышенных токов в сети.

Допустимая длительность работы с простым замыканием на землю определяется Правилами технической эксплуатации и в большинстве случаев не должна превышать двух часов. Последнее связано с тем, что напряжение неповрежденных фаз возрастает до линейного и имеется вероятность пробоя изоляции неповрежденных фаз, т. е. простое замыкание может перейти в двух- или трехфазное КЗ. Поэтому изоляция сетей с изолированной и резонансно-заземленной нейтралью рассчитывается на линейное напряжение. Это ограничивает область применения этого режима работы нейтрали сетями с напряжением 3–35 кВ. В этих сетях стоимость изоляции электроустановок не является определяющей, и некоторое ее увеличение компенсируется повышенной надежностью питания потребителей, так как однофазные замыкания на землю составляют 65 % всех нарушений изоляции.

Следует отметить, что при работе сети с замкнутой на землю фазой становится вероятным повреждение изоляции другой фазы и возникновение междуфазного КЗ через землю. Поэтому в сетях с изолированной нейтралью обязательно предусматривают специальные сигнальные устройства, извещающие персонал о возникновении простого замыкания на землю.

Однако в сетях с изолированной или резонансно-заземленной нейтралью, наряду с повышением напряжения на неповрежденных фазах до линейного и возникновением значительных дуговых перенапряжений, могут возникать феррорезонансные явления, приводящие к повреждению измерительных трансформаторов напряжения (при резонансной настройке дугогасящего реактора).

По этой причине, в развитых странах уже применяется, а в Республике Беларусь признано целесообразным использовать, заземление нейтрали через резистор. Схемы включения резистора в нейтраль сети показаны на рис. 3.4 для различных случаев: при использовании нейтральной точки обмотки силового трансформатора (рис. 3.4а), либо нейтральной точки обмотки соединенной в звезду (или разомкнутый треугольник) дополнительного трансформатора (рис. 3.4б, в, г).

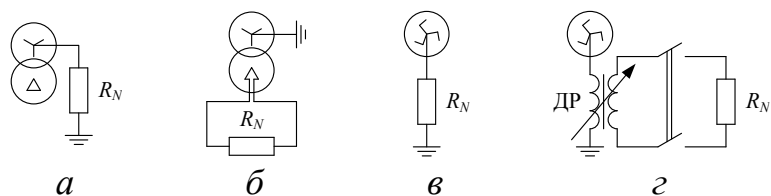


Рис. 3.4

Величина резистора R_N подбирается в зависимости от необходимости отключения сети при однофазном замыкании на землю. Для воздушных неразвитых сетей, где вопросы надежного электроснабжения являются приоритетными, а длительное повышение напряжения на неповрежденных фазах при замыкании одной фазы на землю не является опасным, применяют высокоомный резистор. В этом случае опасные феррорезонансные перенапряжения не возникают и не требуется немедленного отключения сети.

Для кабельных городских развитых сетей, имеющих небольшой запас изоляции по напряжению из-за наличия старых кабелей с ослабленной изоляцией, более важным является вопрос быстрого отключения повреждения и недопущения перенапряжений и развития аварии, чем надежного электроснабжения, поскольку в таких сетях легко обеспечить резервирование питания. В этих случаях применяют низкоомный резистор, что приводит к увеличению тока замыкания на землю и позволяет применять для быстрого отключения повреждения селективные токовые защиты.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с оборудованием и измерительными приборами лабораторного стенда. Собрать исследуемую сеть (рис. 3.5) и установить емкость фаз относительно земли C_ϕ согласно заданному варианту (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Параметры Вариант	U_ϕ , кВ	C_ϕ , мкФ
1	10,5	1,0
2	10,5	0,8
3	10,5	0,6

2. Выполнить измерения токов и напряжений при работе сети с изолированной нейтралью (цепь ДР разомкнута) в нормальном режиме и при замыкании фазы A на землю. Результаты измерений занести в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Параметры Режимы		U	U	U	U	U_A	U_B	U_C	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6
		A	B	C	0	B	C	A						
Нормальны й	изме рено													
	вычи слен о													
Замык ание фазы A на землю	изме рено													
	вычи слен о													
Замыкание фазы A на землю (без ДР) и $r_d \neq 0$														
Замыкание фазы A на землю (ДР вкл.)														
Поло жение перек лючат еля ДР	1													
	2													
	3													
	4													
	5													
	6													

Анализ результатов работы и выводы

Сравнить результаты измерений с данными расчета и сделать заключение о степени их соответствия. Построить векторные диаграммы напряжений и токов.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схема лабораторного стенда.
3. Результаты измерений и вычислений токов и напряжений (табл. 3.3).
4. Векторные диаграммы токов и напряжений, построенные по результатам измерений.

5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Дать определение простого замыкания на землю. Его отличие от короткого замыкания.
 2. Каковы последствия простого замыкания?
 3. Построить векторные диаграммы токов и напряжений при замыкании фаз B или C на землю.
 4. Где больше ток I_3 в кабельной или воздушной линии?
 5. Достоинства и недостатки сетей с изолированной нейтралью.
 6. Каково назначение дугогасящих реакторов и когда они устанавливаются?
 7. Каким образом выбирается индуктивность ДР?
 8. Влияние дуги в месте повреждения при простом замыкании. Чем опасна перемежающаяся дуга?
 9. Преимущества резистивно заземленной нейтрали?
- Литература: [1] с. 434–440, [3] с. 27–38.

Лабораторная работа № 4

Определение СОПРОТИВЛЕНИЙ трансформаторов для токов нулевой ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Цель работы

Определение сопротивлений токам нулевой последовательности двух- и трехобмоточных трансформаторов с различными схемами соединений обмоток.

Краткие теоретические сведения

Для анализа и расчета несимметричных КЗ необходимо определять сопротивления отдельных элементов системы для токов различных последовательностей

Все сопротивления, которыми характеризуются отдельные элементы в нормальном режиме, а также при трехфазном КЗ по существу являются сопротивлениями прямой последовательности.

При расчете несимметричных КЗ с помощью расчетных кривых сопротивления обратной последовательности отдельных элементов принимаются равными сопротивлениям прямой последовательности.

Система токов нулевой последовательности резко отличается от системы токов прямой и обратной последовательности, вследствие чего сопротивления нулевой последовательности в общем случае весьма существенно отличаются от соответствующих сопротивлений двух других последовательностей.

Схема замещения нулевой последовательности определяется схемой сети, а также схемами соединения обмоток трансформаторов, автотрансформаторов и режимом заземления их нейтралей. Вопросы принципа составления схем замещения нулевой последовательности при различных видах несимметрии рассматриваются в лабораторной работе № 5.

Сопротивление нулевой последовательности трансформаторов и автотрансформаторов определяется схемой соединения обмоток и конструктивным исполнением их магнитопроводов.

Если несимметричное КЗ на землю произошло со стороны обмотки трансформатора, соединенной в треугольник (Δ) или звезду без заземленной нейтрали (Y) сопротивление нулевой последовательности трансформатора бесконечно велико ($x_{30} = \infty$), так как в этом случае исключена возможность циркуляции тока нулевой последовательности в данном трансформаторе независимо от того, как соединены его другие обмотки (табл. 4.1 ж, з и табл. 4.2 ж).

Путь для циркуляции токов нулевой последовательности имеет место в тех трансформаторах, которые со стороны КЗ на землю имеют обмотку, соединенную в звезду с заземленной нейтралью (Y_0).

Основные варианты соединения обмоток двухобмоточных трансформаторов, схемы замещения их для токов нулевой последовательности и выражения для определения сопротивления нулевой последовательности данной ветви приведены в табл. 4.1, а для трехобмоточных трансформаторов – в табл. 4.2. В этих таблицах для общности проводимых здесь записей обмотки трансформаторов обозначены порядковыми номерами I, II, III. вместо В, С, Н, как это обычно принято, а x_{T0} – сопротивление нулевой последовательности внешнего элемента (генератора).

Как видно из табл. 4.1 а, б, для всех двухобмоточных трансформаторов со схемой соединения обмоток Y_0/Y_0 (когда внешний элемент со стороны обмотки II имеет заземленную нейтраль) и Y_0/Δ сопротивление нулевой последовательности равно сопротивлению прямой последовательности, $x_{\delta 0}=1$, так как $x_{\mu 0} \gg x_{II}$, а сопротивления каждой обмотки двухобмоточных трансформаторов приблизительно одинаковы и равны половине $U_k\%$, т. е. $x_I = x_{II} = 0,5x_1$.

При соединении обмоток Y_0/Y_0 (когда внешний элемент соединен в Δ или Y) и Y_0/Y (табл. 4.1 в, г, д) сопротивление нулевой последовательности трансформатора $x_{T0} = x_1 + x_{\mu 0}$, так как на стороне обмотки II нет пути для циркуляции тока нулевой последовательности, что соответствует режиму холостого хода трансформатора. Величина $x_{\mu 0}$ – реактивность намагничивания нулевой последовательности трансформатора, которая зависит от конструкции магнитопровода.

Таблица 4.1

№ Варианта	Схема соединения обмоток силового трансформатора	Схема замещения силового трансформатора, для токов нулевой последовательности	Результующее сопротивление нулевой последовательности ветви трансформатора
а			$x_{\Sigma 0} = x_{\delta 0} =$ $= x_I + \frac{x_{II} x_{\mu 0}}{x_{II} + x_{\mu 0}} =$ $= x_I + x_{II},$ $x_{\mu 0} = \infty$
б			$x_{\Sigma 0} = x_I +$ $+ \frac{x_{\mu 0} (x_{II} + x'_{a0})}{x_{\mu 0} + x_{II} + x'_{a0}}$
в			
г			$x_{\Sigma 0} = x_{\delta 0} =$ $= x_I + x_{\mu 0}$
д			
ж		<p style="text-align: center;">—</p>	$x_{\Sigma 0} = \infty$
з		<p style="text-align: center;">—</p>	$x_{\Sigma 0} = \infty$

Таблица 4.2

№ варианта	Схема соединения обмоток силового трансформатора	Схема замещения силового трансформатора для токов нулевой последовательности	Результирующее сопротивление нулевой последовательности ветви трансформатора
а			$x_{\Sigma 0} = x_I + \frac{x_{III}(x_{II} + x'_{a0})}{x_{III} + x_{II} + x'_{a0}}$
б			
в			$x_{\Sigma 0} = x_{\delta 0} = x_I + x_{III}$
г			
д			$x_{\Sigma 0} = x_{\delta 0} = x_I + \frac{x_{II}x_{III}}{x_{II} + x_{III}}$
ж		—	$x_{\Sigma 0} = \infty$

Для группы из трех однофазных трансформаторов, а также для трехфазных четырех- или пятистержневых трансформаторов ток намагничивания нулевой последовательности очень мал, что позволяет им пренебречь и считать $x_{\mu 0} = \infty$, поскольку при таких конструкциях магнитные потоки нулевой последовательности замыкаются через свободные от обмоток стержни.

Иные условия имеют место в трехфазных трехстержневых трансформаторах, где магнитные потоки нулевой последовательности вынуждены замыкаться через изолирующую среду и кожух трансформатора. Для проведения магнитного потока по пути со столь высоким магнитным сопротивлением необходим достаточно большой ток намагничивания;

следовательно, реактивность $x_{\mu 0}$ у трансформатора такого типа значительно меньше, чем $x_{\mu 1}$. В зависимости от конструкции этого типа трансформатора она находится в пределах 0,3–1 и должна быть приведена к базисным условиям.

У трехобмоточных трансформаторов одна из обмоток, как правило соединена в треугольник. Поэтому для них всегда можно принимать $x_{\mu 0} = \infty$, это значение не вводится в схему замещения нулевой последовательности.

Обмотки автотрансформатора связаны между собой не только магнитно, но и электрически, поэтому при глухом заземлении нейтрали автотрансформатора его схема замещения нулевой последовательности будет аналогична схеме трехобмоточного трансформатора со схемой соединения обмоток $Y_0/\Delta/Y_0$.

Сопровитления схем замещения трансформатора x_I , x_{II} и x_{III} находят по формулам, как при расчете трехфазного КЗ.

Описание лабораторного стенда

Для исследования используются двухобмоточный (ТС-1,96/0,4) и трехобмоточный (ТС-1,74/0,4) трехстержневые трансформаторы, каталожные величины которых приведены в табл. 4.3. Выводы обмотки II трансформаторов выполнены таким образом, что представляется возможным собрать любую схему соединения обмоток. Следует отметить, что у трехобмоточного трансформатора обмотка III всегда соединена в Δ .

В качестве источника напряжения нулевой последовательности используется однофазное напряжение, которое подводится через лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) к первичной обмотке исследуемого трансформатора, соединенной по схеме Y_0 .

Таблица 4.3

Схема соединения		Каталожные величины									Расчетные величины, Ом						
Трансформатора	Генератора	S_N , кВА	U_I , В	U_{II} , В	U_{III} , В	$U_{кI-II}$, %	$U_{кII-III}$, %	U_{I-III} , %	$X_{\mu 0}$, о.е.	$X_{Г0}$, Ом	$X_{\Sigma 0}$	$X_{Г0}$	X_I	X_{II}	X_{III}	$X_{\mu 0}$	$X_{Г0}$
2-х обмоточный трансформатор																	
Y_0/Δ	Y_0	1,96	400	120	–	10,5	–	–	∞	–							
Y_0/Y	Y_0	1,96	400	120	–	10,5	–	–	0,3	–							
Y_0/Y_0	Y_0	1,96	400	120	–	10,5	–	–	0,3	1							
3-х обмоточный трансформатор																	
$Y_0/\Delta/Y$	Y_0	1,74	400	230	15	9	17	8,5	∞	–							
$Y_0/\Delta/\Delta$	Y_0	1,74	400	230	15	9	17	8,5	∞	–							
$Y_0/\Delta/Y_0$	Y_0	1,74	400	230	15	9	17	8,5	∞	2							

Таблица 4.4

Схема соединения		Измеренные величины								Расчетные величины, Ом						
Трансформатора	Генератора	U_1	U_2	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	$X_{\Sigma 0}$	X_{T0}	X_I	X_{II}	X_{III}	$X_{\mu 0}$	$X_{г0}$
В	В	А	А	А	А	А	А	А	А							
2-х обмоточный трансформатор																
Y_0/Δ	Y_0															
Y_0/Y	Y_0															
Y_0/Y_0	Y_0															
3-х обмоточный трансформатор																
$Y_0/\Delta/Y$	Y_0															
$Y_0/\Delta/\Delta$	Y_0															
$Y_0/\Delta/Y_0$	Y_0															

Для измерения токов и напряжений в цепях стенда установлены амперметры (A_1 – A_6) и вольтметры (V_1 и V_2). Амперметр A_3 включается в обмотку II, соединенную по схеме Δ .

Схема лабораторного стенда для исследования двухобмоточного трансформатора приведена на рис. 4.1, а трехобмоточного – на рис. 4.2.

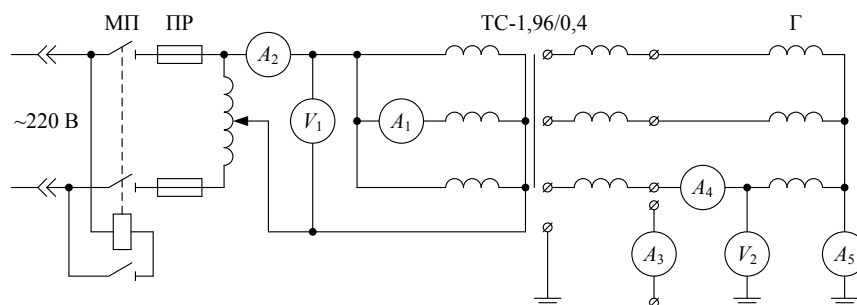


Рис. 4.1. Схема исследования двухобмоточного трансформатора

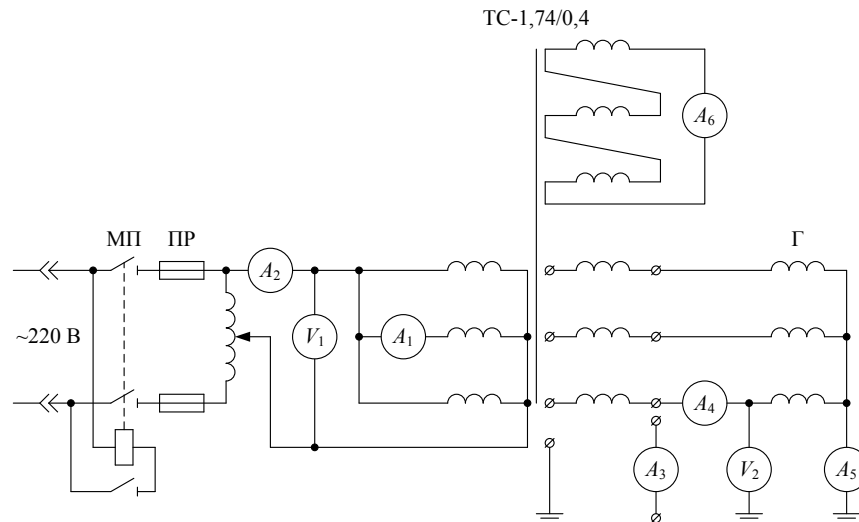


Рис. 4.2. Схема исследования трехобмоточного трансформатора
Порядок выполнения работы

1. При самостоятельной подготовке к лабораторной работе определить сопротивления ($x_{\Sigma 0}$, x_{r0} , x_I , x_{II} , x_{III} , $x_{\mu 0}$, x'_{r0}) в Омах, используя каталожные данные исследуемых трансформаторов, результаты расчетов занести в табл. 4.3. Сопротивления $x_{\Sigma 0}$ и x_{r0} вычисляются по выражениям, приведенным в табл. 4.1 и табл. 4.2 для соответствующих схем соединений обмоток трансформаторов. Сопротивления обмоток трансформаторов и генератора определяются:

– для двухобмоточного трансформатора

$$x_I = x_{II} = \frac{U_{к I-II}}{200} \frac{U_I^2}{S_H}, \quad x_{\mu 0} = x_{* \mu 0} \frac{U_I^2}{S_I}; \quad (4.1)$$

– для трехобмоточного трансформатора

$$x_I = \frac{U_{к I-II} + U_{к I-III} - U_{к II-III}}{200} \frac{U_I^2}{S_H}, \quad (4.2)$$

$$x_{II} = \frac{U_{к I-II} + U_{к II-III} - U_{к I-III}}{200} \frac{U_I^2}{S_H}, \quad (4.3)$$

$$x_{III} = \frac{U_{к I-III} + U_{к II-III} - U_{к I-II}}{200} \frac{U_I^2}{S_H}; \quad (4.4)$$

– для генератора

$$x'_{r0} = x_{r0} k_T^2. \quad (4.5)$$

В этих выражениях: U_k – напряжение КЗ трансформатора в процентах; U_1 – напряжение первичной обмотки трансформатора, В; S_n – номинальная мощность трансформатора, В·А; x'_{r0} – сопротивление токам нулевой последовательности генератора, приведенное к первичной обмотке трансформатора, Ом; $k_r = \frac{U_1}{U_{II}}$ – коэффициент трансформации трансформатора.

2. Определить величины реактивностей нулевой последовательности двухобмоточного (рис. 4.1) и трехобмоточного (рис. 4.2) трансформаторов x_{r0} для различных схем соединений обмоток. В каждом случае установить ЛАТРОм напряжение такой величины, чтобы через амперметр A_1 протекал ток не более 2 А. Данные измерений занести в табл. 4.4.

Сопротивление нулевой последовательности двухобмоточного трансформатора:

– для схемы соединения Y_0/Δ

$$x_{\Sigma 0} = x_{r0} = \frac{U_1}{I_1} = x_I + x_{II}; (4.6)$$

– для схемы соединения Y_0/Y

$$x_{\Sigma 0} = x_{r0} = \frac{U_1}{I_1} = x_I + x_{\mu 0}; (4.7)$$

– для схемы соединения Y_0/Y_0

$$x_{\Sigma 0} = \frac{U_1}{I_1} = x_I + \frac{x_{\mu 0}(x_{II} + x'_{r0})}{x_{\mu 0} + x_{II} + x'_{r0}}; (4.8)$$

$$x_{r0} = x_I + \frac{x_{\mu 0}x_{II}}{x_{\mu 0} + x_{II}}. (4.9)$$

Сопротивление нулевой последовательности трехобмоточного трансформатора:

– для схемы соединения $Y_0/\Delta/Y$ будет

$$x_{\Sigma 0} = x_{r0} = \frac{U_1}{I_1} = x_I + x_{II}; (4.10)$$

– для схемы соединения $Y_0/\Delta/\Delta$

$$x_{\Sigma 0} = x_{r0} = \frac{U_1}{I_1} = x_1 + \frac{x_{II}x_{III}}{x_{II} + x_{III}}; \quad (4.11)$$

– для схемы соединения $Y_0/\Delta/Y_0$

$$x_{\Sigma 0} = \frac{U_1}{I_1} = x_1 + \frac{x_{III}(x_{II} + x'_{r0})}{x_{III} + x_{II} + x'_{r0}}, \quad (4.12)$$

$$x_{r0} = x_1 + \frac{x_{II}x_{III}}{x_{II} + x_{III}}. \quad (4.13)$$

Решив уравнения (4.6)–(4.8) и (4.10)–(4.12), определить сопротивления каждой из обмоток двухобмоточного и трехобмоточного трансформаторов токам нулевой последовательности. Результаты расчета занести в табл. 4.4.

Анализ результатов работы и выводы

Сравнить сопротивления обмоток двухобмоточного и трехобмоточного трансформаторов токам нулевой последовательности, полученных в результате расчетов измерений и каталожных данных. В случае их существенного различия выяснить возможные причины.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схемы, по которым производились измерения сопротивления нулевой последовательности трансформаторов.
3. Результаты расчетов (табл. 4.3 и 4.4).
4. Заключение по выполненной работе.

Контрольные вопросы

1. В каком, случае трансформатор с соединением обмоток Y_0/Δ будет вводиться в схему замещения нулевой последовательности конечным значением сопротивления, а в каких случаях его сопротивление равно ∞ ?
2. В каких случаях трансформатор с соединением обмоток Y_0/Y_0 будет вводиться в схему замещения нулевой последовательности как трансформатор с соединением обмоток Y_0/Y ? Почему?
3. Почему ток намагничивания нулевой последовательности у группы из трех однофазных трансформаторов, трехфазных четырех- и пятистержневых трансформаторов мал?

4. Как определить сопротивление нулевой последовательности трансформатора, имеющего схему соединения обмоток $Y_0/Y/Y_0$?

5. Составить схему замещения нулевой последовательности по заданию преподавателя для расчетной схемы с несколькими трансформаторами.

Литература: [1] с. 279–280, 285–292, [2], с. 38–42.

Литература

1. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. – М.: Энергия, 1970. – 520 с.
2. Свита Л. Н., Силюк С. М. Тексты лекций по курсу «Переходные процессы в электрических системах» для студентов электротехнических специальностей. – Ч. 1. – Минск: БПИ, 1989. – 65 с.
3. Рожкова Л. Д., Козулин В. С. Электрооборудование станций и подстанций. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.
4. Лабораторные работы (практикум) по дисциплине «Переходные процессы в электрических системах» для студентов специальностей 10.01, 10.02, 10.04 / Сост. В. А. Булат, С. Е. Рулько, Л. Н. Свита, С. М. Силюк. В 2-х ч. Ч. 1. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. – Минск: БПИ, 1990. – 58 с.

2.2. «Электрамагнітныя пераходныя працэсы у электраэнергетычных сістэмах». Лабараторны практыкуму двух частках. Частка 2. Разлікі несіметрычных кароткіх замыканняў.

Лабараторная работа № 5

Пабудова схем замяшчэння нулявой паслядоўнасці

Мэта работы: Вывучэнне прынцыпаў і правілаў пабудовы схем замяшчэння нулявой паслядоўнасці пры папярэчнай і падоўжнай несіметрыі.

Кароткія тэарэтычныя звесткі

Для даследавання несіметрычных рэжымаў у сіметрычных трохфазных сістэмах ужываецца метада сіметрычных складовых. Пры гэтым, напрыклад, несіметрычная трохфазная сістэма токаў замяняецца трыма сіметрычнымі трохфазнымі сістэмамі токаў, якія называюцца сістэмамі прамой паслядоўнасці (ПП), адваротнай палядоўнасці (АП) і нулявой паслядоўнасці (НП). Пры выкарыстанні метаду сіметрычных складовых да разліку пераходных працэсаў пры несіметрычных КЗ асноўнай задачай з'яўляецца правільная пабудова схем замяшчэння ПП, АП, НП.

Схема ПП з'яўляецца звычайнай схемай, якую будуецца пры сіметрычным трохфазным КЗ.

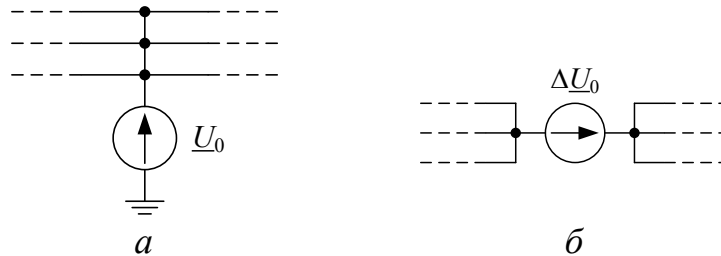
Паколькі шляхі цыркуляцыі токаў АП такія ж, як і для токаў ПП, то схема АП тапалагічна супадае са схемай ПП. Адрозненне паміж імі складаецца ў тым, што ў схеме адваротнай паслядоўнасці электрарухаючыя сілы (ЭРС) усіх генератарных галін прымаюцца роўнымі нулю, а токі АП ствараюцца напружаннем АП, якое дзейнічае ў месцы несіметрыі.

Ток НП з'яўляецца аднафазным токам, які разгаліноўваецца паміж трыма фазамаі пад дзеяннем напружання НП, якое дзейнічае ў месцы несіметрыі. Ток НП пры двухфазным КЗ на зямлю або аднафазным КЗ працякае па зямлі і праз заземленыя нейтральныя вывады абмотак (злучаных па схеме зоркі) элементаў схемы вяртаецца затым да месца КЗ па трохфазных правадніках гэтых элементаў. Таму контуры замыкання тока НП рэзка адрозніваюцца ад шляхоў, па якіх замыкаюцца токі ПП і АП.

Пабудову схем замяшчэння НП неабходна пачынаць ад пункта схемы, у якім узнікла несіметрыя. Схема НП, як і схемы ПП і АП, будуецца для адной фазы. Мяркуецца, што ў пункце несіметрыі ўсе тры фазы замкнёныя паміж сабой. Пры папярэчнай несіметрыі напружанне НП уключаецца паміж гэтым пунктам схемы і зямлёй (мал. 5.1, а). Пры падоўжнай несіметрыі напружанне НП ўключаецца паслядоўна ў месцы разрыву схемы (мал. 5.1, б). Затым,

зыходзячы з адпаведнага зададзенага віда несіметрыі і спосабу ўключэння напружання НП, неабходна выявіць магчымыя контуры працякання токаў НП.

Для ўтварэння такога контура пры папярэчнай несіметрыі неабходна, каб у ланцугу электрычна злучаным з месцам КЗ мелася хаця б адна заземленая нейтраль. Пры некалькіх заземленых нейтралях гальванічна злучаных паміж сабой, токі НП праз галіноўваюцца паміж гэтымі нейтралімі.



Мал. 5.1. Уключэнне напружання нулявой паслядоўнасці:
a – пры папярэчнай несіметрыі; *б* – пры падоўжнай несіметрыі

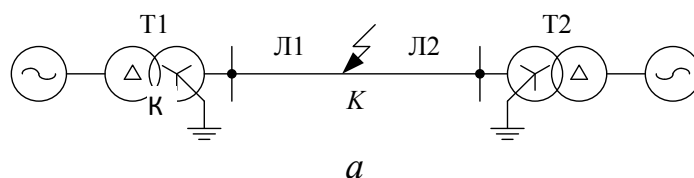
Пры падоўжнай несіметрыі токі НП будуць працякаць толькі ў тым выпадку, калі будзе мецца замкнёны контур праз абходны шлях і схема або ў гэтай электрычнай схеме маюцца заземленыя нейтралі аб двух бакоў ад месцаўключэння напружання НП.

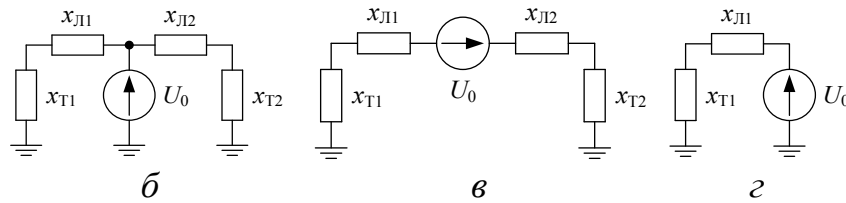
У якасці прыкладу на мал. 5.2 і мал. 5.3 прыведзены разліковыя схемы (мал. 5.2, *a* і мал. 5.3, *a*) і схемы замяшчэння НП пры папярэчнай і падоўжнай несіметрыях ў пунктах КіМ.

Калі б у прыведзеным прыкладзе на мал. 5.2, *a* нейтраль абмоткі трансфарматара Т2 была не заземлена, то схема замяшчэння НП пры папярэчнай несіметрыі мела б выгляд, прыведзены на мал. 5.2, *г*. Схема замяшчэння НП пры падоўжнай несіметрыі ў гэтым выпадку няма сэнсу, таму што няма шляхоў працякання для токаў НП, г. зн.:

$$x_{\Sigma 0} = \infty.$$

Разгледзім пабудову схем замяшчэння НП для электрычнай схемы, прыведзенай на мал. 5.3, *a*, пры папярэчнай і падоўжнай несіметрыі ў пункце М. Пры ўзнікненні папярэчнай несіметрыі токі НП працякаюць да заземленай нейтралі абмоткі трансфарматара Т3 як па лініі Л3, так і па абходнаму шляху, утворанаму лініяй Л4, лініямі Л1 і Л2, што і адлюстроўвае схема замяшчэння, прыведзеная на мал. 5.3, *б*.





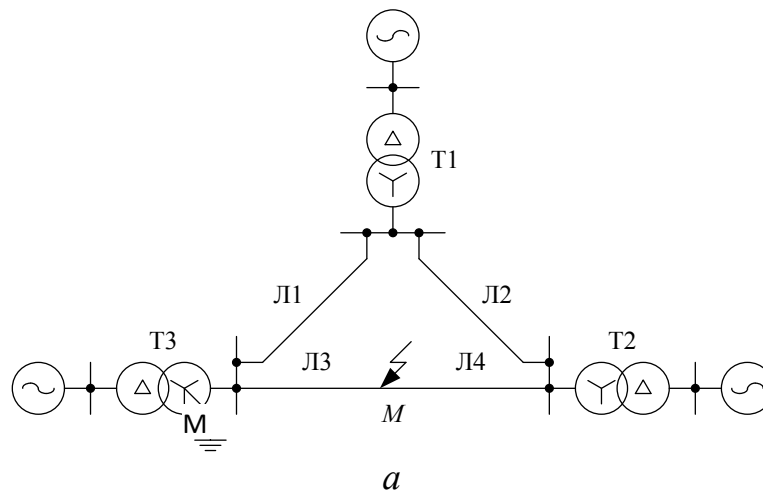
Мал. 5.2. Разліковая схема электрычных злучэнняў і схемы замяшчэння НП

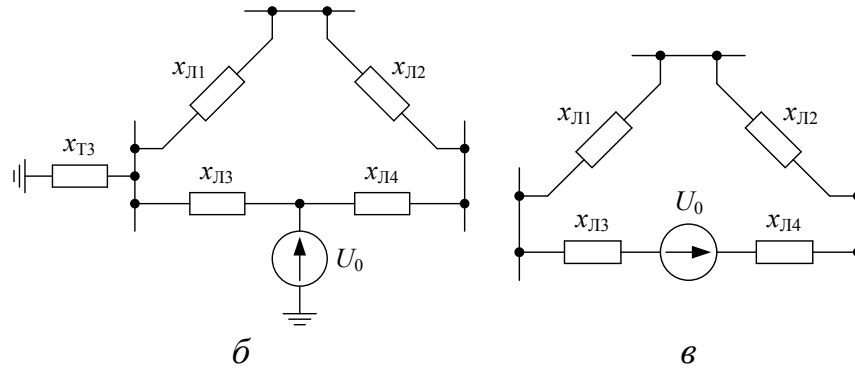
Пры падоўжнай несіметрыі, нягледзячы на тое, што ў схеме ёсць толькі адна заземленая нейтраль, токі НП замыкаюцца па абходнаму шляху, утворанаму адпаведнымі ўчасткамі ліній (мал. 5.3, в).

Пры пабудове схемы замяшчэння неабходна таксама ўлічваць магчымасць трансфармацыі токаў НП сілавымі трансфарматарамі.

Улік трансфарматараў ў схемах НП і велічыні іх супраціўленняў у залежнасці ад канструкцый падрабязна разгледжаны ў лабараторнай рабоце № 4 (Лабараторны практыкум, частка 1).

Калі ў контуры заземлення абмотак нейтралі ў генератараў або трансфарматараў ўключаны супраціўленні, то гэтыя супраціўленні ўводзяцца ў схему замяшчэння НП патроенай велічыняй. Гэта абумоўлена тым, што схема замяшчэння НП будзе цаплядзю адной фазы, а праз азначаныя супраціўленні працякае сума токаў НП трох фаз. Супраціўленне заземлення нейтралі ўключаецца ў схему замяшчэння НП паслядоўна з супраціўленнем той абмоткі, ў нейтраль якой яно ўключана ў разліковай схеме.



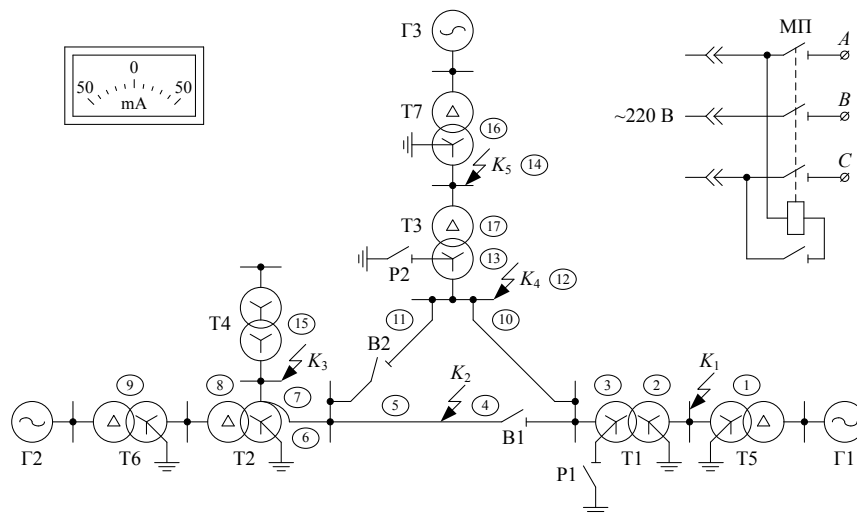


Мал. 5.3. Разліковая схема электрычных злучэнняў ісхемы замяшчэння НП пры палярэчнай і падоўжнай несіметрыі

Супраціўленні элементаў схемы замяшчэння НП вызначаюць ў адносных адзінках, прыводзячы іх да выбраных базісных ўмоў. Вынікоўнае супраціўленне схемы замяшчэння НП разлічваюць з дапамогай тых жа метадаў пераўтварэння схем, якія выкарыстоўваліся пры разліках токаў трохфазнага КЗ.

Апісанне лабараторнага стэнда

На мал. 5.4 прыведзена схема лабараторнага стэнда для пабудовы схем замяшчэння НП пры палярэчнай і падоўжнай несіметрыях у пунктах K_1 – K_5 .



Мал. 5.4. Схемалабараторнага стэнда

З дапамогай пераключальнікаў P_1, P_2 ,
можна задаваць розныя рэжымы работы сістэмы,
Заямляць або рэзямляць нейтралі трансфарматараў T_1
атак самаўключаць або адключаць лініі. Ключы K_1 – K_4
«Продольная»

B_1, B_2
г. зн.
 T_3 ,
устаноўшчы

ствараюць ў адпаведным пункце сістэмы рэжым падоўжнай несіметрыі, «Отключено» – нармальны рэжым, «Поперечная» – рэжым па перацнажнай несіметрыі.

Усе элементы схемы электрычнай сістэмы азначаны парадкавымі нумарамі ад 1 да 17. Для кожнага элемента на стэндзе прадугледжаны раздымы, з дапамогай якіх паслядоўна ў элемент схемы можна ўключыць амперметр.

Акрамя гэтага, у лабараторыі ёсць магчымасць праверкі правільнасці пабудовы схемы замяшчэння НП для паперэчнай несіметрыі пры дапамозе кампутарнай праграмы TKZNP.

Работа з праграмай TKZNP

Пасля запуску праграмы на маніторы ствараецца рабочае поле, на якім збіраецца схема энергасістэмы, якая даследуецца. Элементы сістэмы (генератары, трансфарматары і г. д.) выбіраюцца з базы дадзеных з дапамогай кампутарнай мышы і перацягваюцца на рабочае поле пры націснутай левай клавiшы. Для выбару схемы злучэння абмотак (напрыклад, трансфарматара) неабходна клікнуць правай клавiшай мышы на элемент і выбраць патрэбную схему злучэння.

Для карэктнай работы праграмы пры адлюстраванні шляхоў працякання токаў НП да абмотак трансфарматара, якія працуюць на халастым ходзе (без нагрузкі), варта падключыць невялікі ўчастак лініі.

Элементы сістэмы маюць ад аднаго да трох вузлоў, пры дапамозе якіх яны могуць злучацца з другімі элементамі. Для адлюстравання лініі электраперадачы спачатку неабходна двайным хуткім клікам левай клавiшы ўсталяваць курсор на месца, дзе запланаваны пачатак лініі. Затым аналагічна азначыць на экране пункт, дзе запланаваны канец лініі. Для фіксацыі лініі неабходна націснуць клавiшу Esc. Калі атрыманае злучэнне выканана няправільна, або які небудзь элемент сістэмы патрэбна выдаліць або замяніць, то гэта можна выканаць з дапамогай клавiшы Del, перайшоўшы ў рэжым рэдагавання схемы (для гэтага курсор ўсталёўваецца на патрэбны элемент і націскаецца левая клавiша мышы). Пры неабходнасці любы элемент схемы можна павярнуць націсканнем клавiшы R. Паварот будзе выконвацца па ходу гадзiннікавай стрэлкі з крокам 90°.

Перамяшчэнне рабочага поля выконваецца пры націснутай правай клавiшы мышы.

Пасля пабудовы разліковай схемы неабходна азначыць месца кароткага замыкання, перацягнуўшы знак кароткага замыкання ў патрэбнае месца схемы і сумясціўшы вастрыё стрэлкі з месцам КЗ. Пры націсканні на клавiшу R на схеме чырвоным колерам будуць адлюстраваны тыя элементы або часткі элементаў сістэмы, па якіх працякаюць токі НП.

Адмена рэжыму адлюстравання шляхоў цыркуляцыі токаў НП выконваецца паўторным націсканнем клавiшы P.

Па рэзультатах работы праграмы лёгка будзеца схема замяшчэння НП для папярэчнай несіметрыі.

Ачыстка рабочага поля можа выконвацца паслядоўным выдаленнем элементаў схемы ў рэжыме рэдагавання (з'ялены колер элементаў) або перазагрузкай праграмы.

Парадак выканання работы

1. Ключы К1–К5, якія задаюць рэжымы несіметрыі, усталяваць у становішча “Отключено”.

2. Па зададзенаму выкладчыкам варыянту з табл. 5.1 замаляваць ў справаздачы электрычную схему сістэмы з адпаведным варыянту становішчам пераключальнікаў Р1, Р2, В1, В2 і азначанамі пунктамі несіметрыі.

Табліца 5.1

Нумар варыянта	Рэжымы работы сістэмы				Пункты несіметр ыі
	В1	В2	Р1	Р2	
Варыянт 1	Вкл.	Вкл.	Вкл.	Откл.	К ₂ , К ₅
Варыянт 2	Откл.	Вкл.	Вкл.	Вкл.	К ₁ , К ₄
Варыянт 3	Вкл.	Откл.	Вкл.	Вкл.	К ₁ , К ₃
Варыянт 4	Откл.	Откл.	Вкл.	Вкл.	К ₁ , К ₂
Варыянт 5	Вкл.	Вкл.	Откл.	Откл.	К ₂ , К ₃
Варыянт 6	Вкл.	Вкл.	Откл.	Вкл.	К ₁ , К ₂

3. Пабудаваць схему замяшчэння НП пры папярэчнай несіметрыі для першага з зададзеных пунктаў несіметрыі. Маецца на ўвазе, што ў другім зададзеным пункце несіметрыі пашкодвання няма. Супраціўленнем НП ў схеме замяшчэння прысвойваецца нумар адпаведнага элемента (напрыклад, 1 элемент супраціўлення x_1 і г. д.).

4. Пабудаваць для гэтага ж пункта пашкодвання схему замяшчэння НП для падоўжнай несіметрыі.

5. Пабудаваць схемы замяшчэння НП для папярэчнай і падоўжнай несіметрыі для другога з зададзеных у варыянце пунктаў, маючы на ўвазе, што ў першым пункце пашкодвання адсутнічае.

6. Паказаць выкладчыкуэлектрычную схему і пабудаваныя схемы замяшчэння.

7. У адпаведнасці з варыянтам (пункт 2) ўсталяваць ў адпаведнае становішча пераключальнікі В1, В2, Р1 і Р2 на лабараторным стэндзе.

Уключаючы паслядоўна ад месца несіметрыі кантрольны прыбор на месцы раздымаў, упэўніцца ў правільнасці пабудаваных схем замяшчэння спачатку ў першым, а затым удругім з азначаных пунктаўпры папярэчнай і падоўжнай несіметрыях. Пры працяканні тока НП праз дадзены элемент ён павінен быць уведзены ў схему замяшчэння НП.

8. Адкарэктаваць пабудаваную схему замяшчэння ў адпаведнасці з вынікамі вымярэнняў. Запоўніць табл. 5.2 для зададзенага варыянта («+» пры наяўнасці тока, «-» пры адсутнасці тока).

Табліца 5.2

Табліца вымярэнняў

Пункты несіметрыі	Від несіметрыі	Наяўнасць тока ў адпаведным элеменце схемы																
		Нумары элементаў схемы																
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
К ₁	Папярэчная																	
	Падоўжная																	
К ₄	Папярэчная																	
	Падоўжная																	

9. Выканаць праверку пабудаваных схем замяшчэння НП для папярэчнай несіметрыі з дапамогай праграмы ТКЗНР.

Змест справаздачы

1. Схема электрычных злучэнняў і схемы замяшчэння для кожнага з выпадкаў несіметрыі ў азначаных пунктах па зададзенаму варыянту.

2. Табліца вымярэнняў (табл. 5.2).

Кантрольныя пытанні

1. Шт такога папярэчнай і падоўжнай несіметрыі?

2. Парадак пабудовы схемы замяшчэння НП.

3. Прынцып пабудовы схемы замяшчэння НП пры наяўнасці электрычных і магнітазвязаных ланцугоў пры папярэчнай і падоўжнай несіметрыях.

4. Пабудаваць схемы замяшчэння НП для разліковай схемы, зададзенай выкладчыкам, пры папярэчнай або падоўжнай несіметрыях.

5. Як уводзіцца супраціўленне заямлення нейтралі ў схему замяшчэння НП?

6. Чаму ток НП для трох фаз з'яўляецца аднафазным.

7. Чаму нагрузка на напружаннях 6, 10 і 35 кВ не ўлічваецца ў схеме замяшчэння НП.

8. У якім пункце электрычнай схемы пры палярэчнай або падоўжнай несіметрыі напружанне НП мае найбольшую велічыню?

9. Чаму вынікоўныя супраціўленні НП пры палярэчнай і падоўжнай несіметрыі ў адным і тым жа месцы пашкоджання будуць розныя?

Літаратура: [1], с.279–308; [2], с.37–42, 49–50.

Лабараторная работа № 6

Даследаванне несіметрычных кароткіх замыканняў

Мэта работы: Вывучэнне камплексных схем замяшчэння і прымяненне іх для разліку токаў КЗ пры несіметрычных пашкоджаннях

Кароткія тэарэтычныя звесткі

У трохфазных сетках з глухазаземленай нейтраллю (сеткі з намінальнымі напружаннямі 0,4, 110, 220, 330 і 750 кВ) могуць узнікаць наступныя віды несіметрычных КЗ: двухфазнае, аднафазнае і двухфазнае на зямлю.

Токі ў пашкоджаных фазах пры несіметрычных КЗ значна перавышаюць ток непашкоджаных фаз і пры некаторых умовах могуць пераўзыходзіць ток трохфазнага КЗ.

Для абмежавання токаў аднафазнага КЗ і двухфазнага КЗ на зямлю прымяняюць там, дзе гэта дапушчальна, разязмленне часткі нейтраліў абмотак трансфарматараў. Магчыма таксама заямленне часткі нейтраліў праз спецыяльныя токаабмежавальныя супраціўленні.

У сувязі з гэтым узнікае неабходнасць у разліку параметраў несіметрычных КЗ, які выконваюцца з выкарыстаннем метаду сіметрычных складовых.

Агульная формула для вызначэння велічыні тока ППлюбога віда КЗ выглядае так:

$$I_{к1}^{(n)} = \frac{E_{\Sigma 1}}{x_{\Sigma 1} + x_{\Delta}^{(n)}}, \quad (6.1)$$

дзе $E_{\Sigma 1}$ – вынікоўная ЭРС крыніц сілкавання схемы;

$x_{\Sigma 1}$, $x_{\Sigma 2}$, $x_{\Sigma 0}$ – вынікоўныя супраціўленні схем замяшчэння адпаведна ПП, АП і НП, якія разлічваюцца шляхам згортвання гэтых схем да вузла КЗ;

$x_{\Delta}^{(n)}$ – дадатковая рэактыўнасць, якая ўводзіцца ў схему ПП, велічыня якой залежыць ад віду КЗ і вызначаецца толькі велічынямі $x_{\Sigma 2}$ і $x_{\Sigma 0}$.

На аснове выразу (6.1) Н. Н. Шчадрыным сфармулявана наступнае вельмі важнае правіла (правіла эквівалентнасці прамой паслядоўнасці): ток прамой паслядоўнасці пры любым несіметрычным КЗ можа быць вызначаны як ток трохфазнага КЗ у пункце, аддаленым ад сапраўднага пункта КЗ на дадатковую рэактыўнасць $x_{\Delta}^{(n)}$, якая не залежыць ад параметраў схемы ПП і для кожнага віду КЗ вызначаецца вынікоўнымі супраціўленнямі АП і НП ($x_{\Sigma 2}$ і $x_{\Sigma 0}$) адносна месца несіметрыі і віду пашкоджання.

Паколькі фазныя токі ў месцы КЗ прапарцыянальныя току ПП, то абсалютную велічыню поўнага току любога віду КЗ у пашкоджанай фазе (пашкоджаных фазах) можна знайсці з агульнага выразу:

$$I_k^{(n)} = m^{(n)} I_{k1}^{(n)}, \quad (6.2)$$

дзе $m^{(n)}$ – каэфіцыент прапарцыянальнасці, які залежыць ад віду КЗ.

Значэнні $x_{\Delta}^{(n)}$ і $m^{(n)}$ для розных відаў КЗ прыведзены ў табл. 6.1.

Табліца 6.1

Від кароткага замыкання	$x_{\Delta}^{(n)}$	Каэфіцыент $m^{(n)}$
Трохфазнае КЗ (3)	0	1
Двухфазнае КЗ (2)	$x_{\Sigma 2}$	$\sqrt{3}$
Аднафазнае КЗ на зямлю (1)	$x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}$	3
Двухфазнае КЗ на зямлю (1,1)	$\frac{x_{\Sigma 2} x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}}$	$\sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{\Sigma 2} x_{\Sigma 0}}{(x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0})^2}}$

Як вынікае з (6.1) і (6.2), для вызначэння несіметрычных токаў КЗ патрэбна карыстацца тымі ж прыёмамі, якія выкарыстоўваліся пры разліку трохфазнага КЗ. Ніякіх спецыяльных метадаў для вызначэння токаў ПП не патрабуецца, неабходны толькі ўлік дадатковай рэактыўнасці ў формуле (6.1).

Такім чынам, разлік параметраў пры любым несіметрычным КЗ ў адпаведнасці з правілам Шчадрына будзе наступным:

– будуюцца схемы замяшчэння АП і НП, якія згортваюцца да месца пашкоджання, з якіх вызначаюцца вынікоўныя супраціўленні $x_{\Sigma 2}$ і $x_{\Sigma 0}$;

– па значэннях $x_{\Sigma 2}$ і $x_{\Sigma 0}$ для зададзенага віду КЗ вызначаецца дадатковая рэактыўнасць $x_{\Delta}^{(n)}$;

- будуюцца схема замяшчэнна ПП, у якой сапраўдны пункт КЗ аддаляецца на велічыню супраціўлення $x_{\Delta}^{(n)}$;
- разлічваецца ток ПП $I_{к1}^{(n)} = I^{(3)}$;
- па формуле (6.2) разлічваецца поўны ток у месцы пашкоджання.

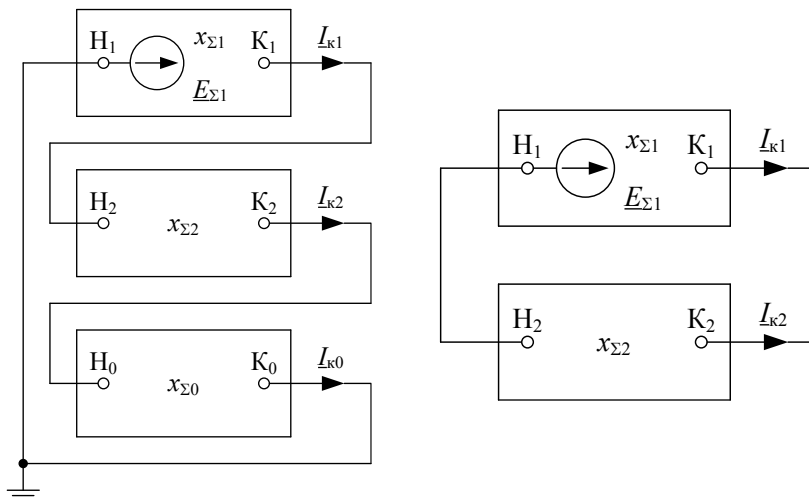
Неабходна адзначыць, што велічыня тока ПП ў месцы КЗ, а таксама звязаныя з ёй велічыні токаў іншых паслядоўнасцей залежаць ад супраціўленняў усіх паслядоўнасцей элементаў схемы. Так, напрыклад, калі нейтраль абмоткі трансфарматара, на вывадах якой маецца аднафазнае КЗ на зямлю, заземліць праз нейкае супраціўленне, то гэта паўплывае на велічыні токаў усіх паслядоўнасцей, хаця токі ПП і АП праз гэтае супраціўленне не працякаюць.

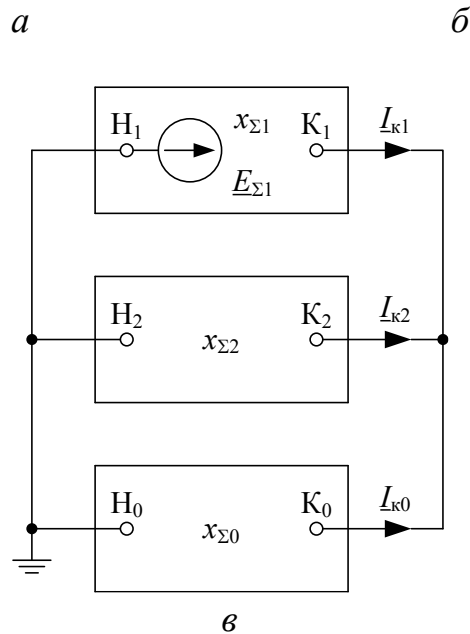
Разлік токаў несіметрычных КЗ зручна выконваць, выкарыстоўваючы камплексныя схемы замяшчэння. Пад камплекснай схемай замяшчэння разумеюць злучэнне схем ПП, АП і НП, якія задавальняюць зададзенаму віду несіметрычнага КЗ.

Камплексная схема замяшчэння дазваляе вызначыць токі розных паслядоўнасцяў ў галінах і напружанні розных паслядоўнасцяў ў вузлах схемы пры несіметрычных КЗ. Камплексныя схемы замяшчэння выкарыстоўваліся ў так званых разліковых сталах, з дапамогай якіх на прадпрыемствах энергасістэм выконваліся разлікі токаў несіметрычных КЗ. Разліковыя сталы замянялі працаёмкую работу інжынераў па згортванню складаных схем замяшчэння ПП, АП і НП да месца несіметрыі.

На мал. 6.1 прыведзены камплексныя схемы замяшчэння для розных відаў несіметрычных КЗ.

У схемах прамавугольнікамі ўмоўна паказаны схемы замяшчэння асобных паслядоўнасцяў (Н – пачатак, К – канец схемы). Клема Нуяўляе сабой аб'яднаны нулявы вывад схем замяшчэння генератараў і нагузак, а ў схеме НП – аб'яднаны нулявы вывад схемы замяшчэння заземленых нейтралей абмотак трансфарматараў. Клема К уяўляе вузел схем, дзе ўзнікла несіметрыя.





Мал. 6.1. Камплексныя схемы замяшчэння для:

a – аднафазнага КЗ; *б* – двухфазнага КЗ; *в* – двухфазнага КЗ на зямлю

Як відаць з мал. 6.1, злучэнне схем розных паслядоўнасцяў у комплексную схему замяшчэння адпавядае структуры назоўніка ў формуле (6.1) для разліку тока ПП. Пры двухфазным КЗ у назоўніку формулы (6.1) стаіць сума вынікоўных супраціўленняў ПП і АПсхемы адносна вузла КЗ, таму схемы ПП і АПна мал. 6.1, бзлучаны паслядоўна. Пры аднафазным КЗ у назоўніку формулы (6.1) стаіць сума вынікоўных супраціўленняў ПП, АП і НП, што адпавядае паслядоўнаму злучэнню адпаведных схем у камплекснай схеме замяшчэння (мал. 6.1, *a*). Адпаведна пры двухфазным КЗ на зямлю паралельна злучаныя схемы паміж сабой схемы АП і НП паслядоўна ўключаны са схемай ПП (мал. 6.1, *в*).

Пры трохфазным КЗ ток ПП з’яўляецца поўным токам КЗ, і для гэтага віду КЗ дадатковая рэактыўнасць раўна нулю.

Аналагічна злучаюцца паміж сабой схемы замяшчэння ПП, АП і НП пры падоўжнай несіметрыі. Пры гэтым структура формулы (6.1) пры абрыве адной фазы адпавядае двухфазнаму КЗ на зямлю, а пры абрыве двух фаз – аднафазнаму КЗ на зямлю.

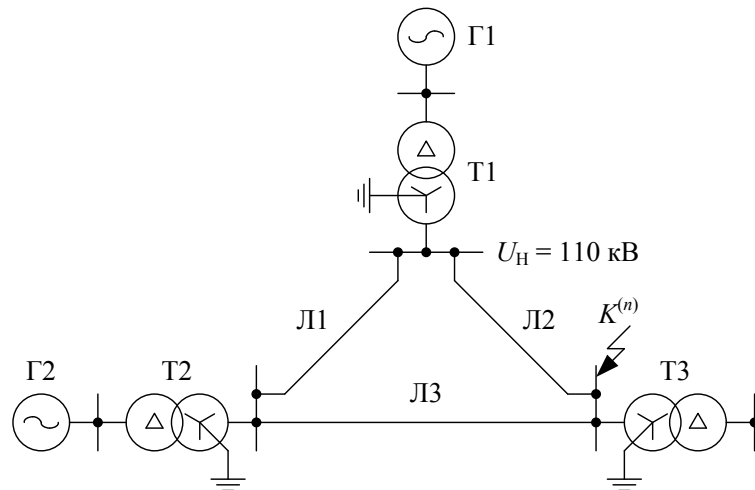
Токі ў галінах і напружанні ў вузлах камплекснай схемы вымяраюцца з дапамогай амперметраў і вальтметраў і пералічваюцца затым ў рэальныя параметры несіметрычнага КЗ з выкарыстаннем маштабных каэфіцыентаў, якія былі прыняты пры пабудове камплекснай схемы замяшчэння.

Рэзультаты разліку параметраў несіметрычных рэжымаў папярэчнай і падоўжнай несіметрыі (токі ў галінах схем і напружанні ў вузлах схем ПП, АП і НП) выкарыстоўваюцца пры разліку ўставак рэлейнайзасцярогі і аўтаматыкі электраэнергетычнай сістэмы.

Апісанне лабараторнага стэнда

Для выканання лабараторнай работы выкарыстоўваецца схема энергасістэмы, прыведзеная на мал.6.2.

Схемы замяшчэння ПП, АП і НП энергасістэмы сабраны на лабараторным стэндзе. Утварэнне камплексных схем замяшчэння для розных відаў палярнай несіметрыі выконваецца пераключальнікамі П1, П2, П3. Становішчы пераключальнікаў для атрымання камплексных схем замяшчэння пры розных відах несіметрычных КЗ прыведзены ў табл. 6.2.



Мал. 6.2. Схема энергасістэмы:

$\Gamma 1 - S_{\text{н}} = 117,5 \text{ МВА}, \cos \varphi = 0,85, x_d'' = 0,138;$

$\Gamma 2 - S_{\text{н}} = 75 \text{ МВА}, \cos \varphi = 0,8, x_d'' = 0,156; \text{ Т1} - S_{\text{н}} = 125 \text{ МВА}, U_{\text{к}} = 10,5 \text{ \%};$

$\text{Т2} - S_{\text{н}} = 80 \text{ МВА}, U_{\text{к}} = 10,5 \text{ \%}; \text{ Т3} - S_{\text{н}} = 40 \text{ МВА}, U_{\text{к}} = 10,5 \text{ \%};$

$\text{Л1} - l = 50 \text{ км}; \text{ Л2} - l = 30 \text{ км}; \text{ Л3} - l = 75 \text{ км}$

Табліца 6.2

Від КЗ	Двухфазна	Аднафазна	Двухфазна
	е	е	е
Пераключальнікі	на зямлю	на зямлю	на зямлю
П1	Откл.	Откл.	Откл.
П2	Откл.	Вкл.	Откл.
П3	Откл.	Откл.	Вкл.

Для аналізу ўплыву на токі КЗ разглядаецца зазямленне і раззямленне нейтралі абмоткі сілавога трансфарматара Т3. Рэжым работы трансфарматара Т3 выбіраецца пераключальнікам П4 (становішча «Включено» адпавядае

заземленай нейралі абмоткі трансфарматара ТЗ, а «Отключено» – разземленай).

Генератары ўведзены ў схему сваімі звышпераходнымі рэактыўнымі супраціўленнямі і ЭРС, таму токі адпавядаюць звышпераходным значэнням перыядычных складовых токаў КЗ.

У якасці звышпераходных ЭРС генератараў выкарыстоўваецца напружанне пастаяннага тока 220 В.

Парадак выканання работы

1. Сабраць камплексную схему замяшчэння для адпаведнага віду КЗ (па заданню выкладчыка).

2. Вызначыць эксперыментальным шляхам токі розных паслядоўнасцяў у месцы пашкоджання для зададзенага віду КЗ. Токі вымяраюцца ў адносных адзінках з дапамогай мікраамперметраў. Адно дзяленне шкалы адпавядае 0,8 адносных адзінак тока. Токі ў пашкоджаных фазах разлічваюцца па формуле (6.2). Рэзультаты замераў занесці ў табл. 6.3.

Табліца 6.3

Вялічыні		$I^{(3)}$	$I_{к1}^{(n)}$	$I_{к2}^{(n)}$	$I_{к0}^{(n)}$
Вымера на	адносныя адзінкі				
	іменаваныя адзінкі				
Разлічан а	адносныя адзінкі				
	іменаваныя адзінкі				

3. Па рэзультатах замераў вызначыць велічыні токаў у кА шляхам памнажэння велічыні на базісны ток (рэзультаты занесці ў табл. 6.3).

$$I_{к}^{(n)} = I_{*к}^{(n)} I_{б}, \quad (6.3)$$

$$\text{дзе } I_{б} = \frac{S_{б}}{\sqrt{3}U_{б}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 115} 0,5 \text{ кА.}$$

4. Выканаць даследаванне якаснага ўплыву раз'язнення абмоткі нейтралі сілавога трансфарматара ТЗ на велічыні токаў пры аднафазным КЗ і двухфазным КЗ на зямлю. З гэтай мэтай неабходна выканаць замеры тока ПП пры ўключаным і адключаным становішчы пераключальніка П4.

5. Вызначыць аналітычным разлікам поўны ток КЗ і яго сіметрычныя складовыя для зададзенага віда КЗ на аснове дадзеных на мал. 6.2. Рэзультаты разліку занесці ў табл. 6.3.

Аналіз рэзультатаў работы і вывады

Параўнаць рэзультаты вымярэнняў з рэзультатамі разлікаў і зрабіць вывад аб іх супадзенні. Выясніць магчымыя прычыны іх неадпаведнасці.

Змест справаздачы

1. Мэта работы.
2. Схема энергасістэмы.
3. Камплексныя схемы замяшчэння.
4. Рэзультаты вымярэнняў і аналітычнага разліку токаў КЗ для зададзенага віда пашкоджання (табл. 6.3).
5. Вывады па рабоце.

Кантрольныя пытанні

1. У чым заключаецца сутнасць метаду сіметрычных складовых?
2. Якія мерапрыемствы прымяняюцца ў сетках з глухазаземленай нейтраллю для абмежавання токаў КЗ на зямлю.
3. Сфармулюйце правіла эквівалентнасці прамой паслядоўнасці.
4. Следства з правіла Шчадрына.
5. Чаму адна з трохфазных абмотак сілавога трансфарматара, якая мае намінальнае напружанне 6, 10 або 35 кВ, злучаецца па схеме трохвугольніка?
6. Што такое камплексная схема замяшчэння?
7. Стасункі паміж сіметрычнымі складовымі токаў і напружанняў для розных відаў КЗ.
8. Чым выклікана з'яўленне вышэйшых гармонік у токах генератараў пры несіметрычных КЗ?
9. Чаму роўны стасунак паміж пачатковымі значэннямі перыядычных складовых токаў пры двухфазных і трохфазных КЗ?
10. Як выконваецца трансфармацыя токаў розных паслядоўнасцей пры праходжанні іх праз трансфарматар?
11. Як адрозніваюцца токі замыкання на зямлю ў сетках з глухазаземленай і ізаляванай нейтраллямі?

Літаратура: [1], с.272–279, 311–344; [2], с. 34–37, 43–48.

Лабораторная работа № 7

Праграма ТК315 для разліку токаў кароткага замыкання на ЭВМ

Мэта работы: Вывучэнне кампютарнай праграмы ТК315.

Прызначэнне праграмы

Праграма ТК315 прызначана для прымянення ў курсавым і дыпломным праектаванні студэнтаў электратэхнічных спецыяльнасцей. Праграма выконвае разлік перыядычнай складовай звышпераходнага тока кароткага замыкання (КЗ) пры аднакратнай папярэчнай несіметрыі. Разлік несіметрычных КЗ выконваецца на аснове метаду сіметрычных складовых трохфазнай схемы [5, 6].

Алгарытм разліку тока КЗ

Разлік рэжыму КЗ выконваецца як разлік усталяванага рэжыму ў схеме замяшчэння, пабудаванай для звышпераходнага рэжыму. Матэматычнай мадэллю гэтага рэжыму з'яўляецца мадэль на аснове вузлавых раўнанняў (вузлавых патэнцыялаў), якая ўяўляе сабой сістэму алгебраічных раўнанняў, парадак якой роўны колькасці лінейна незалежных вузлоў схемы. Уваходныя дадзеныя (УД) аб схеме замяшчэння прадстаўляюцца ў спісавай форме, сістэма вузлавых раўнанняў у памяці ЭВМ не фармуецца, а згортка схем замяшчэння ПП, АП і НП да зададзенага вузла КЗ выконваецца на аснове формул пераўтварэння многапрамяневых зорак у поўныя многавугольнікі. У працэсе згортвання выконваецца запамінанне інфармацыі аб выдаленых вузлах схемы замяшчэння. У выніку згортвання схемы замяшчэння ПП і НП прадстаўляюцца эквівалентнымі галінамі, разлічваюцца велічыны сіметрычных складовых токаў КЗ у месцы КЗ. Пры неабходнасці разліку размеркавання токаў па галінах схемы выконваецца разлік вузлавых напружанняў у схемах ПП, АП і НП і разлік сіметрычных складовых токаў КЗ у галінах схемы. Матрыца вузлавых праводнасцей у памяці ЭВМ не фармуецца, а пераўтварэнне зорак у многавугольнікі адбываецца шляхам лагічнай і арыфметычнай апрацоўкі масіваў інфармацыі аб галінах схем ПП і НП.

Структура файла УД

Уваходнымі дадзенымі з'яўляюцца параметры схемы замяшчэння ў адносных або іменаваных адзінках у камплекснай форме. Схема замяшчэння будуецца і разлічваецца карыстальнікам праграмы.

Для пабудовы схемы замяшчэння вузлы разліковай трохфазнай схемы нумаруюцца цэлымі лічбамі ад 1 да 9999 у адвольным парадку. Для кожнай галіны схемы замяшчэння ПП задаюцца нумары двух вузлоў, да якіх яна далучана, ЭРС і супраціўленне. Схема замяшчэння АП па канфігурацыі і па параметрах галін прымаецца супадаючай са схемай замяшчэння ПП, электрарухаючыя сілы галін прымаюцца роўнымі нулю. Таму ва ўваходных дадзеных для праграмы ТК315 схема замяшчэння АП не апісваецца.

Схемы замяшчэння ПП і НП будуецца для адной фазы. Вузлы схемы замяшчэння ПП нумаруюцца тымі ж нумарамі, як і ў зыходнай разліковай схеме. Вузлам, якія адпавядаюць нейтралю абмотак генератараў і нагрузак, злучаных па схеме зоркі, у схеме замяшчэння ПП абавязкова прысвойваецца нумар 0, і патэнцыял гэтых вузлоў прымаецца роўным нулю. У схеме замяшчэння ПП могуць з'явіцца новыя вузлы, якія адсутнічаюць ў зыходнай разліковай схеме. Напрыклад, трохабмоткавы трансфарматар замяшчаецца эквівалентнай схемай трохпрамянёвай зоркі, тады цэнтру гэтай зоркі прысвойваецца нумар, які адсутнічае ў зыходнай разліковай схеме.

Схема замяшчэння НП будзеца толькі для той часткі электраэнергетычнай сістэмы, якая працуе з глухазаземленай нейтраллю. Токі НП працякаюць па элементах гэтай часткі схемы пад дзеяннем напружання НП, якое дзейнічае ў месцы несіметрыі, і заканчваюцца ў абмотках сілавых трансфарматараў, якія злучаны па схеме трохвугольніка. Вывады гэтых абмотак у схеме НП маюць нулявы патэнцыял, а нумары канцоў галін, якія маюць нулявы патэнцыял у схеме замяшчэння НП, пералічваюцца асобна у файле УД. Такім чынам, вузлы з нумарам 0 у схеме замяшчэння НП адсутнічаюць, а нумары ўсіх вузлоў схемы замяшчэння НП супадаюць з адпаведнымі нумарамі вузлоў схемы замяшчэння ПП.

У некаторых выпадках схема замяшчэння НП па сваёй канфігурацыі можа не адпавядаць схеме замяшчэння ПП, напрыклад, пры ўліку ўзаемнай індукцыі паміж лініямі электраперадачы. Тады ў схеме замяшчэння НП з'яўляюцца нумары вузлоў, якія адсутнічаюць у схеме замяшчэння ПП.

На аснове пабудаванай схемы замяшчэння ствараецца файл УД. Файл УД мае імя ў выглядзе АААА.dat, дзе АААА (літары і лічбы) – імя файла УД, якое пасля работы праграмы ТК315 прысвойваецца файлу рэзультатаў разліку (РР). Файл УД ствараецца карыстальнікам праграмы, а файл РР – праграмай ТК315.

Праграма дазваляе выконваць разлікі токаў толькі міжфазных КЗ (калі схема замяшчэння НП не будзеца і не ўводзіцца) або токаў ўсіх відаў КЗ. Інфармацыя ў файле УД прадстаўлена ў выглядзе чатырох блокаў:

- блок агульных дадзеных;
- блок дадзеных аб галінах схемы ПП;
- блок дадзеных аб вузлах КЗ;

– блок дадзеных аб галінах схемы НП (калі яна задаецца ва ўваходных дадзеных).

У блоку агульных дадзеных прыводзіцца наступная інфармацыя:

– прызнак адзінак вымярэння (цэлая лічба), у якіх пабудавана схема замяшчэння: (0– адносныя адзінкі, 1– іменаваныя адзінкі);

– прызнак наяўнасці схемы замяшчэння НП ва ўваходных дадзеных (цэлая лічба): (0– схема замяшчэння НП адсутнічае, 1– схема замяшчэння НП прысутнічае). Пры адсутнасці схемы замяшчэння НП ва ўваходных дадзеных праграма ТКЗ15 выконвае разлік толькі міжфазных КЗ;

– прызнак вываду сіметрычных складовых токаў КЗ у галінах схемы у выхадны файл (цэлая лічба): (0 – не выводзяцца; 1 – выводзяцца токi ПП; 2 – выводзяцца токi АП; 3 – выводзяцца токi НП; 12 – выводзяцца токi ПП i АП; 13 – выводзяцца токi ПП i НП; 23 – выводзяцца токi АП i НП; 123 – выводзяцца токi ПП, АП i НП);

– колькасць галін у схеме замяшчэння ПП (цэлая лічба);

– колькасць вузлоў КЗ (цэлая лічба);

– колькасць галін у схеме замяшчэння НП (цэлая лічба) (задаецца роўнай 0, калі прызнак наяўнасці схемы замяшчэння НП быў зададзены роўным 0);

– колькасць вузлоў схемы замяшчэння НП, якія маюць нулявы патэнцыял (цэлы лік) (задаецца роўнай 0, калі прызнак наяўнасці схемы замяшчэння НП быў зададзены роўным 0);

– базісная магутнасць, МВА (камплексны лік); задаецца роўнай прынятай базіснай магутнасці, калі схема замяшчэння пабудавана ў адносных адзінках і прызнак адзінак вымярэння быў зададзены роўным 0, або задаецца роўнай (1.,0.), калі схема замяшчэння пабудавана ў іменаваных адзінках і прызнак адзінак вымярэння быў зададзены роўным 1.

У блоку дадзеных аб галінах схемы замяшчэння ПП для кожнай галіны запісваюцца чатыры лічбы: нумары першага і другога канцоў галіны (цэлыя лічбы ад 0 да 9999, першы і другі канцы галіны пералічваюцца ў адвольным парадку), ЭРС і супраціўленне галіны (камплексныя лічбы; калі прызнак адзінак вымярэння быў зададзены роўным 0, то ЭРС і супраціўленне задаюцца ў адносных адзінках, а калі прызнак адзінак вымярэння быў зададзены роўным 1, то ў кВ і Ом). Лічбы аддзяляюцца адна ад другой прабеламі. Колькасць запісаў аб кожнай галіне павінна адпавядаць зададзенай колькасці галін схемы ПП. Пры выкарыстанні іменаваных адзінак схема замяшчэння будзе для адной фазы, і ў якасці ЭРС крыніц задаюцца іх фазныя значэнні.

У блоку дадзеных аб вузлах КЗ для кожнага вузла КЗ запісваецца две лічбы. Першая лічба – гэта яго нумар (цэлая лічба). Другая лічба – базіснае напружанне, кВ (камплексная лічба), калі прызнак адзінак вымярэння быў зададзены роўным 0 (адносныя адзінкі), або (1.,0.), калі прызнак адзінак вымярэння быў зададзены роўным 1 (іменаваныя адзінкі). Колькасць запісаў

аб вузлах КЗ павінна адпавядаць колькасці зададзеных ў першым блоку вузлоў КЗ.

У чацвертым блоку апісваецца інфармацыя аб схеме замяшчэння НП. Калі прызнак наяўнасці схемы замяшчэння НП ва ўваходных дадзеных быў зададзены роўным 0, то чацверты блок інфармацыі ва УД адсутнічае. Калі гэты прызнак быў зададзены роўным 1, то ў чацвертым блоку апісваюцца дзве групы інфармацыі: інфармацыя аб галінах схемы НП і інфармацыя аб вузлах схемы НП, якія маюць нулявы патэнцыял. У першай групе для кожнай галіны схемы замяшчэння НП запісваюцца тры лічбы: нумары першага і другога канцоў галіны (цэлыя лічбы ад 1 да 9999, нумары пералічваюцца ў любым парадку, лічба 0 не павінна прысутнічаць) і супраціўленне гэтай галіны (камплексны лік) у адносных або іменаваных адзінках вымярэння. Колькасць запісаў аб кожнай галіне павінна адпавядаць зададзенай ў першым блоку колькасці галін схемы НП. Другая група інфармацыі аб вузлах схемы НП, якія маюць нулявы патэнцыял, уяўляе масіў нумароў вузлоў схемы НП (цэлыя лікі), якія маюць нулявы патэнцыял у схеме НП. Вузлы пералічваюцца ў адвольным парадку, а колькасць гэтых вузлоў павінна адпавядаць колькасці, зададзенай ў першым блоку.

Усе лічбы ў файле ўваходных дадзеных адносяцца адна ад другой прабеі. Камплексныя лічбы запісваюцца ў круглых дужках у алгебраічнай форме, рэчаісная і ўяўная часткі раздзяляюцца коскай). Кантроль адпаведнасці паміж інфармацыяй, зададзенай ў першым блоку і ў астатніх трох, павінен выконвацца самім карыстальнікам праграмы. Праграма такі кантроль выканаць не можа.

Для спрашчэння падрыхтоўкі файла УД у ім прадугледжаны тэкставыя каментарыі, якія пры ўводзе ў памяць ЭВМ ігнаруюцца.

Структура файла рэзультатаў разліку (PP)

Праграма ТК315 пасля ўводу УД выдае спачатку ў файл PP інфармацыю, прачытаную з файла УД. Карыстальнік мае магчымасць выканаць праверку правільнасці афармлення і ўводу ўваходнай інфармацыі ў памяць ЭВМ.

Пасля гэтага ў выхадны файл выводзяцца рэзультаты разліку тока КЗ. Для кожнага зададзенага вузла КЗ выконваецца цыклічны паўтор разлікаў па праграме і вывад рэзультатаў у выхадны файл. Аб'ём выхадной інфармацыі вызначаецца прызнакам наяўнасці схемы замяшчэння НП і прызнакам вываду сіметрычных складовых токаў КЗ у выхадны файл.

Калі гэтыя прызнакі былі зададзеныя роўнымі 0, то ў выхадны файл выводзяцца выніковае супраціўленне згорнутае да вузла КЗ схемы замяшчэння НП, дзеючае значэнне звышпераходнага току КЗ і яго сіметрычныя складовыя для міжфазных КЗ у зададзеным вузле КЗ у камплекснай форме.

Калі ва ўваходных дадзеных была зададзена схема НП, то ў выхадны файл выводзяцца выніковыя супраціўленні згорнутых да вузла КЗ схем замяшчэння ПП і НП, дзеючае значэнне звышпераходнага току КЗ і яго сіметрычныя складовыя для ўсіх відаў КЗ у зададзеным вузле КЗ у камплекснай форме (калі замыканні на зямлю ў гэтым вузле з'яўляюцца кароткімі замыканнямі).

Калі ва ўваходных дадзеных прызнак вываду сіметрычных складовых токаў КЗ у галінах схемы ў выхадны файл быў зададзены не роўным 0, то дадаткова ў выхадны файл выводзяцца адпаведныя сіметрычныя складовыя току КЗ ў галінах схем замяшчэння ПП і НП. Для кожнай галіны выводзяцца нумары першага і другога канцоў і долі тока ў вузле КЗ у камплекснай форме. Калі замыканне на зямлю ў зададзеным вузле не з'яўляецца кароткім, то сіметрычныя складовыя НП не разлічваюцца і не выводзяцца.

Прыклад выкарыстання праграмы ТК315

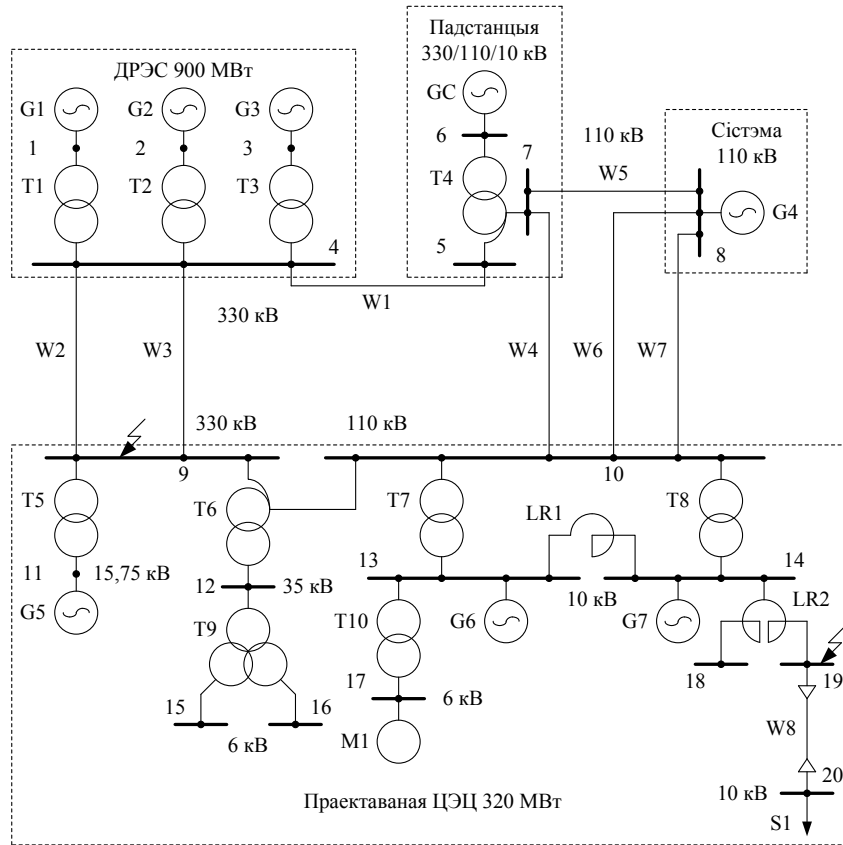
Разлічыць токі КЗ ў схеме праектаванай ЦЭЦ320 МВт. Разліковая схема энергасістэмы, у якой працуе праектаваная ЦЭЦ, прыведзена на мал. 7.1.

Пабудова схемы замяшчэння

Усе генератары працуюць з намінальнай загрузкай. Прымаем, што фазавыя зрухі ЭРС генератараў і нагрузак аднолькавыя. Сінхронны кампенсатар працуе ў рэжыме генерацыі рэактыўнай магутнасці (рэжым пераўзбуджэння) з намінальным токам. Абмоткі ўсіх трансфарматараў і аўтатрансфарматараў на напружаннях 330 і 110 кВ злучаны па схеме зоркі і нейтральныя вывады гэтых абмотак заземлены, а абмоткі на ступенях напружанняў, якія працуюць з ізаляванымі нейтралямі, злучаны па схеме трохвугольніка. На шынах 10 кВ праектаванай ЦЭЦ улічана нагрузка.

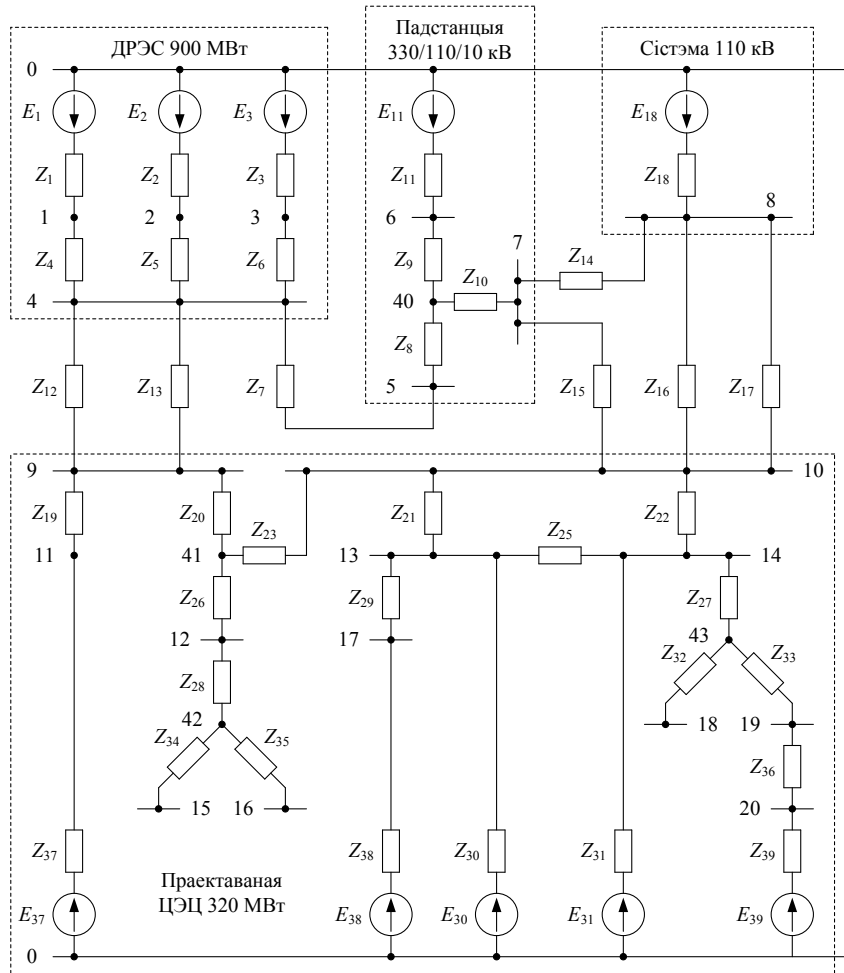
Схему замяшчэння будзем ў адносных адзінках. Выбіраем базісную магутнасць $S_6 = 1000$ МВ·А, а базісныя напружання роўнымі сярэдненамінальным напружанням ступеняў [6]: $U_{6330} = 340$ кВ; $U_{6110} = 115$ кВ; $U_{635} = 37$ кВ; $U_{615} = 15,75$ кВ; $U_{610} = 10,5$ кВ; $U_{66} = 6,3$ кВ.

Схему замяшчэння будзем для звышпераходнага рэжыму работы электрасістэмы. Для гэтага генератары, асінхронны рухавік, сінхронны кампенсатар і нагрузку замяшчаем звышпераходнымі значэннямі ЭРС і супраціўленнямі [6]. Супраціўленні пасіўных элементаў схемы (трансфарматараў, ліній электраперадачы, рэактараў) замяшчаем супраціўленнямі, якія не мяняюць сваёй велічыні на працягу пераходнага рэжыму.



Мал. 7.1. Разліковая схема электраэнергетычнай сістэмы

Схема замяшчэння ПП прыведзена на мал. 7.2. Нумарацыя вузлоў схемы замяшчэння адпавядае нумарам вузлоў на разліковай схеме. ЭРС генератараў, асінхроннага рухавіка, сінхроннага кампенсатара і на грузкі падключаны адным канцом да вузла з нумарам 0 , патэнцыял якога роўны нулю і адпавядае патэнцыялу нулявога вываду абмотак, злучаных па схеме зоркі. У схеме замяшчэння з'явіліся новыя вузлы 40 , 41 , 42 , 43 , якія адпавядаюць цэнтральнаму вузлу ў схемах замяшчэння аўтатрансфарматараў, трохабмоткавага трансфарматара і здвоянага рэактара.



Мал. 7.2. Схема замяшчэння ПП

Звышпераходнае значэнне ЭРС генератараў [6]:

$$\begin{aligned}
 E_1 &= \sqrt{(U_{\text{НОМ}} \cdot \cos \varphi_{\text{НОМ}})^2 + (U_{\text{НОМ}} \cdot \sin \varphi_{\text{НОМ}} + I_{\text{НОМ}} \cdot x'_{d*})^2} = \\
 &= \left(\sqrt{(1 \cdot 0,85)^2 + (1 \cdot 0,527 + 1 \cdot 0,195)^2} \right) + j0,0 = 1,11 + j0,0, \\
 E_2 &= E_3 = E_1 = 1,11 + j0,0; \\
 E_{37} &= 1,11 + j0,0; \\
 E_{30} &= E_{31} = 1,09 + j0,0.
 \end{aligned}$$

Звышпераходнае значэнне ЭРС сінхроннага кампенсатара GC [6]:

$$E_{11} = U_{\text{НОМ}} + I_{\text{НОМ}} \cdot x'_{d*} = (1,0 + 1 \cdot 0,22) + j0,0 = 1,22 + j0,0.$$

ЭРС сістэмы 110 кВ прымаем роўнай намінальнаму напружанню:

$$E_{18} = 1,0 + j0,0.$$

ЭРС камплекснай асінхроннай нагрукі [6]:

$$E_{38} = E_{\text{ЭКВ}^*} = 0,93 + j0,0.$$

ЭРС камплекснай абагульненай нагрукі [6]:

$$E_{39} = E''_{\text{НГ(НОМ)}^*} = 0,865 + j0,0.$$

Звышпераходныя супраціўленні генератараў:

$$Z_1 = Z_2 = Z_3 = 0,0 + jx''_{d^*} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}} = 0,0 + j0,195 \cdot \frac{1000}{353} = 0,0 + j0,552,$$

$$Z_{37} = 0,0 + j0,808,$$

$$Z_{30} = Z_{31} = 0,0 + j1,943.$$

Звышпераходнае супраціўленне кампенсатара:

$$Z_{11} = 0,0 + jx''_{d^*} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}} = 0,0 + j0,22 \cdot \frac{1000}{32} = 0,0 + j6,88.$$

Дадзеныя аб разліковай схеме на мал. 7.1 прыведзены ў табл. 7.1.

Табліца 7.1

Абзначэнне	Назва элемента схемы	Параметры
$G1, G2, G3$	Генератары	ТГВ-300-2У3; $S_{\text{НОМ}} = 353 \text{ МВ} \cdot \text{А};$ $U_{\text{НОМ}} = 20 \text{ кВ};$ $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,85;$ $x''_{d^*} = 0,195$
$G4$	Сістэма 110 кВ	$S_{\text{НОМ}} = 1000 \text{ МВ} \cdot \text{А};$ $x_{1^*} = 0,5;$ $x_{0^*} = 1,2x_{1^*}$
$G5$	Генератар	ТГВ-200-2У3; $P_{\text{НОМ}} = 200 \text{ МВт};$ $U_{\text{НОМ}} = 15,75 \text{ кВ};$ $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,85;$

		$x''_{d^*} = 0,19$
$G6, G7$	Генератары	ТВФ-63-2У3; $P_{НОМ} = 63$ МВт; $U_{НОМ} = 10,5$ кВ; $\cos \varphi_{НОМ} = 0,8$; $x''_{d^*} = 0,153$
GC	Сінхронны кампенсатар	КСВ 32-10У1; $S_{НОМ} = 32$ МВ·А; $U_{НОМ} = 10,5$ кВ; $I_{НОМ} = 1,65$ кА; $x''_{d^*} = 0,22$
$M1$	Камплексная асінхронная нагрузка звыш 1 кВ [6]	$P_{нагр} = 2,6$ МВт; $E_{ЭКВ^*} = 0,93$; $Z_{ЭКВ^*} = 0,01 + 0,17j$; $\cos \varphi_{нагр} = 0,93$
$T1, T2, T3$	Трансфарматары	ТДЦ-400000/330; $S_{НОМ} = 400$ МВ·А; $U_{НОМВ} = 347$ кВ; $U_{НОМН} = 20$ кВ; $U_{\kappa} = 11$ %

Працяг табл. 7.1

Абзначэнне	Назва	Параметры
$T4, T6$	Аўтатрансфарматары	АТДЦТН-125000/330/110; $S_{НОМ} = 125$ МВ·А; $U_{НОМВ} = 330$ кВ; $U_{НОМС} = 115$ кВ; $U_{НОМН} = 38,5$ кВ; $U_{кВ-С} = 10$ %; $U_{кВ-Н} = 35$ %; $U_{кС-Н} = 24$ %
$T5$	Трансфарматар	ТДЦ-250000/330; $S_{НОМ} = 250$ МВ·А; $U_{\kappa} = 11$ %
$T7, T8$	Трансфарматары	ТД-40000/110; $S_{НОМ} = 40$ МВ·А; $U_{\kappa} = 11$ %
$T9$	Трансфарматар	ТРДНС-40000/35; $S_{НОМ} = 40$ МВ·А; $U_{НОМВ} = 36,75$ кВ;

		$U_{кВ-Н} = 12,7 \%$; $U_{НОМН1} = U_{НОМН2} = 6,3$ кВ; $U_{кН1-Н2} = 40 \%$
T10	Трансформатор	ТМ-4000/10; $S_{НОМ} = 4 \text{ МВ} \cdot \text{А}$; $U_{НОМВ} = 10 \text{ кВ}$; $U_{НОМН} = 6,3 \text{ кВ}$; $U_{к} = 7,5 \%$
LR1	Рэактар	РБДЕ10-2500- 0,3У3; $U_{НОМ} = 10 \text{ кВ}$; $I_{НОМ} = 2000 \text{ А}$; $x_{НОМ} = 0,35 \text{ Ом}$
LR2	Рэактар	РБСГ 10-2х1600- 0,2У3; $U_{НОМ} = 10 \text{ кВ}$; $I_{НОМ} = 2 \times 1600 \text{ А}$; $x_{НОМ} = 0,2 \text{ Ом}$; $K_{св} = 0,51$

Канчаток табл. 7.1

Абзначэнне	Назва	Параметры
W1	Паветраная ЛЭП	$l = 110 \text{ км}$; $x_{1удз} = 0,4 \text{ Ом/км}$; $x_0 = 2 x_1$
W2, W3	Двухланцуговая паветраная ЛЭП	$l = 130 \text{ км}$; $x_{1удз} = 0,4 \text{ Ом/км}$; $x_0 = 3 x_1$; $x_{м0} = 2 x_1$
W4, W5	Паветраныя ЛЭП	$l_{W1} = l_{W2} = 60 \text{ км}$; $x_{1удз} = 0,4 \text{ Ом/км}$; $x_0 = 2,4 x_1$
W6, W7	Двухланцуговая паветраная ЛЭП	$l = 80 \text{ км}$; $x_{1удз} = 0,4$ Ом/км; $x_0 = 2 x_1$; $x_{м0} = 1,4 x_1$
W8	Кабельная ЛЭП	Алюмініевы трохжыльны кабель 10 кВ сячэннем жыл 185 мм^2 ; $r_{удз} = 0,167$ Ом/км; $x_{1удз} = 0,077$ Ом/км
S1	Камплексная	$S_{НОМ} = 5 \text{ МВ} \cdot \text{А}$;

	абагульненая нагрузка напружаннем 6– 10 кВ [6]	$E''_{\text{нг(ном)*}} = 0,865;$ $Z''_{1\text{нг(ном)*}} = 0,3+j0,43$ [6]
--	---	---

Звышпераходнае супраціўленне камплекснай асінхроннай нагрузкі [6]:

$$Z_{38} = (0,01 + j0,17) \cdot \frac{S_6 \cdot \cos \varphi_{\text{нагр}}}{P_{\text{нагр}}} =$$

$$= (0,01 + j0,17) \cdot \frac{1000 \cdot 0,93}{2,5} = 4,65 + j79,05.$$

Звышпераходнае супраціўленне камплекснай абагульненай нагрузкі:

$$Z_{39} = Z''_{1\text{нг(ном)*}} = (0,3 + j0,43) \cdot \frac{S_6}{S_{\text{ном}}} = (0,3 + j0,43) \cdot \frac{1000}{5,0} = 60,0 + j86,0.$$

Супраціўленні двухабмоткавых трансфарматараў:

$$Z_4 = Z_5 = Z_6 = 0,0 + j \left(\frac{U_{\text{к}}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{ном}}} \right) = 0,0 + j \frac{11}{100} \cdot \frac{1000}{400} = 0,0 + j0,265,$$

$$Z_{19} = 0,0 + j0,44,$$

$$Z_{30} = Z_{31} = 0,0 + j2,75,$$

$$Z_{29} = 0,0 + j18,75.$$

Супраціўленні аўтатрансфарматараў:

$$Z_8 = Z_{20} = 0,0 + j \frac{U_{\text{кВ-С}} + U_{\text{кВ-Н}} - U_{\text{кС-Н}}}{2 \cdot 100} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{ном}}} =$$

$$= 0,0 + j \frac{10 + 35 - 24}{2 \cdot 100} \cdot \frac{1000}{125} = 0,0 + j84;$$

$$Z_{10} = Z_{23} = 0,0 + j \frac{U_{\text{кВ-С}} + U_{\text{кС-Н}} - U_{\text{кВ-Н}}}{2 \cdot 100} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{ном}}} =$$

$$= 0,0 + j \frac{10 + 24 - 35}{2 \cdot 100} \cdot \frac{1000}{125} = 0,0 - j0,04;$$

$$\begin{aligned}
 Z_9 = Z_{26} &= 0,0 + j \frac{U_{\text{кВ-Н}} + U_{\text{кС-Н}} - U_{\text{кВ-С}}}{2 \cdot 100} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}} = \\
 &= 0,0 + j \frac{35 + 24 - 10}{2 \cdot 100} \cdot \frac{1000}{125} = 0,0 + j1,96.
 \end{aligned}$$

Супраціўленне трансфарматара з абмоткай ніжэйшага напружання, расчэпленай на дзве галіны:

$$\begin{aligned}
 Z_{28} &= 0,0 + j \left(\frac{U_{\text{кВ-Н}} - 0,25U_{\text{кН1-Н2}}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}} \right) = \\
 &= 0,0 + j \frac{12,7 - 0,25 \cdot 40}{100} \cdot \frac{1000}{40} = 0,0 + j0,675, \\
 Z_{34} = Z_{35} &= 0,0 + j \left(\frac{U_{\text{кН1-Н2}}}{2 \cdot 100} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}} \right) = \\
 &= 0,0 + j \frac{40}{2 \cdot 100} \cdot \frac{1000}{40} = 0,0 + j5,0.
 \end{aligned}$$

Супраціўленне рэактара $LR1$:

$$Z_{25} = 0,0 + jx_{\text{НОМ}} \frac{S_6}{U_{610}^2} = 0,0 + j \cdot 0,35 \cdot \frac{1000}{10,5^2} = 0,0 + j3,175.$$

Супраціўленні рэактара $LR2$:

$$\begin{aligned}
 Z_{27} &= 0,0 + j \left(-K_{\text{св}} x_{\text{НОМ}} \frac{S_6}{U_{610}^2} \right) = 0,0 - j0,51 \cdot 0,2 \cdot \frac{1000}{10,5^2} = 0,0 - j0,925. \\
 Z_{32} = Z_{33} &= 0,0 + j \left((1 + K_{\text{св}}) x_{\text{НОМ}} \frac{S_6}{U_{610}^2} \right) = \\
 &= 0,0 + j(1 + 0,51) \cdot 0,2 \cdot \frac{1000}{10,5^2} = 0,0 + j2,74.
 \end{aligned}$$

Супраціўленні ЛЭП:

$$Z_7 = 0,0 + jx_{1\text{удз}} \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{6330}^2} = 0,0 + j \cdot 0,4 \cdot 110 \cdot \frac{1000}{340^2} = 0,0 + j0,381,$$

$$Z_{12} = Z_{13} = 0,0 + j0,45,$$

$$Z_{14} = Z_{15} = 0,0 + j1,815,$$

$$Z_{16} = Z_{17} = 0,0 + j2,42,$$

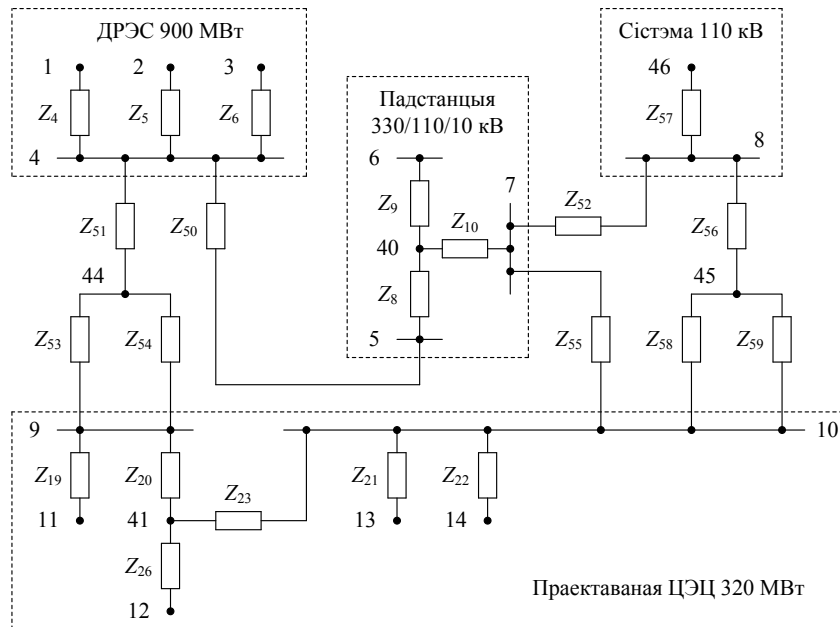
$$Z_{36} = (r_{уд3} + jx_{1уд3}) \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{610}^2} =$$

$$= (0,167 + j \cdot 0,077) \cdot 0,5 \cdot \frac{1000}{10,5^2} = 0,757 + j0,349.$$

Сістэма 110 кВ:

$$Z_{18} = 0,0 + jx_{1*} \cdot \frac{S_6}{S_{ном}} = 0,0 + j \cdot 0,5 \cdot \frac{1000}{1000} = 0,0 + j0,5.$$

Схема замяшчэння НП прыведзена на мал. 7.3. У схему замяшчэння НП ўваходзіць толькі тая частка элементаў электрасістэмы, якая працуе з глухім заземленнем нейтралі. Гэта ЛЭП 330 і 110 кВ і трансфарматыры Т1–Т7, Т9, Т10. Токі НП працякаюць толькі ў гэтай частцы схемы пры замыканнях на зямлю. Абмоткі вышэйшага або сярэдняга напружання трансфарматараў злучаны па схеме зоркі з заземленнем нейтралі. Абмоткі ніжэйшага напружання трансфарматараў злучаны па схеме трохвугольніка, токі НП замыкаюцца па фазах трохвугольніка, вывады трохвугольнікаў маюць для гэтых токаў нулявы патэнцыял, токі НП не могуць выйсці за межы трохвугольнікаў.



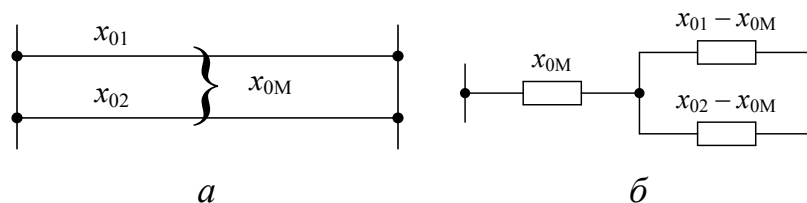
Мал. 7.3. СхемазамяшчэнняНП

СхемязамяшчэнняісупраціўленнітрансфарматараўдлятокаўНПнеадрозніваюццаадсхемісупраціўленняўдлятокаўПП.

НумарысупраціўленняўіадпаведныхвузлоўсхемыППўсхемеНПзасталісябеззмен.

СхемязамяшчэнняісупраціўленніЛЭПдлятокаўНП істотнаадрозніваюццаадсупраціўленняўЛЭПП (мал. 7.4).

[5, 7]



Мал. 7.4. Схема замяшчэння для ўліку ўзаемнай індуктыўнасці двух ЛЭП:
a – зыходная схема; *б* – схема замяшчэння

Супраціўленні НП адзіночных ЛЭП:

$$Z_{50} = 2Z_7 = 2 \cdot (0,0 + j0,381) = 0,0 + j0,762,$$

$$Z_{52} = Z_{55} = 2,4Z_{14} = 2,4 \cdot (0,0 + j1,815) = 0,0 + j4,356.$$

Схемы замяшчэння двухланцуговых ЛЭП *W2*, *W3* і *W6*, *W7* для токаў НП па трабуюць уліку ўзаемнай індуктыўнасці. У схемах замяшчэння гэтых ЛЭП з'явіліся новыя вузлы 44 і 45:

$$Z_{51} = 2Z_{12} = 0,0 + j0,9,$$

$$Z_{53} = Z_{54} = 3Z_{12} - 2Z_{12} = 0,0 + j0,45,$$

$$Z_{56} = 2Z_{16} = 0,0 + j4,84,$$

$$Z_{58} = Z_{59} = 2Z_{16} - 1,4Z_{16} = 0,0 + j1,452.$$

Супраціўленне нулявой паслядоўнасці сістэмы 110 кВ:

$$Z_{57} = 1,2Z_{18} = 1,2 \cdot (0,0 + j0,5) = 0,0 + j0,6.$$

Супраціўленне сістэмы Z_{57} не можа быць падключана да вузла з нумарам 0 схемы ПП. Таму ў схему НП уведзены новы вузел з нумарам 46.

Файл уваходных дадзеных

Для стварэння файла УД для новай задачы рэкамендуецца ўзяць такі файл для задачы, якая ўжо рашалася, прысвоіць яму новае імя і ўвесці ў яго дадзеныя для новай задачы. У файле УД маюцца тэкставыя ўстаўкі, якія пры ўводзе ігнаруюцца. Файл УД з назвай `prk1.dat` для разліку токаў КЗ у вузлах 9, 19 нашага прыкладу мае выгляд:

Файл prk1.dat для прыкладу ў інструкцыю да праграмы ТК315
Прызнак адзінак вымярэння параметраў схемы замяшчэння: 0 – адносныя; 1 –
іменаваныя (цэлы лік):

0

Прызнак наяўнасці схемы нулявой паслядоўнасці (СНП) ва ўваходных
дадзеных: 0 – адсутнічае; 1 – прысутнічае (цэлы лік):

1

Прызнак вываду сіметрычных складовых тока кароткага замыкання (КЗ) у
галінах схемы ў выхадны файл: 0 – не выводзяцца; выводзяцца: 1 – токі
прамой паслядоўнасці (ПП); 2 – токі адваротнай паслядоўнасці (АП); 3 – токі
НП; 12 – токі ПП і АП; 13 – токі ПП
і НП; 23 – токі АП і НП; 123 – токі ПП, АП і НП, (цэлы лік);

0

Колькасць галін схемы ПП (цэлы лік):

38

Колькасць вузлоу КЗ (цэлы лік):

2

Колькасць галін схемы НП (задаецца роўнай нулю, калі прызнак наяўнасці
схемы НП быў зададзены роўным нулю) (цэлы лік):

22

Колькасць вузлоў схемы НП, якія маюць нулявы патэнцыял (задаецца
роўнай нулю, калі прызнак наяўнасці схемы НП быў зададзены роўным
нулю) (цэлы лік):

9

Базісная магутнасць, МВА (задаецца роўнай (1.,0.)), калі прызнакадзінак
вымярэння параметраў схемы замяшчэння быў зададзены роўным 1)
(камплексны лік):

(1000.,0.)

Інфармацыя аб галінах схемы ПП. Для кожнай галіны ўводзяцца: нумар
першага канца, нумар другога канца (цэлыя лікі), электрарухаючая сіла і
супраціўленне галіны ў адносных або іменаваных (кВ, Ом) адзінках
(камплексныя лікі):

0 1 (1.11,0.) (0.,0.552)

0 2 (1.11,0.) (0.,0.552)

0 3 (1.11,0.) (0.,0.552)

1 4 (0.,0.) (0.,0.265)

4 2 (0.,0.) (0.,0.265)

4 3 (0.,0.) (0.,0.265)

4 5 (0.,0.) (0.,0.381)

5 40 (0.,0.) (0.,0.84)

40 6 (0.,0.) (0.,1.96)

40 7 (0.,0.) (0.,-0.04)

6 0 (1.22,.) (0.,6.88)

4 9 (0.,0.) (0.,2.42)
 4 9 (0.,0.) (0.,2.42)
 7 8 (0.,0.) (0.,1.815)
 7 10 (0.,0.) (0.,1.815)
 8 10 (0.,0.) (0.,2.42)
 8 10 (0.,0.) (0.,2.42)
 8 0 (1.,0.) (0.,0.5)
 9 11 (0.,0.) (0.,0.44)
 9 41 (0.,0.) (0.,0.84)
 10 13 (0.,0.) (0.,2.75)
 10 14 (0.,0.) (0.,2.75)
 41 10 (0.,0.) (0.,-0.04)
 13 14 (0.,0.) (0.,3.175)
 41 12 (0.,0.) (0.,1.96)
 14 43 (0.,0.) (0.,-.925)
 12 42 (0.,0.) (0.,.675)
 13 17 (0.,0.) (0.,18.75)
 13 0 (1.09,0.) (0.,1.943)
 14 0 (1.09,0.) (0.,1.943)
 43 18 (0.,0.) (0.,2.74)
 43 19 (0.,0.) (0.,2.74)
 42 15 (0.,0.) (0.,.5.)
 42 16 (0.,0.) (0.,.5.)
 19 20 (0.,0.) (0.757,.349)
 0 11 (1.11,0.) (0.,0.808)
 17 0 (0.93,0.) (4.65,79.05)
 20 0 (0.865,.) (60.,85.)

Нумары вузлоўКЗ (цэлыя лікі) і напружанні ў гэтых вузлах, кВ(базісныя напружанні для схемы ў адносных адзінках або напружанне ступені прывядзення для схемы ў іменаваных адзінках (камплексныя лікі):

9 (340.,0.) 19 (10.5,0.)

Інфармацыя аб галінах схемы НП (задаецца, калі прызнак наяўнасці схемы НП быў зададзены роўным 1). Для кожнай галіны ўводзяцца: нумар першага канца, нумар другога канца (цэлыя лікі), супраціўленне НП галіны ў адносных або іменаваных адзінках (камплексныя лікі):

1 4 (0.,0.265)
 2 4 (0.,0.265)
 3 4 (0.,0.265)
 4 5 (0.,0.762)
 5 40 (0.,0.84)
 40 6 (0.,1.96)
 40 7 (0.,-0.04)
 7 8 (0.,4.356)

7 10 (0.,4.356)
 10 45 (0.,1.452)
 10 45 (0.,1.452)
 45 8 (0.,4.84)
 8 46 (0.,0.6)
 4 44 (0.,0.9)
 44 9 (0.,0.45)
 44 9 (0.,0.45)
 9 11 (0.,0.44)
 9 41 (0.,0.84)
 41 12 (0.,1.96)
 41 10 (0.,-0.04)
 10 13 (0.,2.75)
 10 14 (0.,2.75)

Нумары вузлоў схемы НП, якія маюць нулявы патэнцыял (задаюцца, калі прызнак наяўнасці схемы НП быў зададзены роўным 1) (цэлыя лікі):

1 2 3 6 46 14 13 12 11

Файл рэзультатаў разліку

Ніжэй прыведзены файл РР з назвай rpk1.REZ, сфармаваны праграмай ТК315. У вузле 19 разлічаны токі для ўсіх відаў КЗ, а ў вузле 9 – толькі для міжфазных КЗ.

Выхадны файл праграмы ТК315

Уваходныя дадзеныя:

Прызнак адзінак вымярэння параметраў схемы замяшчэння (0 – адносныя адзінкі, 1 – іменаваныя адзінкі)

0

Прызнак наяўнасці схемы нулявой паслядоўнасці (0 – адсутнічае, 1 – маецца)

1

Прызнак вываду на друк сіметрычных складовых токаў у галінах (0 – не выводзяцца; 1 – прамая; 2 – адваротная; 3 – нулявая; 12 – прамая і адваротная; 13 – прамая і нулявая; 23 – адваротная і нулявая; 123 – прамая, адваротная і нулявая)

0

Колькасць галін у схеме прамай паслядоўнасці

38

Колькасць вузлоў кароткага замыкання

2

Колькасць галін у схеме нулявой паслядоўнасці

22

Колькасць вузлоў у схеме нулявой паслядоўнасці, якія маюць нулявы патэнцыял

9

Базісная магутнасць, MVA

1000. 0.

Інфармацыя аб галінах схемы прамой паслядоўнасці:

N1K(KH) N2K(KH) e(KH) Z(KH)

адн.адз. адн.адз.

0	1	1.11	0.00	0.0000	0.5520
0	2	1.11	0.00	0.0000	0.5520
0	3	1.11	0.00	0.0000	0.5520
1	4	0.00	0.00	0.0000	0.2650
4	2	0.00	0.00	0.0000	0.2650
4	3	0.00	0.00	0.0000	0.2650
4	5	0.00	0.00	0.0000	0.3810
5	40	0.00	0.00	0.0000	0.8400
40	6	0.00	0.00	0.0000	1.9600
40	7	0.00	0.00	0.0000	-0.0400
6	0	1.22	0.00	0.0000	6.8800
4	9	0.00	0.00	0.0000	2.4200
4	9	0.00	0.00	0.0000	2.4200
7	8	0.00	0.00	0.0000	1.8150
7	10	0.00	0.00	0.0000	1.8150
8	10	0.00	0.00	0.0000	2.4200
8	10	0.00	0.00	0.0000	2.4200
8	0	1.00	0.00	0.0000	0.5000
9	11	0.00	0.00	0.0000	0.4400
9	41	0.00	0.00	0.0000	0.8400
10	13	0.00	0.00	0.0000	2.7500
10	14	0.00	0.00	0.0000	2.7500
41	10	0.00	0.00	0.0000	-0.0400
13	14	0.00	0.00	0.0000	3.1750
41	12	0.00	0.00	0.0000	1.9600
14	43	0.00	0.00	0.0000	-0.9250
12	42	0.00	0.00	0.0000	0.6750
13	17	0.00	0.00	0.0000	18.7500
13	0	1.09	0.00	0.0000	1.9430
14	0	1.09	0.00	0.0000	1.9430

43	18	0.00	0.00	0.0000	2.7400
43	19	0.00	0.00	0.0000	2.7400
42	15	0.00	0.00	0.0000	5.0000
42	16	0.00	0.00	0.0000	5.0000
19	20	0.00	0.00	0.7570	0.3490
0	11	1.11	0.00	0.0000	0.8080
17	0	0.93	0.00	4.6500	79.0500
20	0	0.87	0.00	60.0000	85.0000

Інфармацыя аб вузлах кароткага замыкання:

NWKZ(KWKZ) UB(KWKZ)

кВ

9	340.0	0.0
19	10.5	0.0

Інфармацыя аб галінах схемы нулявой паслядоўнасці:

N1KSNP(KH SNP) N2KSNP(KH SNP) ZSNP(KH SNP)

адн.адз.

1	4	0.0000	0.2650
2	4	0.0000	0.2650
3	4	0.0000	0.2650
4	5	0.0000	0.7620
5	40	0.0000	0.8400
40	6	0.0000	1.9600
40	7	0.0000	-0.0400
7	8	0.0000	4.3560
7	10	0.0000	4.3560
10	45	0.0000	1.4520
10	45	0.0000	1.4520
45	8	0.0000	4.8400
8	46	0.0000	0.6000
4	44	0.0000	0.9000
44	9	0.0000	0.4500
44	9	0.0000	0.4500
9	11	0.0000	0.4400
9	41	0.0000	0.8400
41	12	0.0000	1.9600
41	10	0.0000	-0.0400
10	13	0.0000	2.7500
10	14	0.0000	2.7500

Вузлысхемынулявойпаслядоўнасці,
NWSNP NP(KWSNP NP)

1 2 3 6 46 14 13 12 11

якіямаюцьнулявыпатэнцыял:

Результатыразліку:

Нумар вузла КЗ:	9
Базіснае напружанне вузла КЗ, кВ:	(340.00000, 0.0000000)
Базісны ток, кА:	(1.6980890, 0.0000000)
Вынікоўнае супраціўленне схемы адносна вузла КЗ(адносныя адзінкі):	
– для токаў прамой (адваротнай) паслядоўнасці	(5.63211870E-05, 0.47811520)
– для токаў нулявой паслядоўнасці	(-0.0000000, 0.26437423)
Токі КЗ у вузле для розных відаў КЗ (кА):	
– трохфазнае КЗ	0.000 -3.878
– двухфазнае КЗ	0.000 -3.358
– аднафазнае КЗ	-0.000 -4.557
– двухфазнае КЗ на зямлю	-0.000 -4.348
Сіметрычныя складовыя току ў вузле КЗ (кА): паслядоўнасці	
току:	прамая адваротна я нулявая
– трохфазнае КЗ	0.00 - 0 3.878
– двухфазнае КЗ	0.00 - 0.00 - 0 1.939 0 1.939
– аднафазнае КЗ	- 0.00 1.519 0.00 1.519 0.00 1.51 0 0 9
– двухфазнае КЗ на зямлю	- 0.00 2.860 0 1.018 0.00 1.84 0 0 1
Нумар вузла КЗ:	19
Базіснае напружанне вузла КЗ, кВ:	(10.500000, 0.0000000)
Базісны ток, кА:	(54.985741, 0.0000000)
Вынікоўнае супраціўленне схемы адносна вузла КЗ (адносныя адзінкі):	
– для токаў прамой (адваротнай) паслядоўнасці	(4.16436940E-02, 2.7409172)
Токі КЗ у вузле для розных відаў КЗ (кА):	

– трохфазнае КЗ	0.263	–21.624		
– двухфазнае КЗ	0.228	–18.727		
Сіметрычныя складовыя току ў вузле КЗ (кА):				
паслядоўнасці току:				
	прамая	адваротна	нуляв	
		я	ая	
– трохфазнае КЗ	0.26	–		
	3	21.624		
– двухфазнае КЗ	0.13	–	0.13	–10.812
	2	10.812	2	

Змест і парадак выканання лабараторнай работы

1. Прааналізуйце тапалогію схем замяшчэння ПП і НП у прыкладзе 1 і формулы для разліку параметраў гэтых схем.

2. Унясіце ў разліковую схему электрасістэмы на мал. 7.1 змены ў адпаведнасці з зададзеным для вашай брыгады варыянтам, прыведзеным ў табл. 7.2.

3. Пабудуйце схемы замяшчэння ПП і НП для зададзенага варыянта, абазначце ў гэтых схемах новыя вузлы і элементы новых галін.

4. Стварыце ў памяці ЭВМ свой рабочы каталог і перапішыце туды інфармацыю з каталога праграмы ТК315. Працуйце ў вашым каталозе. Не змяняйце інфармацыю ў каталозе праграмы ТК315. Дайце сваю назву файлу prk1.dat.

Табліца 7.2

Варыянт	Змены ў схеме на мал. 7.1
1	Уключыце паралельна з аўтатрансфарматарам T_6 яшчэ адзін такі ж аўтатрансфарматар без нагрузкі на баку 35 кВ
2	Падключыце на шыны 330 кВ ЦЭЦ 320 МВт яшчэ адзін блок, падобны блоку G_5 , T_5
3	Падключыце на другую секцыю шын 10 кВ ЦЭЦ 320 МВт (вузел 14) рабочы трансфарматар уласных патрэб, аналагічны трансфарматару T_{10} на першай секцыі (вузел 13)

5. Загрузіце ў аператыўную памяць ЭВМ транслятар Force 2.0. Загрузіце з вашага каталога ў рабочую вобласць транслятара Force 2.0 тэкст праграмы

ТК315 з назвай ТК315.F і ваш файл УД. Занясіце змены ў файл УД у адпаведнасці з зададзеным варыянтам.

6. Выканайце кампіляцыю праграмы ТК315, выканайце разлік тока КЗ для вашага варыянта. Прачытайце з вашага каталога файл РР і выканайце яго аналіз.

7. Для засваення навыкаў работы з праграмай сфармуіце новыя файлы УД, у якіх:

- адсутнічае схема замяшчэння НП;
- зададзены другія вузлы КЗ;
- зададзены разлік сіметрычных складовых токаў КЗ у галінах схемы.

Выканайце разлік токаў КЗ для новых файлаў УД. Прааналізуйце атрыманыя файлы рэзультатаў.

Змест справаздачы аб рабоце

Зыходная разліковая схема для вашага варыянта, схемы замяшчэння ПП і НП, файлы УД і РР.

Кантрольныя пытанні

1. Прызначэнне і магчымасці праграмы ТК315.
2. Які алгарытм пакладзены ў аснову праграмы ТК315?
3. Якая зыходная інфармацыя павінна быць зададзена для разліку токаў КЗ?
4. Правілы пабудовы схем замяшчэння ПП і НП.
5. Якімі параметрамі ўводзяцца элементы разліковай схемы ў схемы замяшчэння ПП і НП?
6. Якая інфармацыя павінна быць зададзена ва ўваходным файле для праграмы ТК315? Якая інфармацыя выдаецца праграмай ТК315 у файле РР?

Бібліяграфічны спіс

1. Ульянов, С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах/ С. А. Ульянов. – М.: Энергия, 1970. – 520 с.
2. Свита, Л. Н. Тексты лекций по курсу «Переходные процессы в электрических системах» для студентов электротехнических специальностей/ Л. Н. Свита, С. М. Силук. – Ч. 1. – Минск: БПИ, 1989. – 65 с.
3. Рожкова, Л. Д. Электрооборудование станций и подстанций/Л. Д. Рожкова, В. С. Козулин. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.
4. Лабораторные работы (практикум) по дисциплине «Переходные процессы в электрических системах» для студентов специальностей 10.01, 10.02, 10.04: в 2 ч. / сост. : В. А. Булат[и др.]– Ч. 1. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. – Минск: БПИ, 1990. – 58 с.
5. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ:ГОСТ 27514-87. – Введ. 01.01.1989. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 40 с.
6. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования:РД 153-34.0-20.527-98 / под ред. Б. Н. Неклепаева. – Утв. 23.03.1998. – М.:Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. – 152 с.
7. Руководящие указания по релейной защите. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110–750 кВ. – Вып. 11. – М.: Энергия, 1979. – 152 с.

2.3. Сборник задач по дисциплинам «Электромагнитные переходные процессы» и «Переходные процессы в электроэнергетических системах»

Введение

Правильно организованные упражнения по дисциплинам «Электромагнитные переходные процессы» и «Переходные процессы в электроэнергетических системах» повышают понимание студентами вопросов теории и расчета, а также качество проработки теоретического и расчетного материала и их усвоение.

Весь материал сборника задач соответствует программе дисциплин для специальностей 1-43 01 01, 1-43 01 02, 1-43 01 03, 1-53 01 04 и состоит из 5 глав, содержащих задачи с достаточно подробными решениями и задачи без решений и ответов.

Основная литература, приведенная в конце сборника, может служить источником сведений, необходимых при решении задач.

1. Составление схем замещения и их преобразование

1.1. Параметры элементов электрических систем

Параметры элементов электрических систем могут быть заданы в именованных числах, процентах или относительными величинами. Относительной величиной считают отношение данной величины к одноименной, принятой за основную (базисную); процентной – отношение данной величины в процентах к одноименной основной:

$$A_{*б} = \frac{A}{A_б} \quad (1)$$

$$A_{б\%} = \frac{A}{A_б} \cdot 100\% \quad (2)$$

Обозначаются эти величины: относительная – звездочкой, которая ставится внизу с правой стороны символа; процентная – знаком %.

Расчетными величинами для вычисления токов КЗ являются: напряжение (ЭДС), мощность, активное, реактивное и полное сопротивления элементов системы.

Если за базисные единицы принять произвольные значения полной мощности и линейного напряжения, то базисный ток и базисные сопротивления будут определены как:

$$I_{\text{б}} = \frac{S_{\text{б}}}{\sqrt{3}U_{\text{б}}} \quad (3)$$

$$I_{\text{б}} = \frac{S_{\text{б}}}{\sqrt{3}U_{\text{б}}} \quad (4)$$

Относительные значения параметров при принятых базисных условиях будут определяться:

$$E_{*\text{б}} = \frac{E}{U_{\text{б}}} \quad (5)$$

$$U_{*\text{б}} = \frac{U}{U_{\text{б}}} \quad (6)$$

$$I_{*\text{б}} = \frac{I}{I_{\text{б}}} \quad (7)$$

$$S_{*\text{б}} = \frac{S}{S_{\text{б}}} \quad (8)$$

$$Z_{*\text{б}} = \frac{Z}{Z_{\text{б}}} = Z \cdot \frac{\sqrt{3}I_{\text{б}}}{U_{\text{б}}} = Z \cdot \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{б}}^2} \quad (9)$$

Если параметры элементов расчетной схемы заданы в относительных единицах, приведенных к номинальным условиям, т. е. к номинальной мощности, номинальному напряжению и номинальному току, а их нужно выразить в долях от базисной величины, то необходимо сделать следующий пересчет:

$$E_{*\text{б}} = E_{*\text{н}} \cdot \frac{U_{\text{н}}}{U_{\text{б}}} \quad (10)$$

$$Z_{*\text{б}} = Z_{*\text{н}} \cdot \frac{I_{\text{б}}}{I_{\text{н}}} \cdot \frac{U_{\text{н}}}{U_{\text{б}}} = Z_{*\text{н}} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{н}}} \cdot \frac{U_{\text{н}}^2}{U_{\text{б}}^2} \quad (11)$$

$$U_{*\text{б}} = U_{*\text{н}} \cdot \frac{U_{\text{н}}}{U_{\text{б}}} \quad (12)$$

$$I_{*\text{б}} = I_{*\text{н}} \cdot \frac{I_{\text{н}}}{I_{\text{б}}} \quad (13)$$

За базисную мощность целесообразно принимать число, кратное 10 МВА (100 МВА, 1000 МВА и т.д.), а иногда – часто повторяющуюся в исходной схеме номинальную мощность (или кратную ей). За базисное напряжение рекомендуется принимать номинальное напряжение одного из элементов схемы $U_{\text{н}}$.

Зная значения величин в относительных единицах, легко найти их значения в именованных единицах.

$$U = U_{*6} \cdot U_6 \quad (14)$$

$$I = I_{*6} \cdot I_6 \quad (15)$$

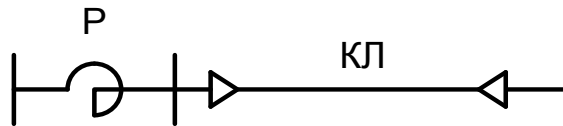
$$z = z_{*6} \cdot z_6 = z_{*6} \cdot \frac{U_6^2}{S_6} \quad (16)$$

$$U = U_{*H} \cdot U_H \quad (17)$$

$$I = I_{*H} \cdot I_H \quad (18)$$

$$z = z_{*H} \cdot z_H = z_{*H} \cdot \frac{U_H^2}{S_H} \quad (19)$$

Задача 1.1. Электрическая цепь состоит из последовательно соединенных реактора и кабельной линии длиной 2 км.



$$\begin{aligned} \text{Р: } x_{\text{P}} &= 0,45 \text{ Ом}, \quad I_{\text{H}} = 1000 \text{ А}, \quad U_{\text{H}} = 10 \text{ кВ}; \\ \text{КЛ: } l &= 2 \text{ км}, \quad x_0 = 0,080 \text{ Ом/км}. \end{aligned}$$

Определить индуктивное сопротивление элементов цепи в относительных единицах при номинальных условиях реактора.

Решение:

Принимаем $U_6 = U_{\text{H}} = 10 \text{ кВ}$; $I_6 = I_{\text{H}} = 1 \text{ кА}$, тогда

$$x_6 = \frac{U_6}{\sqrt{3} I_6} = \frac{10}{\sqrt{3} \cdot 1} = 5,7735 \text{ Ом}.$$

Сопротивление реактора в относительных единицах при принятых условиях:

$$x_{*1} = x_{*P6} = \frac{x_{\text{P}}}{x_6} = \frac{0,45}{5,7735} = 0,07794,$$

Кабельной линии:

$$x_{*2} = x_{*КЛ6} = \frac{x_{\text{КЛ}}}{x_6} = \frac{x_0 \cdot l}{x_6} = \frac{0,08 \cdot 2}{5,7735} = 0,0277.$$

Задача 1.2. Мощность генератора $P_{\text{H}} = 25 \text{ МВт}$; $\cos \varphi = 0,8$; $U_{\text{H}} = 10,5 \text{ кВ}$, $x_* = 0,2$ (отнесено к номинальным условиям). Найти сопротивление генератора в Омах.

Решение:

$$x_{\text{Г}} = x_* \cdot \frac{U_{\text{H}}^2}{S_{\text{H}}} = 0,2 \cdot \frac{10,5^2 \cdot 0,8}{25} = 0,710 \text{ Ом}.$$

Задача 1.3. Реактивное сопротивление воздушной линии равно 0,4 Ом/км, длина линии $l=160$ км, напряжение 115 кВ. Определить сопротивление линии в относительных единицах, приведенное к мощности $S=200$ МВА.

Решение:

$$x_* = x \cdot \frac{S}{U_H^2} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S}{U_H^2} = 0,4 \cdot 160 \cdot \frac{200}{115^2} = 0,97.$$

Задача 1.4. Мощность силового трансформатора $S_H = 5,6$ МВА, $U_K \% = 7,5$ %. Потери активной мощности при номинальном режиме $\Delta P_H = 75,5$ кВт. Коэффициент трансформации $n_T=38/6,3$. Найти реактивное сопротивление трансформатора в Омах, приведенное к напряжению 38 и 6,3 кВ соответственно.

Решение:

Полное сопротивление трансформатора в относительных единицах при номинальных условиях равно:

$$z_* = U_{K*} = 0,075$$

Значение активного сопротивления в относительных единицах будет:

$$r_* = \frac{r}{r_H},$$

где

$$r = \frac{\Delta P_H}{3 \cdot I_H^2}, \quad ar_H = \frac{U_H}{\sqrt{3} \cdot I_H}.$$

Тогда:

$$r_* = \frac{\Delta P_H}{S_H} = \frac{75,5 \cdot 10^{-3}}{5,6} = 0,0135,$$

$$x_* = \sqrt{z_*^2 - r_*^2} = \sqrt{0,075^2 - 0,0135^2} = 0,074.$$

Это же сопротивление, приведенное к $U=38$ кВ в Омах будет равно:

$$x = x_* \cdot \frac{U^2}{S_H} = 0,074 \cdot \frac{38^2}{5,6} = 19,080 \text{ м},$$

приведенное к $U=6,3$ кВ:

$$x = 0,074 \cdot \frac{6,3^2}{5,6} = 0,5250 \text{ м}.$$

Результаты подсчета показывают, что если пренебречь активным сопротивлением трансформатора при определении тока КЗ, то погрешность будет незначительной.

Задача 1.5. Определить, в каком соотношении находятся выраженные в Омах индуктивные сопротивления генераторов G1 и G2 одинаковой мощности, но с номинальными напряжениями соответственно 6,3 и 10,5 кВ,

если их относительные индуктивные сопротивления при своих номинальных условиях одинаковы.

Решение:

$$S_1 = S_2 = S_H; \quad x_{*1} = x_{*2} = x_*.$$

Определяем индуктивные сопротивления генераторов G1 и G2, выраженные в Омах:

$$x_1 = x_* \cdot \frac{U_{H1}^2}{S_H};$$

$$x_2 = x_* \cdot \frac{U_{H2}^2}{S_H}.$$

Соотношение этих сопротивлений будет:

$$\frac{x_1}{x_2} = \frac{U_{H1}^2}{U_{H2}^2} = \frac{6,3^2}{10,5^2} = 0,36.$$

Задача 1.6. Емкостная проводимость кабельной линии равна $b_0 = 0,1 \cdot 10^{-3}$ 1/Ом·км, индуктивное сопротивление кабеля 0,08 Ом/км. Длина линии $l = 3$ км.

Найти емкостную проводимость и индуктивное сопротивление линии в относительных единицах при $S = 10$ МВА и напряжении 6 кВ.

Решение:

$$x_* = x_0 \cdot l \cdot \frac{S}{U^2} = 0,08 \cdot 3 \cdot \frac{10}{6^2} = 0,0665,$$

$$b_* = b \cdot \frac{U^2}{S} = b_0 \cdot l \cdot \frac{U^2}{S} = 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot \frac{6^2}{10} = 0,00108.$$

При расчете токов КЗ емкостную проводимость можно не учитывать, т.к. она во много раз меньше индуктивной.

1.2. Переход от магнитных связей к эквивалентным электрическим

Современные электроэнергетические системы включают в себя большое количество электрических станций, трансформаторных под-станций, линий электропередач различного напряжения. Для расчетов токов КЗ по исходной схеме электрической цепи составляют ее схему замещения. При составлении схемы замещения необходимо магнитные (трансформаторные) связи заменить эквивалентными электрическими путем приведения параметров всех элементов различных ступеней напряжения к одной ступени, принятой за основную или базисную.

Если между ступенью напряжения, на которой находятся элементы с подлежащими приведению ЭДС (напряжениями), токами, сопротивлениями и

ступенью, принятой за основную (базисную), имеется m трансформаторов, то искомые значения этих величин, приведенные к основной (базисной) ступени напряжения, вычисляют как:

$$\dot{E} = E \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot \dots \cdot n_m; \quad (20)$$

$$\dot{U} = U \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot \dots \cdot n_m; \quad (21)$$

$$\dot{I} = \frac{I}{n_1 \cdot n_2 \cdot \dots \cdot n_m}; \quad (22)$$

$$\dot{z} = z \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot \dots \cdot n_m; \quad (23)$$

Где E , U , I , z – истинные значения величин; n_1, n_2, \dots, n_m – фактические коэффициенты трансформации, точка над буквой указывает на то, что данная величина является приведенной.

В тех случаях, когда фактические (точные) коэффициенты трансформации трансформаторов и автотрансформаторов отсутствуют, приведение ЭДС и параметров элементов исходной схемы к одной ступени напряжения выполняют по средним коэффициентам трансформации, т.е. принимая коэффициент трансформации каждого трансформатора и автотрансформатора равным отношению так называемых средних номинальных напряжений сетей, связанных этим трансформатором или автотрансформатором.

Для каждой ступени напряжения устанавливают одно среднее номинальное напряжение, выбирая из принятого в нашей стране ряда средних номинальных напряжений: 3,15; 6,3; 10,5; 13,8; 15,75; 18; 20; 24; 37; 115; 230; 340; 515; 770 кВ.

При замене фактических коэффициентов трансформации средними (приближенное приведение) произведение средних коэффициентов трансформации каскадно (последовательно) включенных трансформаторов оказывается равным отношению средних номинальных напряжений основной (базисной) ступени напряжения и ступени напряжения, с которой проводится пересчет, т.е. если за базисную ступень принять ступень с напряжением $U_{срm}$, а приведение осуществляется со ступени $U_{ср1}$, то:

$$\begin{aligned} n_1 \cdot n_2 \cdot \dots \cdot n_m &= \frac{U_{ср2}}{U_{ср1}} \cdot \frac{U_{ср3}}{U_{ср2}} \cdot \dots \cdot \frac{U_{срm}}{U_{срm-1}} = \frac{U_{срm}}{U_{ср1}} \\ &= \frac{U_6}{U_{ср1}} \end{aligned} \quad (24)$$

Если за базисную ступень принять ступень с напряжением U_{cp1} , а приведение осуществляется со ступени с напряжением U_{cpm} , то

$$\begin{aligned} n_1 \cdot n_2 \cdot \dots \cdot n_m &= \frac{U_{cp1}}{U_{cp2}} \cdot \frac{U_{cp2}}{U_{cp3}} \cdot \dots \cdot \frac{U_{cpm-1}}{U_{cpm}} = \frac{U_{cp1}}{U_{cpm}} \\ &= \frac{U_6}{U_{cpm}}. \end{aligned} \quad (25)$$

Таким образом, при составлении схемы замещения с приближенным приведением ЭДС и сопротивлений различных элементов исходной расчетной схемы к одной ступени напряжения и определении этих ЭДС и сопротивлений в именованных единицах расчетные формулы (20) ÷ (23) существенно упрощаются.

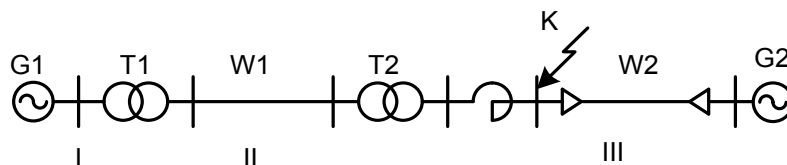
При приближенном приведении ЭДС и параметров различных элементов расчетной схемы к одной ступени напряжения и выражении их в относительных единицах (ЭДС, сопротивления), формулы (9) ÷ (11) примут следующий вид:

$$z_{*6} = z \cdot \frac{S_6}{U_{cpH}^2} \quad (9a)$$

$$E_{*6} = E_{*H} \quad (10a)$$

$$z_{*6} = z_{*H} \cdot \frac{S_6}{S_H} \quad (11a)$$

Задача 1.7. Составить схему замещения для расчетной схемы, приведенной ниже, выразив параметры ее элементов в именованных и относительных единицах. Сделать точное и приближенное приведение параметров.



Исходные данные:

Генератор G1: $P_H = 63 \text{ МВт}$; $\cos\varphi = 0,8$; $U_H = 10,5 \text{ кВ}$;

$x_d'' = 0,17$; $E_1'' = 11 \text{ кВ}$.

Генератор G2: $P_H = 25 \text{ МВт}$; $\cos\varphi = 0,8$; $U_H = 6,3 \text{ кВ}$;

$x_d'' = 0,15$; $E_1'' = 6,6 \text{ кВ}$.

Трансформатор T1: $S_H = 80 \text{ МВА}$, $U_K = 10,5 \%$, $n_1 = 121/10,5$.

Трансформатор T2: $S_H = 40 \text{ МВА}$, $U_K = 10,5 \%$, $n_1 = 115/6,3$.

Воздушная ЛЭП W1: $l = 70\text{км}$, $x_0 = 0,40\text{М/км}$.

Кабельная ЛЭП W2: $l = 4\text{км}$, $x_0 = 0,080\text{М/км}$.

Реактор LR типа РБ-10-1000-0.45.

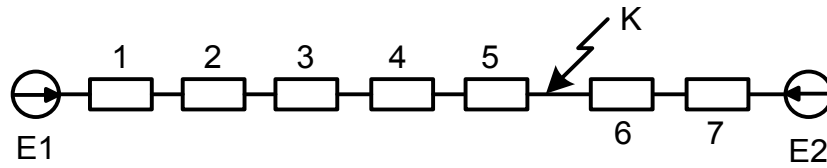


Рис. 1.1 – Схема замещения

Решение:

а) Точное приведение (с учетом фактических коэффициентов трансформации) в именованных единицах.

В качестве основной выбираем ступень, на которой находится точка КЗ

$$x_1 = x_d'' \cdot \frac{U_H^2}{S_H} \cdot n_1^2 \cdot n_2^2 = 0,17 \times$$

$$\times \frac{10,5^2 \cdot 0,8}{63} \cdot \left(\frac{121}{10,5}\right)^2 \cdot \left(\frac{6,3}{115}\right)^2 = 0,0950\text{М},$$

$$x_2 = \frac{U_K\%}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_H} \cdot n_2^2 = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{121^2}{80} \cdot \left(\frac{6,3}{115}\right)^2 = 0,05770\text{М},$$

$$x_3 = x_0 \cdot l \cdot n_2^2 = 0,4 \cdot 70 \cdot \left(\frac{6,3}{115}\right)^2 = 0,0840\text{М},$$

$$x_4 = \frac{U_K\%}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_H} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{6,3}{40} = 0,1040\text{М},$$

$$x_5 = 0,450\text{М},$$

$$x_7 = x_d'' \cdot \frac{U_H^2}{S_H} = 0,15 \cdot \frac{6,3^2 \cdot 0,8}{25} = 0,190\text{М}.$$

Приведенное значение фазной ЭДС генератора:

$$E_{1\phi}' = E_{1\phi}'' \cdot n_1 \cdot n_2 = \frac{11}{\sqrt{3}} \cdot \frac{121}{10,5} \cdot \frac{6,3}{115} = 4,01\text{кВ},$$

$$E_{2\phi} = E_2'' = \frac{6,6}{\sqrt{3}} = 3,815\text{кВ},$$

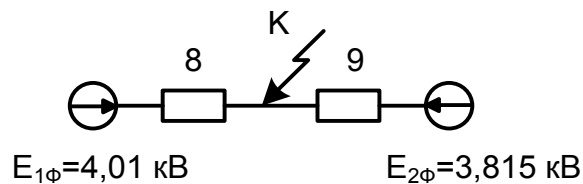


Рис. 1.2 – Результирующая схема замещения

$$x_8 = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 = 0,79070\text{М},$$

$$x_9 = x_6 + x_7 = 0,510\text{М},$$

$$I_{кз} = \frac{E_{1\phi}}{x_8} + \frac{E_{2\phi}}{x_9} = \frac{4,01}{0,7907} + \frac{3,815}{0,51} = 12,55 \text{ кА.}$$

б) точное приведение (с учетом фактических коэффициентов трансформации) в относительных единицах.

Примем за базисную мощность $S_6 = 100 \text{ МВА}$ за базисное напряжение основной ступени $U_{6III} = 6 \text{ кВ}$. Тогда базисные напряжения ступеней II и I будут:

$$U_{6II} = U_{6III} \cdot \frac{1}{n_2} = 6 \cdot \frac{115}{6,3} = 109,52 \text{ кВ,}$$

$$U_{6I} = U_{6II} \cdot \frac{1}{n_1} = 109,52 \cdot \frac{10,5}{121} = 9,5 \text{ кВ,}$$

$$x_1 = x_d'' \cdot \frac{S_6}{S_H} \cdot \frac{U_H^2}{U_{6I}^2} = 0,17 \cdot \frac{100 \cdot 0,8}{63} \cdot \frac{10,5^2}{9,5^2} = 0,264,$$

$$x_2 = \frac{U_{к\%}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H} \cdot \frac{U_H^2}{U_{6II}^2} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{80} \cdot \frac{121^2}{109,52^2} = 0,16,$$

$$x_3 = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{6II}^2} = 0,4 \cdot 70 \cdot \frac{100}{109,52^2} = 0,233,$$

$$x_4 = \frac{U_k \%}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H} \cdot \frac{U_H^2}{U_{6III}^2} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{40} \cdot \frac{6,3^2}{6^2} = 0,289,$$

$$x_5 = x_{LR} \cdot \frac{S_6}{U_{6III}^2} = 0,45 \cdot \frac{100}{6^2} = 1,25,$$

$$x_6 = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{6III}^2} = 0,08 \cdot 4 \cdot \frac{100}{6^2} = 0,89,$$

$$x_7 = x_d'' \cdot \frac{S_6}{S_H} \cdot \frac{U_H^2}{U_{6III}^2} = 0,15 \cdot \frac{100 \cdot 0,8}{25} \cdot \frac{6,3^2}{6^2} = 0,53,$$

$$E_{*1} = \frac{E_1''}{U_{6I}} = \frac{11}{9,5} = 1,158,$$

$$E_{*2} = \frac{E_2''}{U_{6III}} = \frac{6,6}{6} = 1,1,$$

$$x_8 = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 = 2,196,$$

$$x_9 = x_6 + x_7 = 1,42,$$

$$I_{*кз} = \frac{E_{*1}}{x_8} + \frac{E_{*2}}{x_9} = \frac{1,158}{2,196} + \frac{1,1}{1,42} = 1,302,$$

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{6III}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6} = 9,63 \text{ кА,}$$

$$I_{кз} = I_{*кз} \cdot I_6 = 1,302 \cdot 9,63 = 12,54 \text{ кА.}$$

в) Приближенное приведение в именованных единицах.

В этом случае считаем, что напряжения на ступенях равны средним номинальным напряжениям, а поэтому:

$$n_1 = \frac{115}{10,5}, \quad n_2 = \frac{6,3}{115}.$$

Тогда:

$$\begin{aligned} x_1 &= x_d'' \cdot \frac{U_H^2}{S_H} \cdot n_1^2 \cdot n_2^2 = 0,17 \cdot \frac{10,5^2 \cdot 0,8}{63} \times \\ &\times \left(\frac{115}{10,5}\right)^2 \cdot \left(\frac{6,3}{115}\right)^2 = 0,17 \cdot \frac{6,3^2 \cdot 0,8}{63} = 0,086 \text{ Ом}, \\ x_2 &= \frac{U_K \%}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_H} \cdot n_2^2 = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{115^2}{80} \cdot \left(\frac{6,3}{115}\right)^2 = \\ &= \frac{10,5}{100} \cdot \frac{6,3^2}{80} = 0,052 \text{ Ом}, \\ x_3 &= x_0 \cdot l \cdot n_2^2 = 0,4 \cdot 70 \cdot \left(\frac{6,3}{115}\right)^2 = 0,078 \text{ Ом}, \\ x_4 &= \frac{U_K \%}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_H} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{6,3^2}{40} = 0,104 \text{ Ом}, \\ x_5 &= 0,45 \text{ Ом}, \\ x_6 &= x_0 \cdot l = 0,08 \cdot 4 = 0,32 \text{ Ом}, \\ x_7 &= x_d'' \cdot \frac{U_H^2}{S_H} = 0,15 \cdot \frac{6,3^2 \cdot 0,8}{25} = 0,176 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Приведенное значение фазной ЭДС генератора:

$$\begin{aligned} E_{1\phi} &= E_{1\phi}'' \cdot n_1 \cdot n_2 = \frac{11}{\sqrt{3}} \cdot \frac{115}{10,5} \cdot \frac{6,3}{115} = \frac{11}{\sqrt{3}} \cdot \frac{6,3}{10,5} = 3,82 \text{ кВ}, \\ E_{2\phi} &= E_{2\phi}'' = \frac{6,6}{\sqrt{3}} = 3,815 \text{ кВ}, \\ x_8 &= x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 = 0,770 \text{ Ом}, \\ x_9 &= x_6 + x_7 = 0,496 \text{ Ом}, \\ I_{кз} &= \frac{E_{1\phi}}{x_8} + \frac{E_{2\phi}}{x_9} = \frac{3,82}{0,77} + \frac{3,815}{0,496} = 12,65 \text{ кА}. \end{aligned}$$

г) Приближенное приведение в относительных единицах.

Базисные напряжения на ступенях при приближенном приведении принимаются равными средним номинальным напряжениям:

$$\begin{aligned} U_{бI} &= U_{срI} = 10,5 \text{ кВ}, \\ U_{бII} &= U_{срII} = 115 \text{ кВ}, \\ U_{бIII} &= U_{срIII} = 6,3 \text{ кВ}. \end{aligned}$$

Определим значения сопротивлений элементов схемы замещения и ЭДС генераторов по формулам (9а ÷ 11а):

$$\begin{aligned}
 x_1 &= x_d'' \cdot \frac{S_6}{S_H} = 0,17 \cdot \frac{100 \cdot 0,8}{63} = 0,216, \\
 x_2 &= \frac{U_{к\%}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{80} = 0,131, \\
 x_3 &= x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{6II}^2} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{cpII}^2} = 0,4 \cdot 70 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,212, \\
 x_4 &= \frac{U_{к\%}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{40} = 0,263, \\
 x_5 &= x_{(OM)} \cdot \frac{S_6}{U_{6III}^2} = x_{(OM)} \cdot \frac{S_6}{U_{cpIII}^2} = 0,45 \cdot \frac{100}{6,3^2} = 1,226, \\
 x_6 &= x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{6III}^2} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{cpIII}^2} = 0,08 \cdot 4 \cdot \frac{100}{6,3^2} = 0,872, \\
 x_7 &= x_d'' \cdot \frac{S_6}{S_H} = 0,15 \cdot \frac{100 \cdot 0,8}{25} = 0,48, \\
 E_{*1} &= \frac{E_1''}{U_{6I}} = \frac{E_1''}{U_{cpI}} = \frac{11}{10,5} = 1,048, \\
 E_{*2} &= \frac{E_2''}{U_{6III}} = \frac{E_2''}{U_{cpIII}} = \frac{6,6}{6,3} = 1,048, \\
 x_8 &= x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 = 2,048, \\
 x_9 &= x_6 + x_7 = 1,352, \\
 I_{*кз} &= \frac{E_{*1}}{x_8} + \frac{E_{*2}}{x_9} = \frac{1,048}{2,048} + \frac{1,048}{1,352} = 1,287, \\
 I_{кз} &= I_{*кз} \cdot I_6 = 1,287 \cdot 9,175 = 11,8 \text{ кА},
 \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
 I_6 &= \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{6III}} = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{cpIII}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6,3} \\
 &= 9,175 \text{ кА}.
 \end{aligned}$$

1.3 Преобразование схем замещения

Для расчета тока КЗ схему замещения упрощают, используя известные методы преобразования схем до элементарного вида, т.е. до схемы, состоящей из результирующей эквивалентной ЭДС и эквивалентного результирующего сопротивления относительно точки КЗ (рис. 1.3), после чего ток в точке КЗ определяют, используя закон Ома.

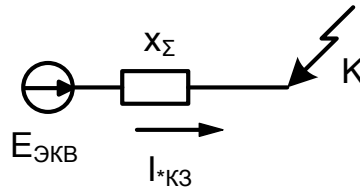


Рис. 1.3 – Результирующая схема замещения

$$I_{*кз} = \frac{E_{\text{ЭКВ}}}{x_{\Sigma}},$$

В процессе преобразования схемы производят последовательное и параллельное сложение сопротивлений, замену треугольника сопротивлений звездой и наоборот, замену нескольких источников одним эквивалентным источником с эквивалентной ЭДС $E_{\text{ЭКВ}}$ и эквивалентным сопротивлением $x_{\text{ЭКВ}}$.

Если расчетная точка КЗ находится в узле с несколькими сходящимися в нем ветвями, этот узел можно разрезать, сохранив на конце каждой ветви такое же КЗ (рис. 1.4).

Далее полученную схему можно преобразовать относительно любой точки КЗ, учитывая другие ветви с КЗ как обычные ветви с ЭДС, равными нулю.

Довольно часто встречается симметрия схемы замещения относительно точки КЗ. В этом случае при нахождении результирующего эквивалентного сопротивления можно наложить одну часть исходной схемы на другую относительно оси симметрии.

В процессе расчета токов КЗ часто приходится учитывать индивидуальные свойства источников питания. В этом случае в процессе преобразования схемы приходится пользоваться методом коэффициентов токораспределения.

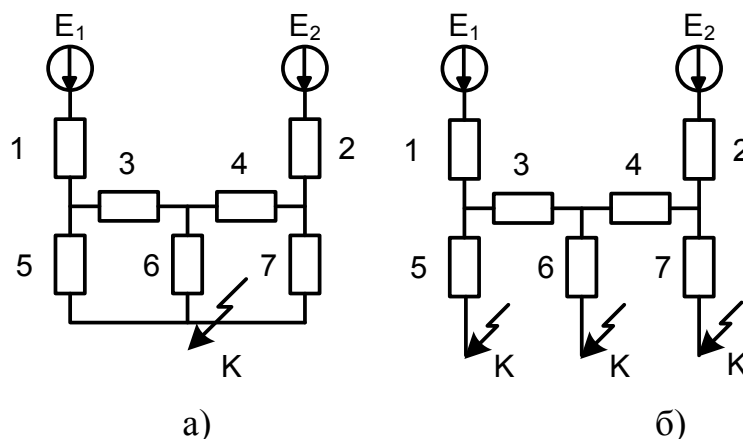


Рис. 1.4 – Пример преобразования схемы:
а) исходная схема; б) схема после рассечения узла

Применение тех или иных методов в процессе преобразования схем показано ниже при решении задач.

2. Расчет начального и установившегося токов короткого замыкания

Переходный процесс при коротком замыкании состоит из трех режимов – сверхпереходного, переходного и установившегося. Активные элементы (генераторы, нагрузки) на каждой из стадий переходного процесса учитываются своими ЭДС и сопротивлениями (таблица 1)

Таблица 1

Элементы схемы	Стадии переходного процесса		
	Сверхпереходной режим	Переходный режим	Установившийся режим
Генераторы	E''_* x''_d	E'_* x'_d	E_{*q} x_d
Синхронные двигатели	$E''_{*дв}$ x''_d	$E'_{*дв}$ x'_d	$E_{*дв}$ x_d
Обобщенная мелкомоторная нагрузка	$E''_{*н} = 0,85$ $x''_{*н} = 0,35$	$E_{*н} = 0, x_{*н} = 1,2$	
Крупные асинхронные двигатели $R_n > 200$	$E''_{*дв}$ $x''_{*дв}$		

Для определения ЭДС генератора пользуются формулами:

$$E''_* = \sqrt{(U_* \cdot \cos\varphi)^2 + (U_* \cdot \sin\varphi + I_{*н} \cdot x''_d)^2},$$

$$E'_* = \sqrt{(U_* \cdot \cos\varphi)^2 + (U_* \cdot \sin\varphi + I_{*н} \cdot x'_d)^2},$$

$$E_{*q} = \sqrt{(U_* \cdot \cos\varphi)^2 + (U_* \cdot \sin\varphi + I_{*н} \cdot x_d)^2},$$

где U_* , $I_{*н}$ – соответственно напряжение на выводах машины и ток статора в момент, предшествующий КЗ, в относительных единицах при номинальных условиях.

φ – угол сдвига фаз тока и напряжения в момент, предшествующий КЗ.

Иногда можно пользоваться более простыми формулами для определения ЭДС.

$$E''_* = U_* + I_{*н} \cdot x''_d \cdot \sin\varphi,$$

$$E'_* = U_* + I_{*н} \cdot x'_d \cdot \sin\varphi,$$

$$E_{*q} = I_{*f} \text{ или } E_{*q} = c \cdot I_{*f}$$

$$x_d = \frac{1}{K_c} \quad \text{или} \quad x_d = \frac{C}{K_c}$$

где I_{*f} – ток возбуждения синхронной машины (СМ) до КЗ;

$C = 1,05 \div 1,2$ – относительное значение ЭДС ненасыщенной СМ при $I_{*f} = 1$;

K_c – отношение короткого замыкания.

Синхронные двигатели, работающие в режиме перевозбуждения, учитываются аналогично синхронным генераторам равновеликой мощности.

ЭДС синхронного электродвигателя при его работе с недовозбуждением может быть определена в зависимости от рассматриваемой стадии переходного процесса по формулам:

$$E''_{*дв} = \sqrt{(U_* \cdot \cos\varphi)^2 + (U_* \cdot \sin\varphi - I_{*н} \cdot x''_d)^2},$$

$$E'_{*дв} = \sqrt{(U_* \cdot \cos\varphi)^2 + (U_* \cdot \sin\varphi - I_{*н} \cdot x'_d)^2},$$

$$E_{*дв} = \sqrt{(U_* \cdot \cos\varphi)^2 + (U_* \cdot \sin\varphi - I_{*н} \cdot x_d)^2},$$

или

$$E''_{*дв} = U_* - I_{*н} \cdot x''_d \cdot \sin\varphi,$$

$$E'_{*дв} = U_* - I_{*н} \cdot x'_d \cdot \sin\varphi.$$

Асинхронные электродвигатели в нормальном режиме работают с малым скольжением, порядка $1,5 \div 3 \%$, поэтому в момент КЗ этим скольжением можно пренебречь и рассматривать их как синхронные двигатели, работающие с недовозбуждением, т.е. их сверхпереходную ЭДС определяют как:

$$E''_{*дв} = U_* - I_{*н} \cdot x''_{дв} \cdot \sin\varphi,$$

$$x''_{дв} = \frac{1}{I_{*п}},$$

где $I_{*п}$ – кратность пускового тока электродвигателя.

Максимально возможное мгновенное значение полного тока короткого замыкания называют ударным током $i_{уд}$. Он наступает через полпериода с момента возникновения короткого замыкания, т.е. через 0,01 с.

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot k_y \cdot I'',$$

где k_y – ударный коэффициент;

I'' – начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ.

Ударный коэффициент определяется по формуле:

$$k_y = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_a}}$$

где T_a – постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ.

Существует несколько способов определения эквивалентной постоянной времени затухания T_a . Наиболее простой – при котором используется выражение

$$T_{a \text{ экв}} = \frac{x_{*экв}(R=0)}{\omega \cdot R_{*экв}(x=0)}$$

где $x_{*экв}(R=0)$ и $R_{*экв}(x=0)$ – эквивалентные сопротивления схемы замещения при учете в ней различных элементов исходной расчетной схемы только индуктивными сопротивлениями и только активными сопротивлениями.

Если точка КЗ делит схему на несколько радиальных независимых частей, то ударный ток можно считать как сумму ударных токов от этих частей.

При отсутствии необходимых данных для оценки величины отношения x/R у отдельных элементов электроэнергетической системы в практических расчетах можно рекомендовать следующие значения k_y : при КЗ на шинах генератора и СД $k_y = 1,9$, в остальных случаях $k_y = 1,8$; для крупных АД $k_y = 1,4 \div 1,6$; для обобщенной мелкомоторной нагрузки $k_y = 1$.

Установившаяся стадия переходного процесса наступает когда все возникшие в начальный момент КЗ свободные токи затухли и полностью закончен подъем тока возбуждения под действием АРВ. Этот режим является весьма условным и при принимаемых допущениях возможен, главным образом, при изолированной работе генератора на внешнюю сеть.

При расчетах необходимо знать состояние АРВ. Если АРВ отключено, то установившийся ток можно определить как

$$I_{*\infty}^{(3)} = \frac{E_{*q}}{(x_d + x_{*вн})}$$

АРВ, стремясь поддержать напряжение на выводах генератора равным номинальному, изменяет ток возбуждения и в пределе может его увеличить до $I_{*f \text{ пред}}$. Это зависит от соотношения внешнего $x_{*вн}$ и так называемого критического $x_{*кр}$ сопротивлений.

Если $x_{*вн} < x_{*кр}$, то наступает режим предельного возбуждения, при котором

$$U_* < U_{*ном}; I_{*f} = I_{*f \text{ пред}},$$

если $x_{*вн} > x_{*кр}$ – режим нормального напряжения, при котором

$$U_* = U_{*ном}; I_{*f} < I_{*f \text{ пред}}.$$

Критическое сопротивление, зависящее только от параметров генератора, определяется как

$$x_{*кр} = x_d \cdot \frac{1}{I_{*f \text{ пред}} - 1}.$$

Под $x_{*вн}$ понимают суммарное сопротивление всех элементов сети от шин генератора до точки КЗ.

Задача 2.1 Определить $I''^{(3)}$, $I'^{(3)}$, $I_{\infty}^{(3)}$, $i_y^{(3)}$ при КЗ в точке К схемы, представленной на рис. 2.1.

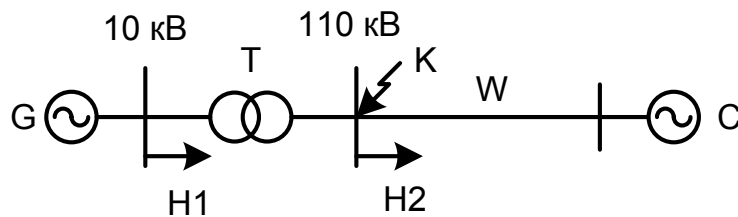


Рис. 2.1 – Расчетная схема сети

Параметры элементов схемы:

Система С: $S_H = 4000$ МВА; $x_{*c} = 1,2$;

Линия W: $l = 75$ км; $x_0 = 0,38$ Ом/км;

Трансформатор Т: $S_H = 125$ МВА; $U_K = 10$ %;

Генератор G: $P_H = 100$ МВт; $\cos\varphi = 0,8$; $I_{*H} = 0,8$; $x_d'' = 0,12$;

$x_d' = 0,15$; $K_c = 0,7$; $I_{f \text{ пр}} = 4$;

Нагрузки Н1 и Н2: $S_H = 25$ МВА.

1. Расчет сверхпереходного режима трехфазного КЗ.

Решение: Составим схему замещения (рис. 2.2). Сопротивления элементов схемы замещения определяем в относительных единицах, используя приближенное приведение.

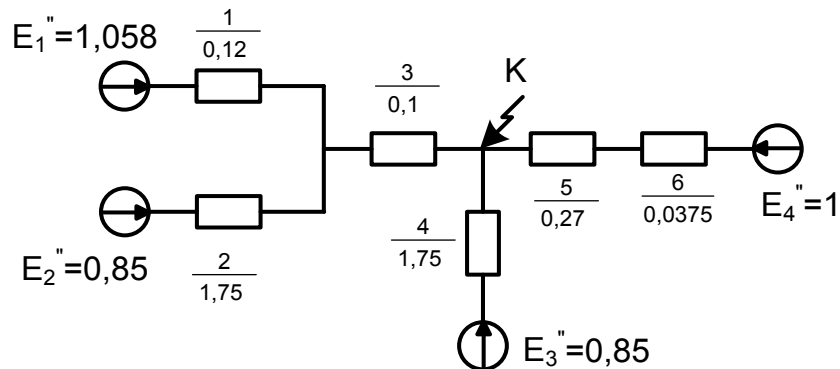


Рис. 2.2 – Схема замещения

В качестве базисных величин принимаем:

$$S_6 = 125 \text{ МВА},$$

$$U_6 = U_{\text{срн}},$$

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{срн}}} = \frac{125}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,625 \text{ кА}.$$

Определим параметры схемы замещения:

$$E_1'' = E_{*\Gamma}'' = U_* + I_{*\text{H}} \cdot x_d'' \cdot \sin\varphi = 1 + 0,8 \cdot 0,12 \cdot 0,6 = 1,058,$$

$$E_2'' = E_3'' = E_{*\text{H}}'' = 0,85; \quad E_4'' = E_{*\text{C}} = U_{*\text{C}} = 1,$$

$$x_1 = x_d'' \cdot \frac{S_6}{S_{\text{H}}} = 0,12 \cdot \frac{125 \cdot 0,8}{100} = 0,12,$$

$$x_2 = x_4 = x_{*\text{H}}'' \cdot \frac{S_6}{S_{\text{H}}} = 0,35 \cdot \frac{125}{25} = 1,75,$$

$$x_3 = \frac{U_{\text{K}\%}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{H}}} = \frac{10}{100} \cdot \frac{125}{125} = 0,1,$$

$$x_5 = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{\text{срн}}^2} = 0,38 \cdot 75 \cdot \frac{125}{115^2} = 0,27,$$

$$x_6 = x_{*\text{C}} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{H}}} = 1,2 \cdot \frac{125}{4000} = 0,0375.$$

Преобразуем схему замещения к простейшему виду:

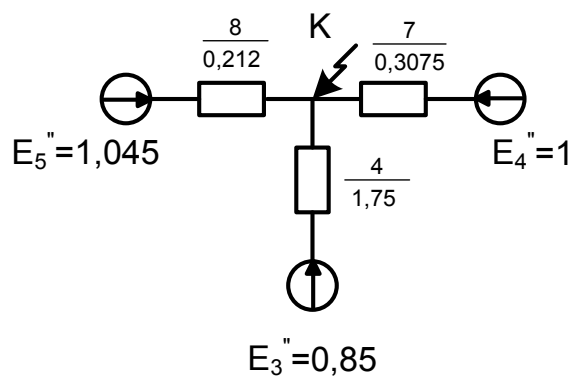


Рис. 2.3 – Преобразованная схема замещения

$$x_7 = x_5 + x_6 = 0,3075,$$

$$x_8 = \frac{x_1 \cdot x_2}{x_1 + x_2} + x_3 = 0,212,$$

$$E_5'' = \frac{E_1'' \cdot x_2 + E_2'' \cdot x_1}{x_1 + x_2} = \frac{1,058 \cdot 1,75 + 0,85 \cdot 0,12}{0,12 + 1,75} = 1,045.$$

Определим значения периодической составляющей тока КЗ от каждого из лучей в относительных единицах:

$$I_{*8}'' = \frac{E_5''}{x_8} = \frac{1,045}{0,212} = 4,93,$$

$$I_{*4}'' = \frac{E_3''}{x_4} = \frac{0,85}{1,75} = 0,486,$$

$$I_{*7}'' = \frac{E_4''}{x_7} = \frac{1}{0,3075} = 3,252,$$

Токи лучей в именованных единицах

$$I_8'' = I_{*8}'' \cdot I_6 = 4,93 \cdot 0,625 = 3,08 \text{ кА},$$

$$I_4'' = I_{*4}'' \cdot I_6 = 0,486 \cdot 0,625 = 0,304 \text{ кА},$$

$$I_7'' = I_{*7}'' \cdot I_6 = 3,252 \cdot 0,625 = 2,033 \text{ кА}.$$

Результирующий ток в начальный момент КЗ

$$I'' = I_8'' + I_4'' + I_7'' = 3,08 + 0,304 + 2,033 = 5,417 \text{ кА}.$$

Схему рис. 2.3 можно преобразовать к виду, приведенному на рис. 2.4:

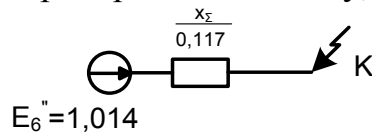


Рис. 2.4 – Результирующая схема замещения

$$\begin{aligned}
 x_{\Sigma} &= x_8 \parallel x_4 \parallel x_7 = \frac{x_8 \cdot x_4 \cdot x_7}{x_8 \cdot x_4 + x_8 \cdot x_7 + x_4 \cdot x_7} = \\
 &= \frac{0,212 \cdot 1,75 \cdot 0,3075}{0,212 \cdot 1,75 + 0,212 \cdot 0,3075 + 1,75 \cdot 0,3075} = 0,117, \\
 E_6'' &= \frac{E_5'' \cdot y_8 + E_3'' \cdot y_4 + E_4'' \cdot y_7}{y_8 + y_4 + y_7} = \\
 &= \frac{1,045 \cdot 4,717 + 0,85 \cdot 0,57 + 1 \cdot 3,252}{4,717 + 0,57 + 3,252} = 1,014, \\
 I'' &= \frac{E_6}{x_{\Sigma}} \cdot I_6 = \frac{1,014}{0,117} \cdot 0,625 = 5,417 \text{ кА}.
 \end{aligned}$$

Рассчитаем значение $i_y^{(3)}$. Поскольку значения ударного коэффициента различно для различных ветвей, то

$$\begin{aligned}
 i_y^{(3)} &= \sqrt{2} \cdot k_{y8} \cdot I_8'' + \sqrt{2} \cdot k_{y4} \cdot I_4'' + \sqrt{2} \cdot k_{y7} \cdot I_7'' = \\
 &= \sqrt{2} \cdot 1,7 \cdot 3,08 + \sqrt{2} \cdot 1 \cdot 0,304 + \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 2,033 = 13 \text{ кА}.
 \end{aligned}$$

2. Расчет переходного режима трехфазного КЗ.

Составим схему замещения (рис. 2.5) и рассчитаем параметры схемы замещения при принятых базисных условиях с учетом рассматриваемой стадии переходного процесса.

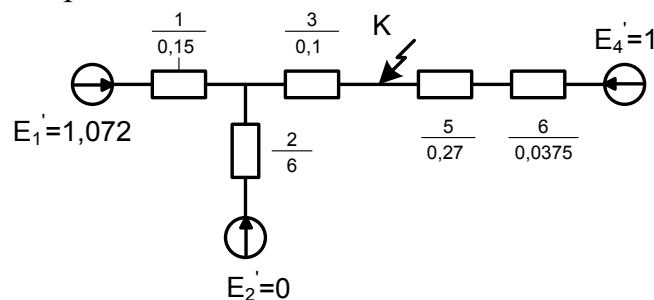


Рис. 2.5 – Схема замещения

$$E'_1 = E'_{*Г} = U_* + I_{*Н} \cdot x'_d \cdot \sin\varphi = 1 + 0,8 \cdot 0,15 \cdot 0,6 = 1,072,$$

$$x_1 = x'_d \cdot \frac{S_6}{S_H} = 0,15 \cdot \frac{125 \cdot 0,8}{100} = 0,15,$$

$$x_2 = x_{*Н} \cdot \frac{S_6}{S_H} = 1,2 \cdot \frac{125}{25} = 6,$$

$$E'_2 = E'_{*Н} = 0.$$

Нагрузка Н2 не учитывается, т.к. она подключена к шинам, где находится точка КЗ и она не оказывает никакого влияния на величину тока I' .

Параметры остальных элементов (трансформатор, ЛЭП, С) не зависят от рассматриваемой стадии, поэтому приняты такими же как и при расчете I'' .

Преобразуем схему замещения к виду, приведенному на рис. 2.6.

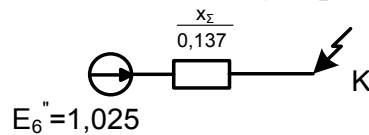


Рис. 2.6

$$E'_5 = \frac{(E_1 \cdot x_2 + E_2 \cdot x_1)}{(x_1 + x_2)} = \frac{1,072 \cdot 6}{0,15 + 6} = 1,046,$$

$$x_7 = \frac{x_1 \cdot x_2}{x_1 + x_2} + x_3 = \frac{0,15 \cdot 6}{0,15 + 6} + 0,1 = 0,246,$$

$$x_8 = x_5 + x_6 = 0,27 + 0,0375 = 0,3075,$$

$$E'_6 = \frac{E'_5 \cdot x_8 + E'_4 \cdot x_7}{x_7 + x_8} = \frac{1,046 \cdot 0,3075 + 1 \cdot 0,246}{0,246 + 0,3075} = 1,025,$$

$$x_\Sigma = \frac{x_7 \cdot x_8}{x_7 + x_8} = \frac{0,246 \cdot 0,3075}{0,246 + 0,3075} = 0,137,$$

$$I'^{(3)}_* = \frac{E'_6}{x_\Sigma} = \frac{1,025}{0,137} = 7,48,$$

$$I'^{(3)} = I'^{(3)}_* \cdot I_6 = 7,48 \cdot 0,625 = 4,676 \text{ кА.}$$

3. Расчет установившегося тока – $I_\infty^{(3)}$.

Рассмотрим расчет установившегося тока для случая, когда АРВ генератора отключено. Составим схему замещения (рис. 2.7).

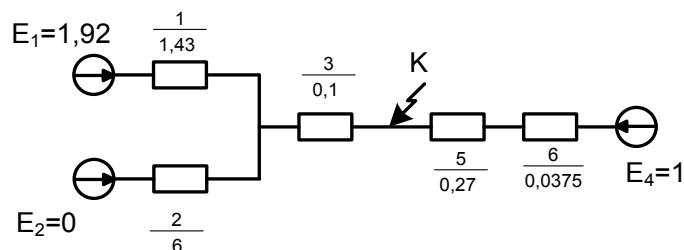


Рис 2.7

Рассчитаем параметры схемы замещения:

$$E_1 = E_{*q} = \sqrt{(U_* \cdot \cos\varphi)^2 + (U_* \cdot \sin\varphi + I_{*H} \cdot x_d)^2} =$$

$$= \sqrt{(1 \cdot 0,8)^2 + (1 \cdot 0,6 + 0,8 \cdot \frac{1}{0,7})^2} = 1,92,$$

$$x_d = \frac{1}{K_c} = \frac{1}{0,7} = 1,43,$$

$$x_1 = x_d \cdot \frac{S_6}{S_H} = 1,43 \cdot \frac{125 \cdot 0,8}{100} = 1,43.$$

Параметры остальных элементов будут такими же как и при расчете I' . Преобразуем схему замещения к виду, приведенному на рис. 2.8

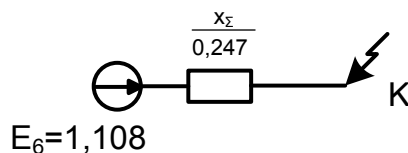


Рис. 2.8

$$E_5 = \frac{E_1 \cdot x_2 + E_2 \cdot x_1}{x_1 + x_2} = \frac{1,96 \cdot 6}{1,43 + 6} = 1,55,$$

$$x_7 = \frac{x_1 \cdot x_2}{x_1 + x_2} + x_3 = \frac{1,43 \cdot 6}{1,43 + 6} + 0,1 = 1,255,$$

$$x_8 = x_5 + x_6 = 0,3075,$$

$$E_6 = \frac{E_5 \cdot x_8 + E_4 \cdot x_7}{x_8 + x_7} = \frac{1,55 \cdot 0,3075 + 1 \cdot 1,255}{0,3075 + 1,255} = 1,108,$$

$$x_\Sigma = \frac{x_7 \cdot x_8}{x_7 + x_8} = \frac{1,255 \cdot 0,3075}{1,255 + 0,3075} = 0,247,$$

$$I_{*\infty}^{(3)} = \frac{E_6}{x_\Sigma} = \frac{1,108}{0,247} = 4,486,$$

$$I_\infty^{(3)} = I_{*\infty}^{(3)} \cdot I_6 = 4,486 \cdot 0,625 = 2,8 \text{ кА.}$$

Рассмотрим расчет установившегося тока для случая, когда АРВ генератора включено. При наличии АРВ необходимо выяснить в каком режиме находится генератор при коротком замыкании в точке К1. Для выяснения режима определим

$$x_{*ВН} = x_3 \parallel x_2 ,$$

(смотри рис. 2.7)

$$x_{*ВН} = \frac{0,1 \cdot 6}{0,1 + 6} = 0,098,$$

$$x_{*кр б} = x_d \cdot \frac{1}{I_{*f пр} - 1} \cdot \frac{S_б}{S_H} = \frac{1}{k_c} \cdot \frac{1}{I_{*f пр} - 1} \cdot \frac{S_б}{S_H} =$$

$$= \frac{1}{0,7} \cdot \frac{1}{4 - 1} \cdot \frac{125 \cdot 0,8}{100} = 0,477,$$

$$x_{*ВН} = 0,098 < x_{*кр б} = 0,477$$

— имеет место режим предельного возбуждения.

В этом случае схема замещения для расчета установившегося тока КЗ будет:

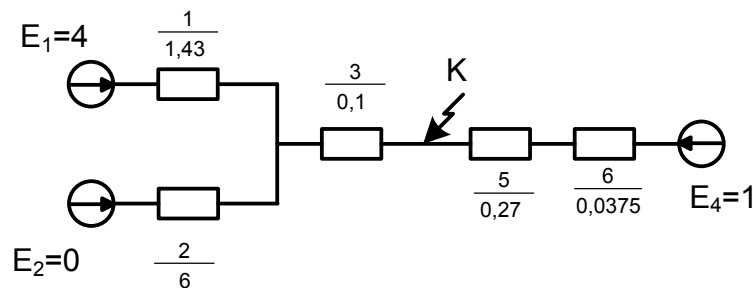


Рис. 2.9

Генератор в схеме учтен

$$E_1 = E_{*q} = I_{*f пр} = 4 \quad \text{и} \quad x_1 = x_d \cdot \frac{S_б}{S_H} = \frac{1}{k_c} \cdot \frac{S_б}{S_H} = 1,43.$$

Параметры остальных элементов остались такими же как и при расчете I_∞ для случая, когда АРВ был отключен. Аналогично как и в предыдущем случае преобразуем схему рис. 2.9 к виду рис. 2.10:

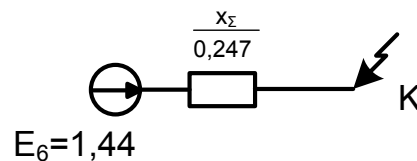


Рис. 2.10

$$E_5 = \frac{E_1 \cdot x_2 + E_2 \cdot x_1}{x_1 + x_2} = \frac{4 \cdot 6}{1,43 + 6} = 3,23,$$

$$x_7 = \frac{x_1 \cdot x_2}{x_1 + x_2} + x_3 = 1,255,$$

$$x_8 = x_5 + x_6 = 0,3075,$$

$$E_6 = \frac{E_5 \cdot x_8 + E_4 \cdot x_7}{x_8 + x_7} = \frac{3,23 \cdot 0,3075 + 1 \cdot 1,255}{0,3075 + 1,255} = 1,44,$$

$$x_\Sigma = \frac{x_7 \cdot x_8}{x_7 + x_8} = 0,247,$$

$$I_{*\infty}^{(3)} = \frac{E_6}{x_\Sigma} = \frac{1,44}{0,247} = 5,825,$$

$$I_\infty^{(3)} = I_{*\infty}^{(3)} \cdot I_6 = 5,825 \cdot 0,625 = 3,64 \text{ кА}.$$

Для того чтобы убедиться в правильности выбора режима генератора необходимо определить ток генератора и сравнить его с критическим током.

$$I_{*\text{кр б}} = \frac{U_*}{x_{*\text{кр б}}} = \frac{1}{0,477} = 2,096,$$

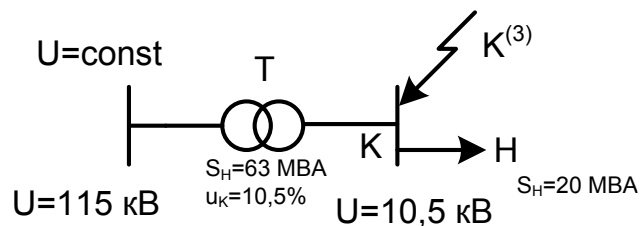
$$I_{\text{кр}} = I_{*\text{кр б}} \cdot I_6 = 2,096 \cdot 0,625 = 1,31 \text{ кА},$$

$$I_{*\Gamma} = \frac{E_1}{\left(x_1 + \frac{x_3 \cdot x_2}{x_3 + x_2}\right)} = \frac{4}{\left(1,43 + \frac{0,1 \cdot 6}{6 + 0,1}\right)} = 2,618,$$

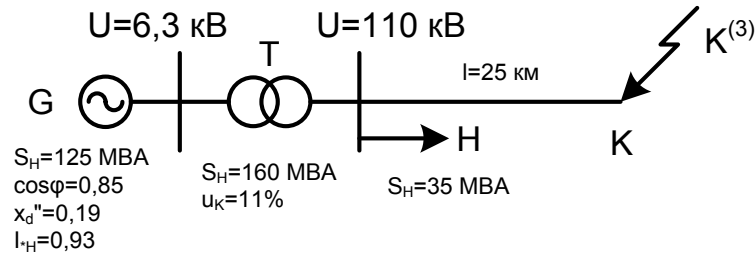
$$I_\Gamma = I_{*\Gamma} \cdot I_6 = 2,618 \cdot 0,625 = 1,636 \text{ кА},$$

$I_\Gamma > I_{\text{кр}}$ – режим предельного возбуждения.

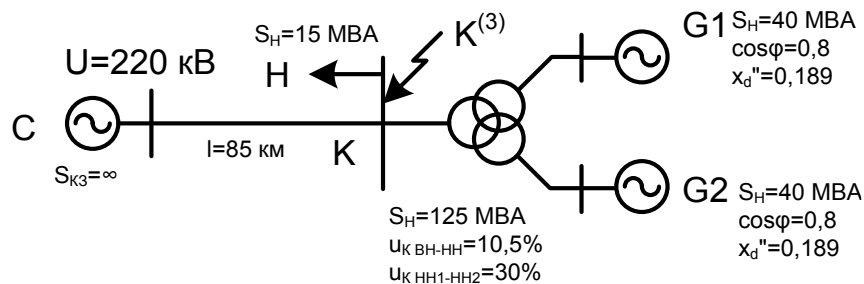
Задача 2.2. Для схемы электрической сети, приведенной ниже, рассчитать наибольшее мгновенное значение полного тока трехфазного КЗ в точке К.



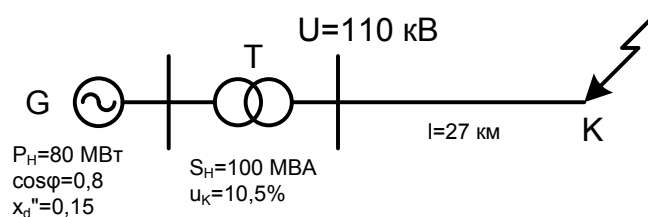
Задача 2.3. Определить сверхпереходной ток в генераторе при трехфазном КЗ в точке К.



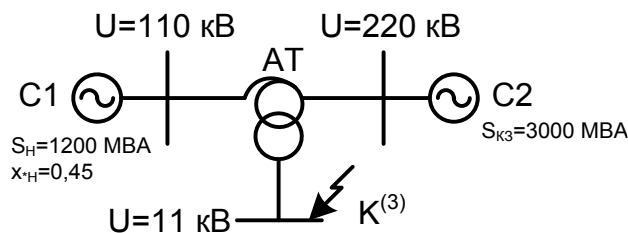
Задача 2.4. Для электрической системы, схема которой приведена ниже, определить значения сверхпереходного тока в каждой ветви схемы при трехфазном КЗ в точке К.



Задача 2.5. Рассчитать начальное действующее значение сверхпереходного тока трехфазного КЗ в точке К.

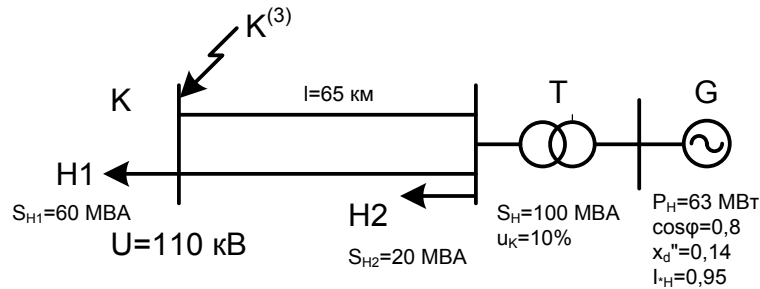


Задача 2.6. Определить: 1) сверхпереходной ток в каждой ветви схемы при трехфазном КЗ в точке К; 2) действующее значение ударного тока.

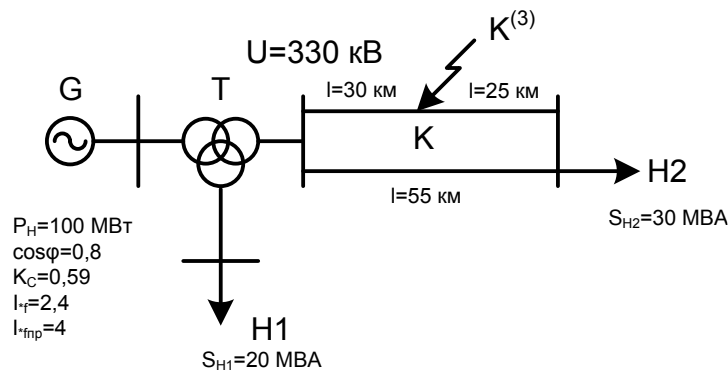


$$\text{AT1: } S_H = 250 \text{ MVA}; u_{\text{К ВН-СН}} = 11\%; u_{\text{К ВН-НН}} = 31\%; \\ u_{\text{К СН-НН}} = 11\%; S_{\text{НН}} = 0,5 \cdot S_H$$

Задача 2.7. Для схемы электрической сети, приведенной ниже, рассчитать значения сверхпереходного и ударного токов трехфазного КЗ в точке К.

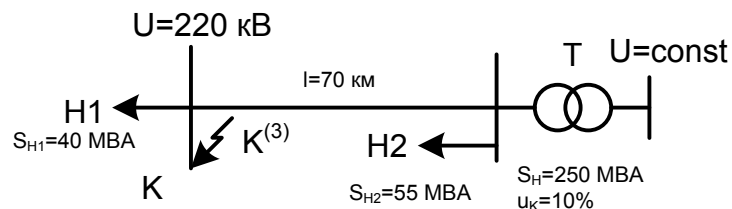


Задача 2.8. Для схемы электрической сети определить ток установившегося режима при трехфазном КЗ в точке К при условии: 1) генератор G снабжен АРВ; 2) генератор G не имеет АРВ.



$$T1: S_H = 200 \text{ MVA}; u_{KVH-CH} = 11\%; u_{KVH-НH} = 30\%; \\ u_{КСН-НH} = 20\%$$

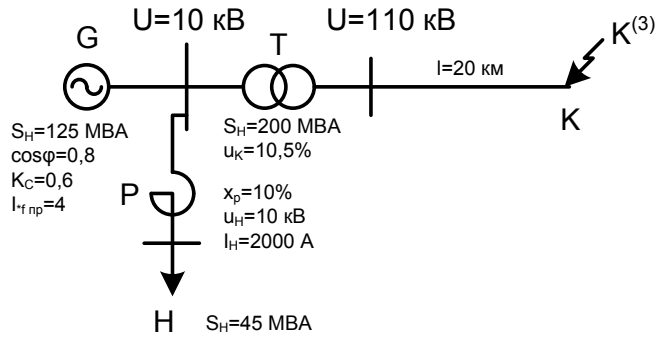
Задача 2.9. Рассчитать установившийся ток трехфазного КЗ в точке К системы.



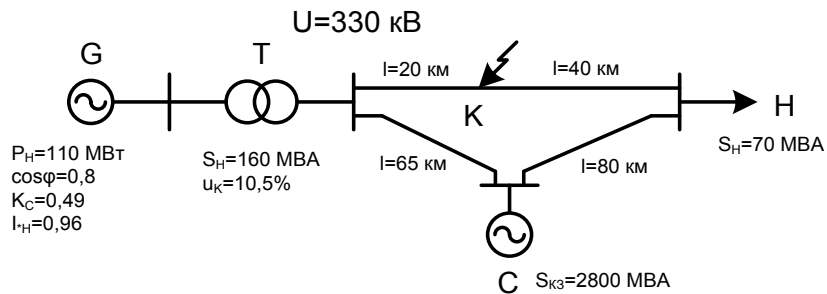
Задача 2.10. Определить ток трехфазного КЗ на выводах генератора при отсутствии АРВ в установившемся режиме.



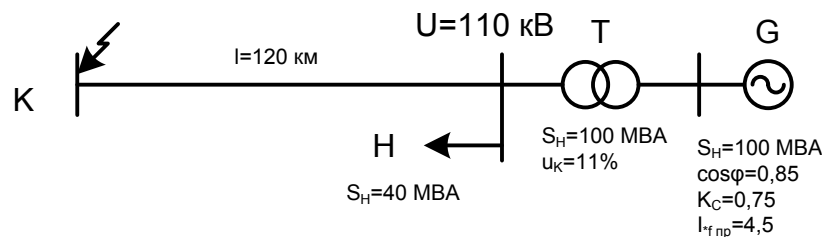
Задача 2.11. Определить ток установившегося режима при трехфазном КЗ в точке К при условии: 1) генератор G снабжен АРВ; 2) генератор G не имеет АРВ.



Задача 2.12. Для схемы сети определить установившийся ток трехфазного КЗ в точке К.



Задача 2.13. Определить режим работы генератора с АРВ и рассчитать установившийся ток трехфазного КЗ в точке К.



3. Практические методы расчета симметричных КЗ

В данном параграфе рассмотрен порядок расчета периодической составляющей тока КЗ с помощью расчетных кривых, а также расчет по типовым кривым. Приведенные здесь задачи дают возможность освоить эти методы расчета.

3.1. Порядок расчета периодической составляющей тока КЗ с помощью расчетных кривых по общему изменению тока

Порядок определения периодической составляющей тока КЗ с помощью расчетных кривых по общему изменению следующий:

1. Для расчетной схемы энергосистемы составляют схему замещения, в которую генераторы входят своими сверхпереходными сопротивлениями x''_{*d} , а вместо значения ЭДС записывается полная мощность S_H в МВА и указывается тип генератора (турбо- или гидрогенератор). Нагрузки в этой схеме должны отсутствовать, за исключением крупных синхронных компенсаторов и двигателей (находящихся вблизи места КЗ), которые учитывают как источники соизмеримой мощности.

2. Задаются базисными условиями и приводят все элементы схемы замещения к принятым базисным условиям.

3. Преобразуют схему замещения к простейшему виду: находят результирующую реактивность $x_{*рез}$ относительно места КЗ и суммарную мощность источников питания $S_{H\Sigma}$. ($S_{H\Sigma} = S_{H1} + S_{H2} + \dots + S_{Hn}$, МВА).

4. Определяют расчетную реактивность $x_{*расч}$ по выражению

$$x_{*расч} = x_{*рез} \cdot \frac{S_{H\Sigma}}{S_{\sigma}}$$

5. Выбирают расчетные кривые, по которым для полученной реактивности $x_{*расч}$ находят для интересующих моментов времени относительные значения периодической составляющей тока КЗ I_{*nkt} . При $x_{*расч} > 3$ величину относительного тока для всех моментов времени определяют так:

$$I_{*nkt} = \frac{1}{x_{*расч}}$$

6. Находят искомую величину периодической составляющей тока КЗ для каждого момента времени t :

$$I_{nkt} = I_{*nkt} \cdot I_{H\Sigma}$$

где $I_{H\Sigma} = S_{H\Sigma} / (\sqrt{3} \cdot U_{ср.н})$ - суммарный номинальный ток генераторов, приведенный к напряжению той ступени, где рассматривается короткое замыкание.

Когда исходная схема содержит генераторы разных типов, то при расчете могут возникнуть формальные затруднения в выборе соответствующих кривых. Тогда нужно воспользоваться расчетными кривыми, ориентируясь на конкретные условия рассматриваемой схемы энергосистемы, отдавая предпочтение тем генераторам, которые в большей степени участвуют в питании точки КЗ.

Задача 3.1. Определить по расчетным кривым токи I'' , $I_{0,5}$, I_{∞} при КЗ в точке К⁽³⁾ для схемы рис. 3.1.

Решение. Задаемся базисными условиями:

$$S_{\delta} = 1000 \text{ МВА}, \quad U_{\delta} = U_{\text{срн}} = 115 \text{ кВ}.$$

Составляем эквивалентную схему замещения (рис. 3.2).

Приводим сопротивления элементов схемы к выбранным базисным условиям:

– турбогенераторы G1 и G2

$$x_1 = x_2 = x_d'' \cdot \frac{S_{\delta}}{P_H} \cdot \cos\varphi = 0,2 \cdot \frac{1000 \cdot 0,8}{60} = 2,67$$

– турбогенераторы G3 и G4

$$x_3 = x_4 = 0,213 \cdot \frac{1000 \cdot 0,85}{165} = 1,097$$

– трансформатор T1

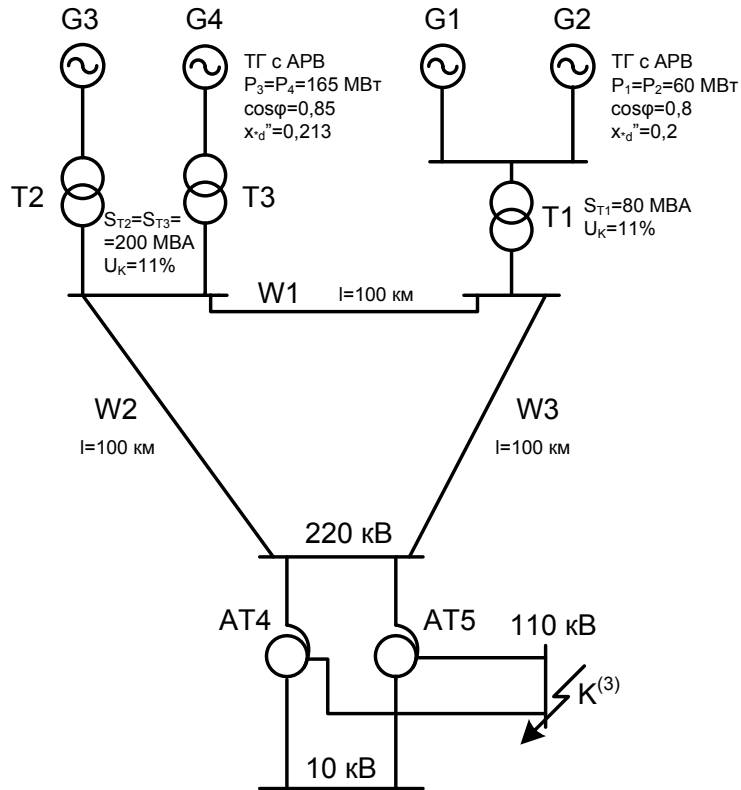
$$x_5 = \frac{U_{k\%}}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_H} = \frac{12 \cdot 1000}{100 \cdot 80} = 1,5$$

– трансформаторы T2 и T3

$$x_6 = x_7 = \frac{11 \cdot 1000}{100 \cdot 200} = 0,55$$

– линии W1, W2, W3

$$x_8 = x_9 = x_{10} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\text{ср.н}}^2} = 0,4 \cdot 100 \cdot \frac{1000}{230^2} = 0,756$$



$$S_{AT4}=S_{AT5}=200 \text{ МВА} \quad U_{квс}\%=11\% \quad U_{кчн}\%=20\% \quad U_{квн}\%=32\%$$

Рис. 3.1 – Исходная схема энергосистемы

– автотрансформаторы АТ4 и АТ5

$$x_{11} = x_{13} = \frac{0,5 \cdot (U_{квс}\% + U_{квн}\% - U_{кчн}\%) \cdot S_{\sigma}}{100 \cdot S_H} = \frac{0,5 \cdot (11 + 32 - 20) \cdot 1000}{100 \cdot 200} = 0,575$$

$$x_{12} = x_{14} = \frac{0,5 \cdot (U_{квс}\% + U_{кчн}\% - U_{квн}\%) \cdot S_{\sigma}}{100 \cdot S_H} = \frac{0,5 \cdot (11 + 20 - 32) \cdot 1000}{100 \cdot 200} = 0$$

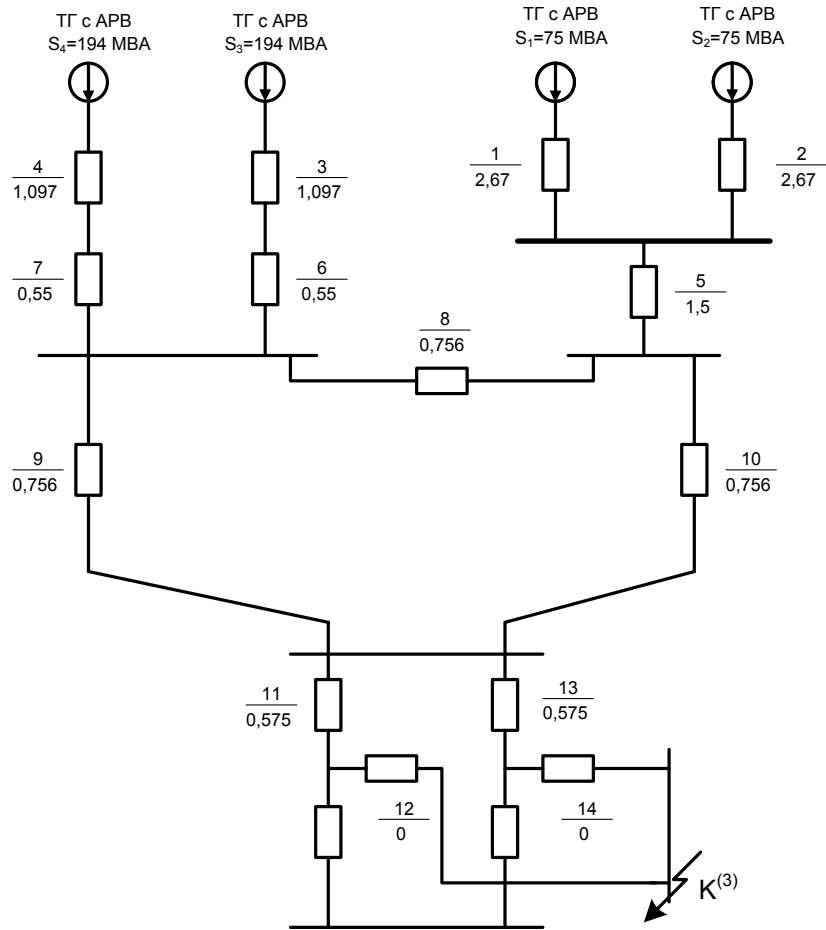


Рис. 3.2 – Схема замещения

Упрощаем схему замещения.

Эквивалентуем ветви с генераторами G1 и G2

$$S_5 = S_1 + S_2 = 75 + 75 = 150 \text{ MBA},$$

$$x_{15} = \frac{x_1}{2} + x_5 = \frac{2,67}{2} + 1,5 = 2,835,$$

$$S_6 = S_3 + S_4 = \frac{165}{0,85} + \frac{165}{0,85} = 388 \text{ MBA},$$

$$x_{16} = \frac{x_4 + x_7}{2} = \frac{1,097 + 0,55}{2} = 0,823,$$

$$x_{17} = \frac{x_{11} + x_{12}}{2} = \frac{0,575 + 0}{2} = 0,288.$$

Преобразуем треугольник сопротивлений x_8, x_9, x_{10} звезду с сопротивлениями x_{18}, x_{19}, x_{20}

$$x_{18} = \frac{x_8 \cdot x_9}{x_8 + x_9 + x_{10}} = \frac{0,756 \cdot 0,756}{0,756 + 0,756 + 0,756} = 0,252,$$

$$\begin{aligned}
 x_{19} &= 0,252, & x_{20} &= 0,252, \\
 S_7 &= S_5 + S_6 = 388 + 150 = 538 \text{ МВА}, \\
 x_{21} &= \frac{(x_{16} + x_{18}) \cdot (x_{15} + x_{19})}{x_{16} + x_{15} + x_{18} + x_{19}} = \\
 &= \frac{(0,823 + 0,252) \cdot (2,835 + 0,252)}{0,823 + 0,252 + 2,835 + 0,252} = 0,797, \\
 x_{22} &= x_{20} + x_{17} = 0,252 + 0,288 = 0,54, \\
 x_{23} &= x_{22} + x_{21} = 0,797 + 0,54 = 1,337.
 \end{aligned}$$

Определяем расчетное сопротивление:

$$x_{*\text{расч}} = x_{23} \cdot \frac{S_7}{S_6} = 1,337 \cdot \frac{538}{1000} = 0,719.$$

По расчетным кривым для турбогенераторов с АРВ определим периодические составляющие токов КЗ в относительных единицах для заданных моментов времени:

$$I''_{*n} = 1,4; \quad I_{*n(0,5)} = 1,18; \quad I_{*n\infty} = 1,47.$$

Определим суммарный номинальный ток источников:

$$I_{H\Sigma} = \frac{S_7}{\sqrt{3} \cdot U_6} = \frac{538}{\sqrt{3} \cdot 115} = 2,7 \text{ кА}.$$

Токи КЗ в именованных единицах:

$$I'' = I''_{*n} \cdot I_{H\Sigma} = 1,4 \cdot 2,7 = 3,78 \text{ кА},$$

$$I_{(0,5)} = 1,18 \cdot 2,7 = 3,186 \text{ кА},$$

$$I_{\infty} = 1,47 \cdot 2,7 = 3,969 \text{ кА}.$$

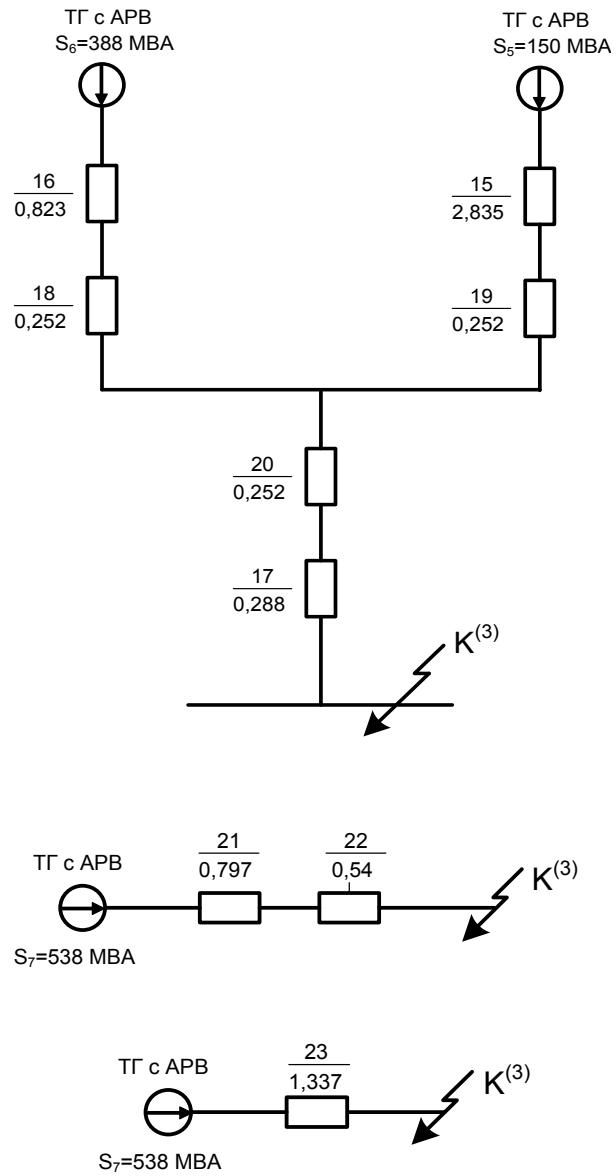
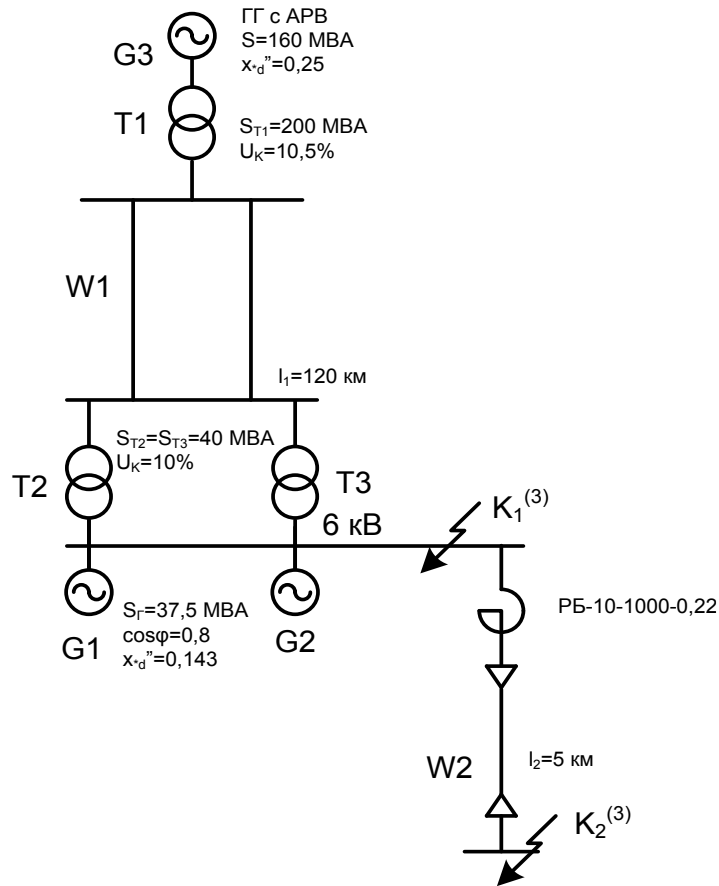
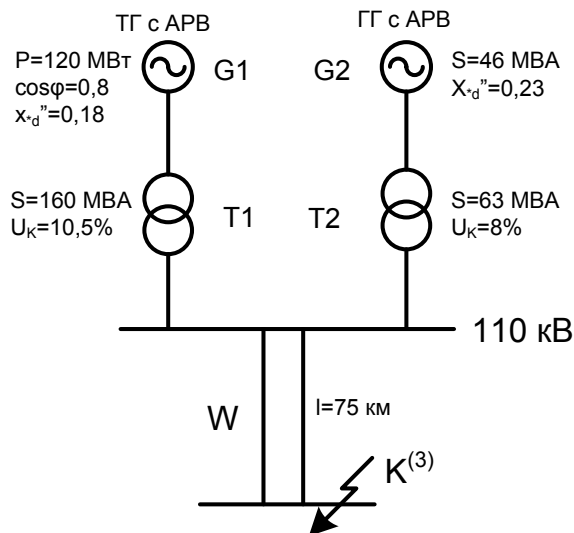


Рис. 3.3 – Упрощение схемы замещения

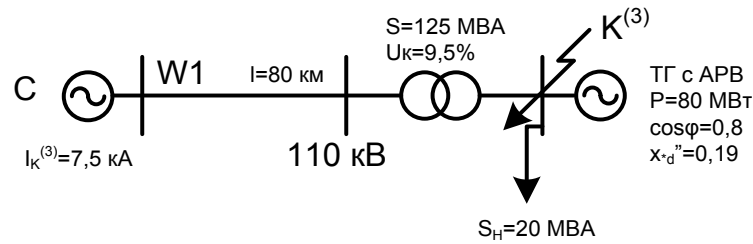
Задача 3.2. При трехфазном КЗ поочередно в точках К1 и К2 приведенной ниже схемы определить значение тока в месте повреждения через 2 с после начала КЗ. Генераторы имеют АРВ.



Задача 3.3. Определить ток трехфазного КЗ в точке К для моментов времени 0,1 с и 1,5 с после начала КЗ.



Задача 3.4. Вычислить ток трехфазного КЗ в точке К для моментов времени $t = 0$ и $t = \infty$.



3.2. Порядок расчета периодической составляющей тока КЗ с помощью расчетных кривых по индивидуальному изменению тока

В тех случаях, когда в заданной схеме имеются генераторы разных типов с АРВ и без АРВ, а также система бесконечной мощности, рекомендуется выполнять расчеты по индивидуальному изменению тока.

1. После составления схемы замещения и задания базисных условий приводят действительную схему замещения энергосистемы к условной радиальной, каждая ветвь которой соответствует выделяемому источнику или группе однотипных источников и связана с точкой КЗ (рис. 3.4).

Преобразование схемы выполняют с использованием коэффициентов токораспределения. Источники непосредственно связанные с точкой КЗ, а также источники бесконечной мощности следует рассматривать отдельно от остальных источников питания.

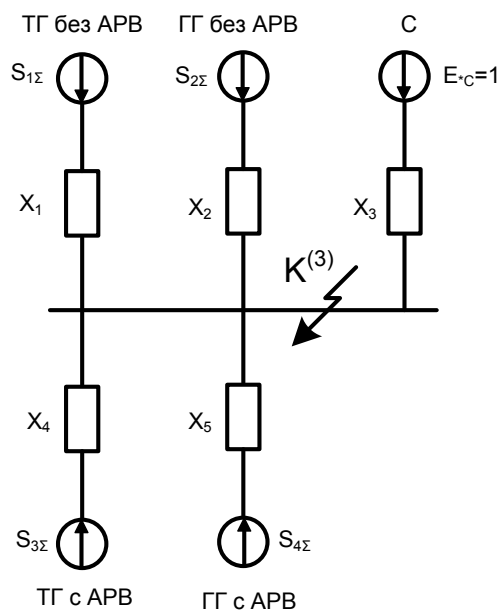


Рис. 3.4 – Схема сети, преобразованная к радиальному виду

2. Определяют расчетные значения сопротивлений каждой из ветвей, исключая ветвь системы

$$x_{i\text{расч}} = x_i \cdot \frac{S_{i\Sigma}}{S_6}$$

где x_i – результирующее сопротивление i -ой ветви;

$S_{i\Sigma}$ – суммарная мощность источников питания i -ой ветви.

3. Воспользовавшись $x_{i\text{расч}}$ каждой из ветвей по соответствующим расчетным кривым определяют относительные значения периодических составляющих тока для интересующих моментов времени для каждой из ветвей I_{*nti} .

Если $x_{\text{расч}}$ какой-то из ветвей будут больше 3, то:

$$I_{*nti} = \frac{1}{x_{i\text{расч}}}.$$

4. Определяют суммарные номинальные токи источников питания $I_{\Sigma\text{ном}i}$ каждой из ветвей, приведенные к той ступени напряжения, на которой находится точка КЗ.

$$I_{\Sigma\text{ном}i} = \frac{S_{i\Sigma}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ср.н}}},$$

где $U_{\text{ср.н}}$ – среднее номинальное напряжение в точке КЗ.

5. Относительное значение тока для любого момента времени для ветви системы определяют как

$$I_{*ct} = \frac{1}{x_3}.$$

6. Определяют базисный ток в точке КЗ:

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_6}.$$

7. Определяют действительное значение тока КЗ в точке для соответствующих моментов времени, как сумму токов всех ветвей

$$I_{nt} = \sum_{i=1}^n I_{*nti} \cdot I_{\Sigma\text{ном}i} + I_{*ct} \cdot I_6, \text{ кА.}$$

8. В случае подключенной к точке КЗ нагрузки ее следует учесть при определении тока КЗ в начальный момент времени и для уточнения ударного тока КЗ

$$I_{\text{н}}'' = \frac{E_{*н}''}{x_{*н}} \cdot I_{\text{нн}} = \frac{0,85}{0,35} \cdot I_{\text{нн}} = 2,43 \cdot I_{\text{нн}},$$

где $I_{\text{нн}}$ – номинальный ток нагрузки, равный:

$$I_{\text{нн}} = \frac{S_{\text{н}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ср.н}}},$$

S_n – номинальная мощность нагрузки.

Ударный ток от нагрузки:

$$i_{yH} = \sqrt{2} \cdot k_{yH} \cdot I_H''$$

здесь $k_{yH}=1$ – ударный коэффициент для обобщенной нагрузки.

Задача 3.5. При трехфазном коротком замыкании в точке К схемы представленной на рис. 3.5, определить величину тока через 0,5 с после начала КЗ по расчетным кривым. Секционный выключатель замкнут.

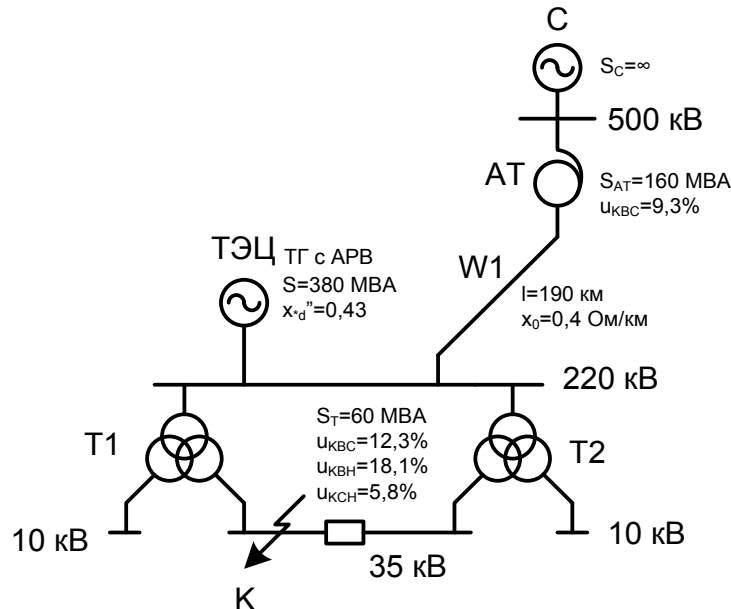


Рис. 3.5 – Исходная схема.

Решение. Примем $S_б=600$ МВА, $U_б = U_{cp.H} = 37$ кВ. Сопротивления элементов схемы замещения (рис. 3.6) при базисных условиях будут:

$$x_1 = x_{*d}'' \cdot \frac{S_б}{S_{TЭЦ}} = 0,43 \cdot \frac{600}{380} = 0,68,$$

$$x_2 = \frac{U_{KBC\%}}{100} \cdot \frac{S_б}{S_H} = \frac{9,3 \cdot 600}{100 \cdot 160} = 0,35,$$

$$x_3 = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_б}{U_{cp.H}^2} = 0,4 \cdot 190 \cdot \frac{600}{230^2} = 0,86,$$

$$x_4 = x_5 = \frac{0,5 \cdot (U_{KBC\%} + U_{KBH\%} - U_{KCH\%})}{100} \cdot \frac{S_б}{S_H} = \frac{0,5 \cdot (12,3 + 18,1 - 5,8) \cdot 600}{100 \cdot 60} = 1,23,$$

$$x_6 = x_7 = \frac{0,5 \cdot (U_{KBC\%} + U_{KCH\%} - U_{KBH\%})}{100} \cdot \frac{S_б}{S_H} = \frac{0,5 \cdot (12,3 + 5,8 - 18,1) \cdot 600}{100 \cdot 60} \approx 0,$$

$$x_8 = x_9 = \frac{0,5 \cdot (U_{КВН\%} + U_{КСН\%} - U_{КВС\%})}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H} = \frac{0,5 \cdot (18,1 + 5,8 - 12,3) \cdot 600}{100 \cdot 60} = 0,58.$$

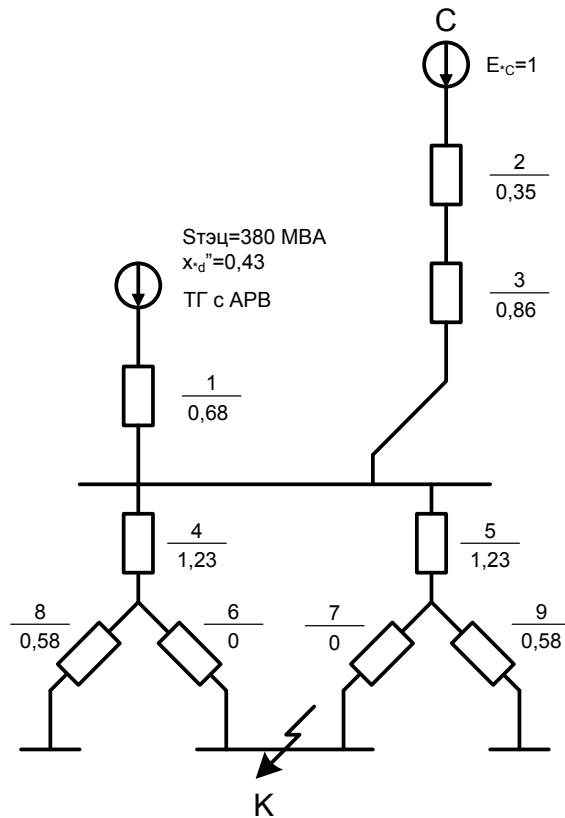


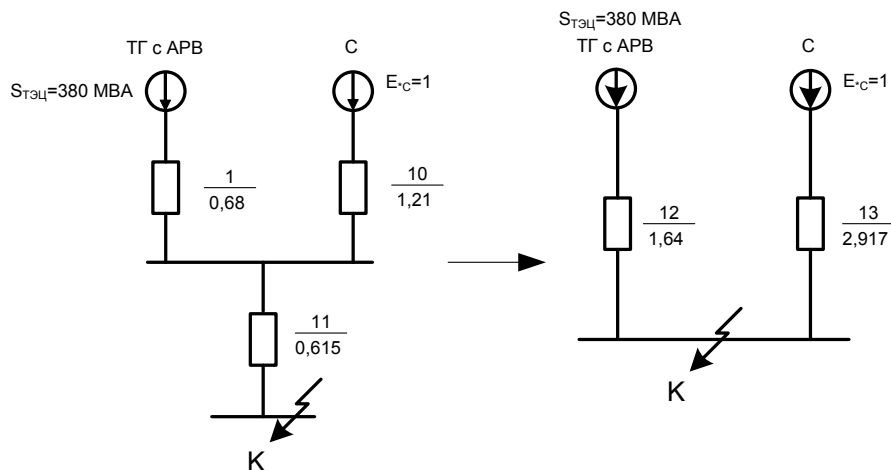
Рис. 3.6 – Схема замещения.

Преобразуем схему к точке КЗ К.

$$x_{10} = x_2 + x_3 = 0,35 + 0,86 = 1,21,$$

$$x_{11} = x_4 \parallel x_5 = \frac{x_4 \cdot x_5}{x_4 + x_5} = \frac{1,23}{2} = 0,615.$$

Схема замещения после преобразования примет вид (рис. 3.7)



а)

б)

Рис. 3.7 – Преобразование схемы замещения

Чтобы перейти к схеме вида рис. 3.7б, воспользуемся методом коэффициентов токораспределения:

$$x_{\text{ЭКВ}} = x_1 \parallel x_{10} = \frac{0,68 \cdot 1,21}{0,68 + 1,21} = 0,435,$$

$$C_1 = \frac{x_{\text{ЭКВ}}}{x_1} = \frac{0,435}{0,68} = 0,64, \quad C_2 = \frac{x_{\text{ЭКВ}}}{x_2} = \frac{0,435}{1,21} = 0,36,$$

$$x_{\Sigma} = x_{\text{ЭКВ}} + x_{11} = 0,435 + 0,615 = 1,05,$$

$$x_{12} = \frac{x_{\Sigma}}{C_1} = \frac{1,05}{0,64} = 1,64, \quad x_{13} = \frac{x_{\Sigma}}{C_2} = \frac{1,05}{0,36} = 2,917.$$

Расчетное сопротивление ветви станции:

$$x_{\text{расч}} = x_{12} \cdot \frac{S_{\text{ТЭЦ}}}{S_{\text{б}}} = 1,64 \cdot \frac{380}{600} = 1,04,$$

для которой по расчетным кривым для турбогенераторов с АРВ при $t=0,5$ с находим $I_{*t=0,5}=0,85$.

Тогда искомый ток при КЗ в точке К будет:

$$I_k = I_{*t=0,5} \cdot \frac{S_{\text{ТЭЦ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ср.н}}} + \frac{1}{x_{13}} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ср.н}}} =$$

$$= 0,85 \cdot \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 37} + \frac{1}{2,917} \cdot \frac{600}{\sqrt{3} \cdot 37} = 8,25 \text{ кА.}$$

3.3 Порядок расчета токов КЗ методом типовых кривых

Расчетные типовые кривые (рис. 3.8) представляют собой зависимость от времени периодической слагающей тока трехфазного КЗ синхронной машины, отнесенной к начальному току КЗ, при разных удаленностях точки короткого замыкания.

Удаленность фиксируется отношением:

$$\frac{I_{n\Gamma}''}{I_{\Gamma.\text{НОМ}}} = I_{*\Gamma(\text{НОМ})}.$$

или начальным относительным током КЗ генератора для заданной расчетной схемы.

Типовые кривые являются унифицированными и построены для расчета токов КЗ от турбогенераторов, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов, независимо от типа, параметров и конструктивных особенностей машин.

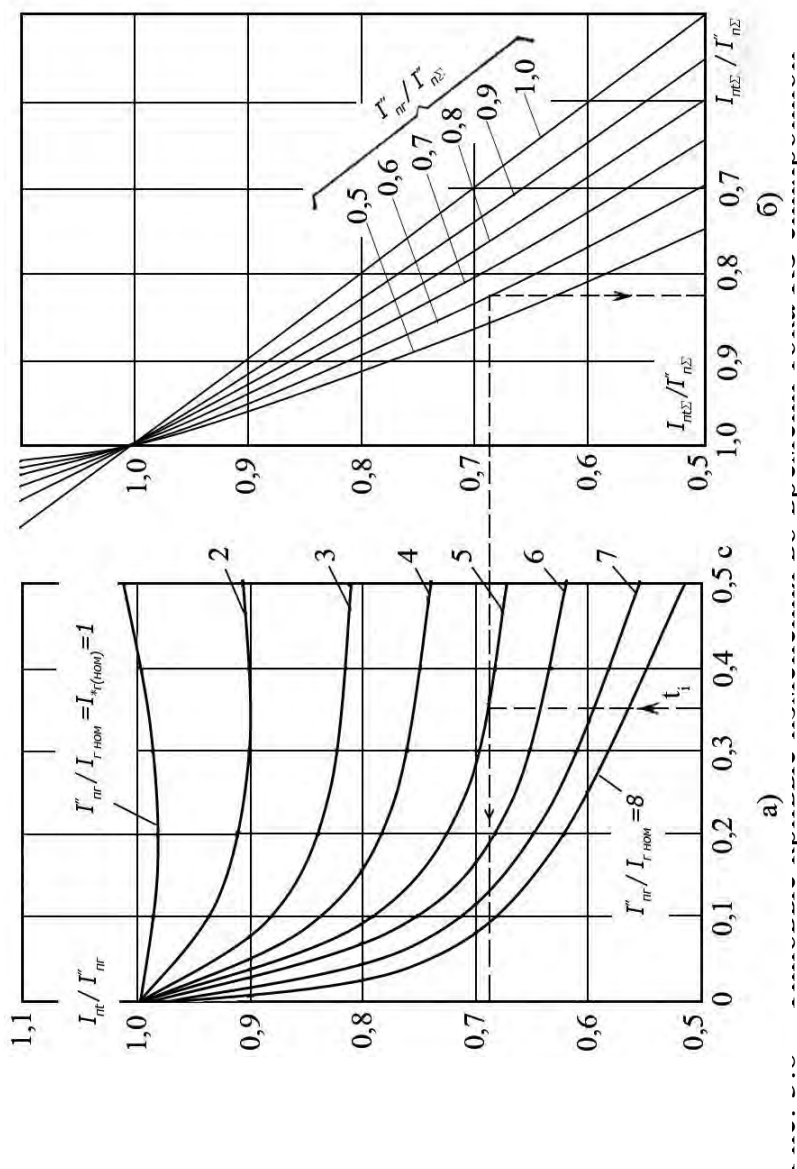
Графоаналитический метод определения периодической слагающей тока генератора $I_{n.t.g.}$ по кривым рис. 3.8,а применительно к одному источнику питания сводится к следующему:

1. Рассчитывают результирующее сопротивление $x_{*рез.б}$ до точки короткого замыкания;
2. Вычисляют периодическую слагающую начального тока $I_{n\Gamma}''$ в месте КЗ от генератора по выражению:

$$I_{n\Gamma}'' = \frac{E_*'' \cdot I_{б}}{x_{*рез.б}}$$

3. Находят электрическую удаленность $I_{n\Gamma}''/I_{г.ном}$ точки КЗ. Если она окажется дробным числом, то ее округляют до ближайшего целого числа или производят экстраполяцию кривых рис. 3.8,а. Номинальный ток генератора рассчитывается по формуле:

$$I_{г.ном} = \frac{P_{н}}{\sqrt{3}U_{ср.н} \cdot \cos\varphi}$$



а) при питании КЗ от генератора; б) при питании КЗ от генератора и машины при разных удаленностях точки КЗ

4. Определяют отношение $v = I_{nt} / I_{н\Gamma}''$ по типовым кривым на основе уже известного отношения $I_{н\Gamma}'' / I_{\Gamma.ном}$ и момента времени t .

5. Рассчитывают периодическую слагающую тока КЗ для момента времени t :

$$I_{nt} = v \cdot I_{н\Gamma}''.$$

При связи генератора и электрической системы с точкой КЗ через общее сопротивление x_k (рис. 3.9) расчет периодической слагающей тока КЗ выполняют в следующем порядке:

1. По исходной расчетной схеме составляют схему замещения и находят результирующее индуктивное сопротивление $x_{рез.}''$ и суммарную ЭДС схемы $E_{*\Sigma}''$ для определения начального значения периодической слагающей тока в точке КЗ по формуле:

$$I_{n\Sigma}'' = \frac{E_{*\Sigma}'' \cdot I_6}{x_{*\text{рез}}}$$

2. Вычисляют начальное значение периодической слагающей тока в генераторной ветви пользуясь выражением:

$$I_{n\Gamma}'' = \frac{E_{*\Sigma}'' \cdot I_6 - I_{n\Sigma}'' \cdot x_{*\text{К}}}{x_{*\Gamma}}$$

3. Определяют отношения $I_{n\Gamma}''/I_{\Gamma.\text{НОМ}}''$ и $I_{n\Gamma}''/I_{n\Sigma}''$ для начального момента времени;

4. По кривой $I_{nt}/I_{n\Gamma}'' = f(t)$ (рис. 3.8а) при известном значении $I_{n\Gamma}''/I_{\Gamma.\text{НОМ}}''$ для расчетного момента времени t находят отношение $I_{nt\Gamma}/I_{n\Gamma}''$ и по нему для соответствующей кривой $I_{n\Gamma}''/I_{n\Sigma}''$ (рис. 3.8б) устанавливают значение $\mu = I_{nt\Sigma}/I_{n\Sigma}''$;

5. По найденному отношению μ и ранее найденному току $I_{n\Sigma}''$ определяют периодическую слагающую искомого тока для момента времени $tI_{nt\Sigma} = \mu \cdot I_{n\Sigma}''$.

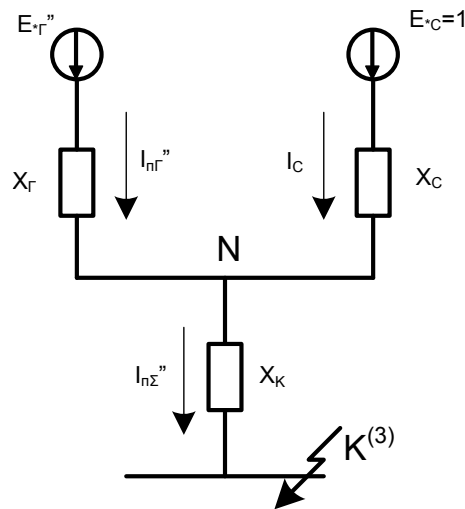


Рис. 3.9

Задача 3.6. Определить ток трехфазного КЗ в точке К (рис. 3.10) в момент времени $t=0,2$ с.

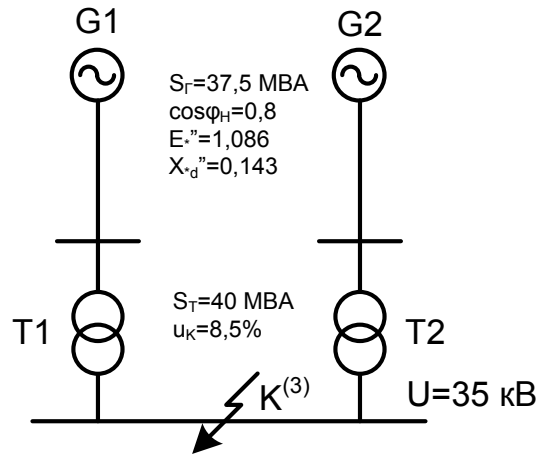


Рис. 3.10 – Расчетная схема

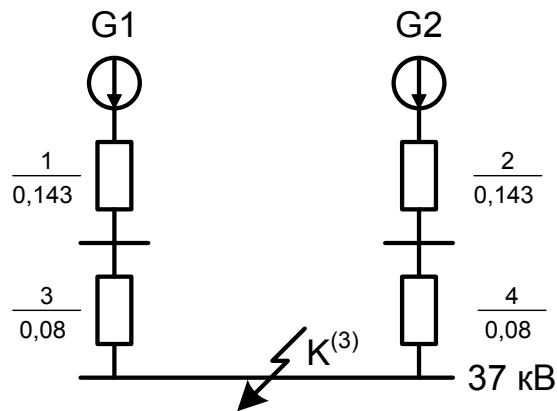


Рис. 3.11 – Схема замещения

Решение. 1. Задаются базисными условиями

$$S_{\delta}=37,5 \text{ МВА}, \quad U_{\delta}=37 \text{ кВ}$$

$$I_{\delta} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta}} = \frac{37,5}{\sqrt{3} \cdot 37} = 0,585 \text{ кА}$$

2. Сопротивление элементов схемы замещения (рис.3.11) приводим к базисным условиям:

$$x_1 = x_2 = x_d'' \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{\Gamma}} = \frac{0,143 \cdot 37,5}{37,5} = 0,143,$$

$$x_3 = x_4 = \frac{U_{\text{к}} \cdot S_{\delta}}{100 \cdot S_{\text{T}}} = \frac{8,5 \cdot 37,5}{100 \cdot 40} = 0,08.$$

3. Номинальный ток каждого генератора:

$$I_{Г.НОМ} = \frac{S_{Г}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ}} = \frac{37,5}{\sqrt{3} \cdot 35} = 0,619 \text{ кА.}$$

4. Оба генератора находятся в одинаковых условиях относительно точки КЗ. Поэтому рассмотрим их как эквивалентный генератор с результирующим сопротивлением:

$$x_{*рез} = \frac{x_1 + x_3}{2} = \frac{0,143 + 0,08}{2} = 0,111.$$

5. Начальный ток, создаваемый эквивалентным генератором, при трехфазном КЗ в точке К:

$$I_{Г}^{(3)} = \frac{E_* \cdot I_6}{x_{*рез}} = \frac{1,086 \cdot 0,585}{0,111} = 5,725 \text{ кА.}$$

6. Отношение тока эквивалентного генератора при трехфазном КЗ к номинальному току отдельных генераторов:

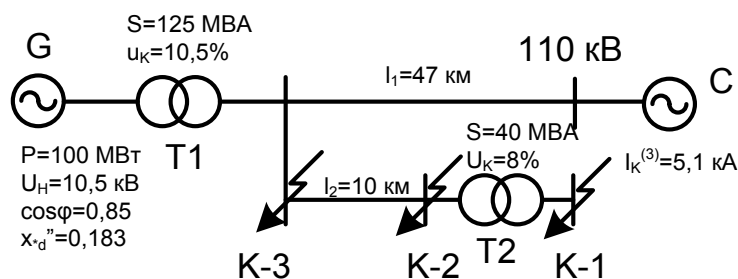
$$\frac{I''}{I_{Г.НОМ}} = \frac{I_{Г}^{(3)}}{2I_{Г.НОМ}} = \frac{5,725}{2 \cdot 0,619} = 4,62.$$

7. По типовым кривым (рис.3.8а) для $t = 0,2 \text{ с}$ и отношения $I'' / I_{Г.НОМ} = 4,62$ находим $I_{nt} / I_{Г}'' = 0,75$.

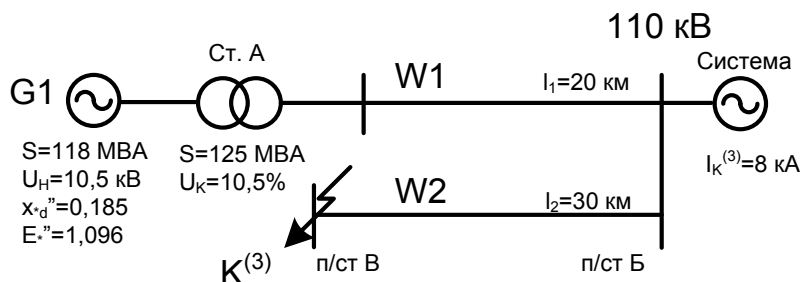
8. Ток трехфазного КЗ в точке К, создаваемый эквивалентным генератором в момент времени $t = 0,2 \text{ с}$:

$$I_{nt=0,2} = \frac{I_{nt}}{I_{Г}''} \cdot I_{Г}^{(3)} = 0,75 \cdot 5,725 = 4,29 \text{ кА.}$$

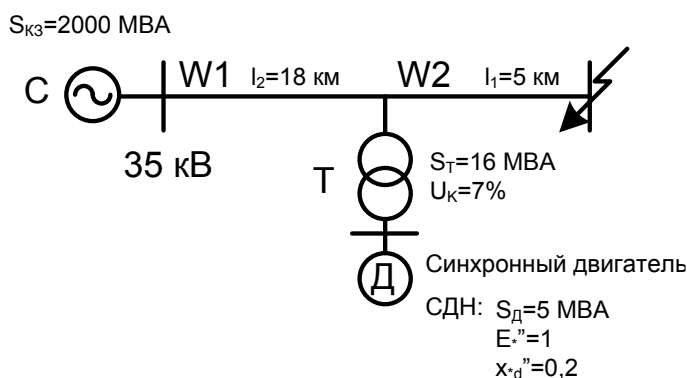
Задача 3.7. Вычислить ток трехфазного КЗ для $t = 0,1 \text{ с}$ в точках К-2 и К-3 и для $t = 0,2 \text{ с}$ в точке К-1 следующей схемы:



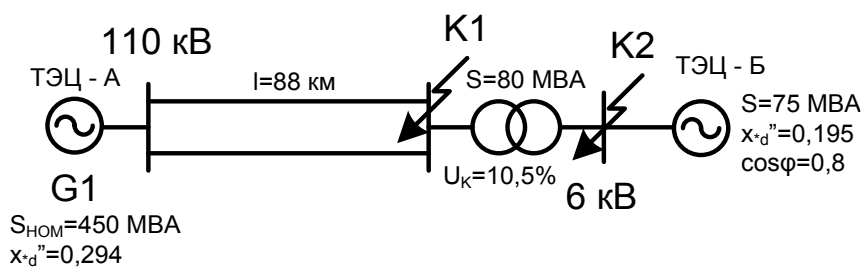
Задача 3.8. Определить ток трехфазного КЗ на шинах 110 кВ п/ст В для $t=0,3\text{с}$



Задача 3.9. Определить ток трехфазного КЗ через 0,1 с в точке К схемы.



Задача 3.10. Определить токи трехфазного КЗ для $t = 0,1\text{ с}$ в точке К-1 и для $t = 0,2\text{ с}$ в точке К-2.



4. Расчет переходного процесса при однократной поперечной несимметрии

В этом параграфе приведен порядок расчета несимметричных коротких замыканий.

Расчеты несимметричных КЗ проводят с использованием метода симметричных составляющих, согласно которому любая несимметричная трехфазная система напряжений, токов, потоков и т.п. заменяется тремя

симметричными трехфазными системами прямой, обратной и нулевой последовательности.

Порядок расчета несимметричных КЗ следующий:

1. Составляются схемы замещения отдельных последовательностей.
2. Рассчитываются параметры элементов схем замещения (приводятся к одной ступени трансформации точным или приближенным приведением) и определяются результирующие сопротивления схем отдельных последовательностей относительно точки КЗ, а также результирующая ЭДС из схемы замещения прямой последовательности. Если схема замещения прямой последовательности со-держит более одной ЭДС, то их эквивалентирование производится относительно начала и конца схемы.
3. Определяют величину шунта короткого замыкания $x_{\Delta}^{(n)}$, где n – вид несимметричного КЗ.
4. По правилу эквивалентности прямой последовательности определяют величину тока прямой последовательности в относительных единицах:

$$I_{*к1}^{(n)} = \frac{E_{\Sigma}}{x_{1\Sigma} + x_{\Delta}^{(n)}}.$$

5. Вычисляют полный ток в месте КЗ с учетом коэффициента $m^{(n)}$, характеризующего рассчитываемый вид КЗ $I_{к} = I_{*к1}^{(n)} \cdot m^{(n)} \cdot I_{\sigma}$.

При необходимости все остальные величины симметричных составляющих токов и напряжений при любом несимметричном КЗ могут быть определены через ток прямой последовательности $I_{к1}^{(n)}$ по выражениям приведенным в [4].

6. Если расчет ведется по расчетным кривым с учетом индивидуального затухания токов отдельных генерирующих ветвей, то после нахождения результирующих сопротивлений в относительных единицах определяют расчетные сопротивления генерирующих ветвей. Зная суммарные сопротивления отдельных последовательностей, определяют расчетные сопротивления выделяемых генерирующих ветвей по выражению:

$$x_{*расч} = (x_{1\Sigma} + x_{\Delta}^{(n)}) \cdot \frac{S_{\Sigma i}}{S_{\sigma} \cdot C}$$

где $x_{1\Sigma}$ – суммарное сопротивление схемы замещения прямой последовательности в относительных единицах, приведенные к базисным условиям;

$S_{\Sigma i}$ – суммарная номинальная мощность генераторов выделенной ветви, МВА;

C – коэффициент токораспределения для той же ветви, определяемый из схемы замещения прямой последовательности.

По найденной расчетной реактивности при данном виде КЗ по соответствующим расчетным кривым находят значение относительного тока прямой последовательности в рассматриваемый момент времени t .

Если в схеме присутствует источник бесконечной мощности, то реактивность его ветви определяется как:

$$x = (x_{1c} + x_{\Delta}^{(n)}) / C_c,$$

где C_c – коэффициент токораспределения ветви системы.

Поскольку расчет данным методом является достаточно приближенным, то можно не подсчитывать суммарный реактанс схемы обратной последовательности, и принять $x_2 \approx x_1$.

Величина периодической составляющей тока в месте несимметричного КЗ при расчете по общему изменению будет равна:

$$I_{*t}^{(n)} = m^{(n)} \cdot I_{*kt(1)}^{(n)} \cdot I_{\Sigma n},$$

а по методу индивидуального затухания:

$$I_{*kt}^{(n)} = m^{(n)} \cdot \left(I_{*1t1}^{(n)} \cdot I_{\Sigma n1} + I_{*1t2}^{(n)} \cdot I_{\Sigma n2} + I_{\delta} / x_{*c} \right),$$

где $I_{\Sigma n1}$, $I_{\Sigma n2}$ – суммарные номинальные токи генераторов, приведенные к напряжению ступени КЗ;

$I_{*1t1}^{(n)}$, $I_{*1t2}^{(n)}$ – относительные токи прямой последовательности, найденные по расчетным кривым для выделенных ветвей 1, 2 и т.д.

7. Если при КЗ требуется определить токи и напряжение в других точках схемы, то симметричные составляющие токов и напряжений распределяются в схемах замещения соответствующих последовательностей. При этом необходимо учитывать группы соединения трансформаторов.

4.1. Определение токов несимметричных КЗ для различных моментов времени по типовым кривым

Для вычисления тока прямой последовательности несимметричного КЗ пользуются типовыми кривыми на основании правила эквивалентности прямой последовательности, которое гласит, что ток прямой последовательности соответствует току трехфазного КЗ за индуктивным

сопротивлением ($x_{\Delta}^{(n)}$) – называемым сопротивлением шунта $x_{1\Sigma} + x_{\Delta}^{(n)} = x_{\Sigma}^{(n)}$.

По току прямой последовательности для генерирующих ветвей вычисляют отношения $I_{1nГ}''/I_{Г.НОМ}$, а при необходимости также $I_{1nГ}''/I_{1n\Sigma}''$ и затем, пользуясь кривыми (рис. 3.8а и 3.8б) находят $I_{1ntГ}''/I_{1nГ}''$ или $I_{1nt\Sigma}''/I_{1n\Sigma}''$.

По найденным относительным токам прямой последовательности, пользуясь коэффициентами пропорциональности $m^{(n)}$ и зная токи прямой последовательности для $t = 0$, определяют полные токи несимметричного КЗ для заданных моментов времени.

Задача 4.1. Определить для начального момента времени ток двухфазного и однофазного КЗ в точке К (рис. 4.1).

Решение.

а) расчет тока при двухфазном КЗ.

1. Составляем схему замещения для прямой последовательности, при этом необходимо учитывать, что нагрузки удалены от точки КЗ и поэтому они не учитываются при составлении схем замещения.

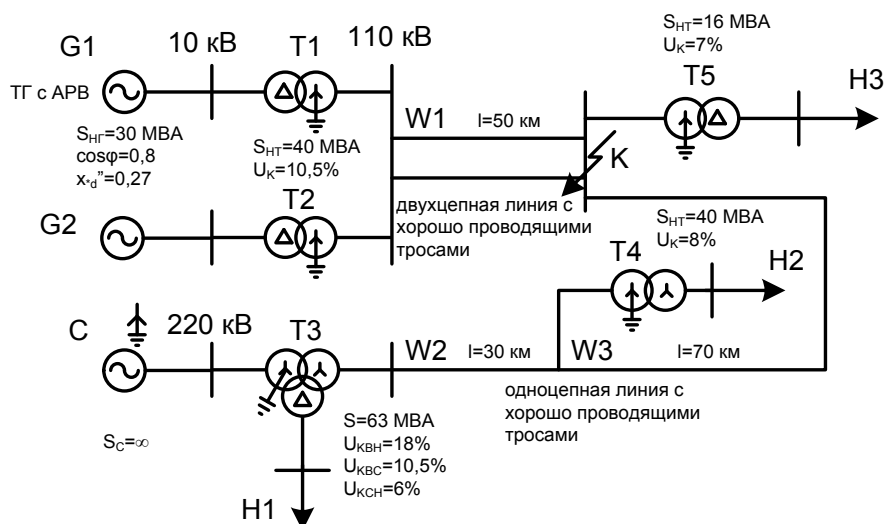


Рис. 4.1 – Исходная расчетная схема

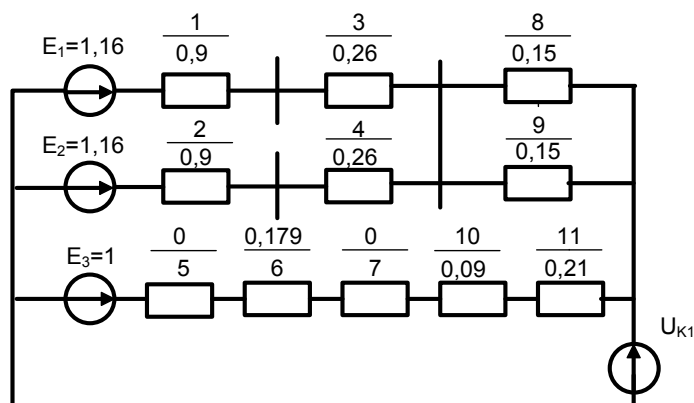


Рис. 4.2 – Схема замещения прямой последовательности

Аналитическое решение.

1. Задаемся базисными условиями

$$S_6=100 \text{ МВА}, \quad U_6=115 \text{ кВ},$$

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_6} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,5 \text{ кА}.$$

2. Определяем параметры элементов замещения прямой последовательности

$$\begin{array}{l} \text{G1,} \\ \text{G2:} \end{array} \quad x_1 = x_2 = x_{*d}'' \cdot \frac{S_6}{S_{\text{НГ}}} = 0,27 \cdot \frac{100}{30} = 0,9.$$

$$\text{C:} \quad x_5 = 0.$$

$$\begin{array}{l} \text{ЭДС:} \\ \text{ЭДС:} \end{array} \quad \begin{aligned} E_1'' = E_2'' &= U_* + I_* \cdot x_{*d}'' \cdot \sin \varphi \\ &= 1 + 1 \cdot 0,27 \cdot 0,6 = 1,16 \\ E_3'' &= 1. \end{aligned}$$

$$\begin{array}{l} \text{T1,} \\ \text{T2:} \end{array} \quad x_3 = x_4 = \frac{U_{\text{к\%}}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{H}}} = \frac{10,5 \cdot 100}{100 \cdot 40} = 0,26.$$

$$\begin{array}{l} \text{T3:} \\ \text{T3:} \end{array} \quad \begin{aligned} x_6 &= \frac{U_{\text{кв\%}}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{H}}} \\ &= \frac{0,5 \cdot (U_{\text{квн}} + U_{\text{квс}} - U_{\text{кчн}})}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{H}}} \\ &= \\ &= \frac{0,5 \cdot (18 + 10,5 - 6)}{100} \cdot \frac{100}{63} = 0,17, \end{aligned}$$

$$\begin{array}{l} \text{T3:} \\ \text{T3:} \end{array} \quad \begin{aligned} x_7 &= \frac{U_{\text{кч\%}}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{H}}} \\ &= \frac{0,5 \cdot (U_{\text{квс}} + U_{\text{кчн}} - U_{\text{квн}})}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{H}}} \\ &= \\ &= \frac{0,5 \cdot (10,5 + 6 - 18)}{100} \cdot \frac{100}{63} \approx 0. \end{aligned}$$

$$\begin{array}{l} \text{W1:} \\ \text{W1:} \end{array} \quad \begin{aligned} x_8 = x_9 &= x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{\text{срн}}^2} = 0,4 \cdot 50 \cdot \frac{100}{115^2} \\ &= 0,15. \end{aligned}$$

$$\text{W2:} \quad x_{10} = 0,4 \cdot 30 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,09.$$

$$W3: \quad x_{11} = 0,4 \cdot 70 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,21.$$

3. Преобразуем схему, т.е. определим результирующую ЭДС и результирующее сопротивление

$$x_{12} = \frac{x_1 + x_3}{2} = \frac{0,9 + 0,26}{2} = 0,58,$$

$$x_{13} = \frac{x_8}{2} = \frac{0,15}{2} = 0,075,$$

$$x_{14} = x_{12} + x_{13} = 0,58 + 0,075 = 0,655,$$

$$x_{15} = x_5 + x_6 + x_7 + x_{10} + x_{11} = 0 + 0,179 + 0 + 0,09 + 0,21 = 0,479,$$

$$x_{1\Sigma} = \frac{x_{14} \cdot x_{15}}{x_{14} + x_{15}} = \frac{0,655 \cdot 0,479}{0,655 + 0,479} = 0,277,$$

$$E_{\Sigma} = \frac{E_1 \cdot x_{15} + E_3 \cdot x_{14}}{x_{14} + x_{15}} = \frac{1,16 \cdot 0,479 + 1 \cdot 0,655}{0,655 + 0,479} = 1,07.$$

4. Составляем схему замещения для обратной последовательности.
5.

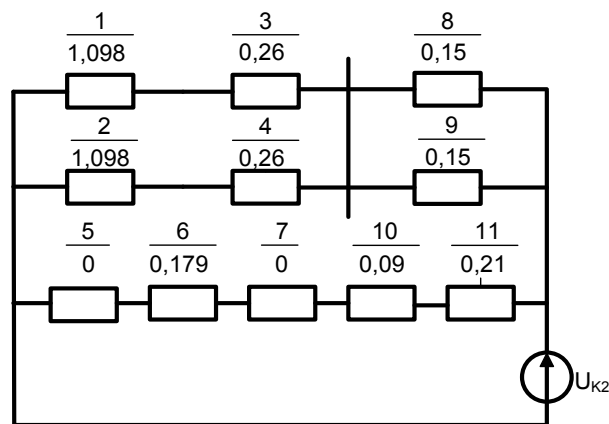


Рис. 4.3 – схема замещения обратной последовательности

5. Сопротивления обратной последовательности всех элементов схемы, кроме генераторов, равны сопротивлениям прямой последовательности. Для генераторов с демпферными обмотками имеем:

$$x_1 = x_2 = 1,22 \cdot x_d'' \cdot \frac{S_6}{S_{НГ}} = 1,22 \cdot 0,27 \cdot \frac{100}{30} = 1,098$$

После аналогичного преобразования схемы замещения обратной последовательности получим:

$$x_{2\Sigma} = 0,293.$$

6. Ток прямой последовательности в месте КЗ:

$$I_{K1}'' = \frac{E_{\Sigma}}{x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma}} = \frac{1,07}{0,277 + 0,293} = 1,877.$$

6. Ток в поврежденных фазах в месте КЗ в именованных единицах:

$$I_K'' = m^{(2)} \cdot I_{K1}'' \cdot I_6 = \sqrt{3} \cdot 1,877 \cdot 0,5 = 1,625 \text{ кА}.$$

Решение с использованием расчетных кривых.

1. В схеме замещения прямой последовательности выделяем две генерирующие ветви: станция с генераторами G1 и G2 и система (рис. 4.4). Сопротивления прямой последовательности ветвей берем из предыдущего расчета.

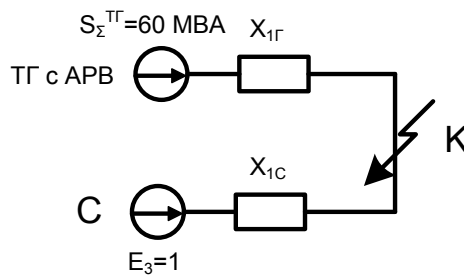
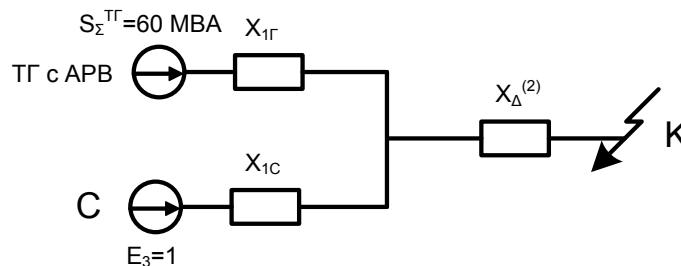


Рис. 4.4 – Схема замещения для расчета с использованием расчетных кривых

2. При расчете по расчетным кривым сопротивление обратной последовательности для генераторов можно принять равным сопротивлению прямой последовательности ($x_{2Г} = x_{1Г}$) [2]. С учетом этого преобразовав схему замещения обратной последовательности будем иметь:

$$x_{2\Sigma} = 0,277.$$

3. Согласно правилу эквивалентности прямой последовательности, в схеме замещения прямой последовательности точку КЗ удалим на величину шунта $x_{\Delta}^{(2)} = x_{2\Sigma}$.



4. Используя метод коэффициентов токораспределения перейдем к лучевой схеме и определим расчетную реактивность генерирующих ветвей G1 и G2:

$$x_{\text{расч1}} = \frac{x_{1\Sigma} + x_{\Delta}^{(2)}}{C_1} \cdot \frac{S_{\Sigma}^{\text{ТГ}}}{S_{\text{НГ}}} = \frac{0,277 + 0,277}{0,422} \cdot \frac{60}{100} = 0,787.$$

Расчетная реактивность ветви системы:

$$x_{\text{расч2}} = \frac{x_{1\Sigma} + x_{\Delta}^{(2)}}{C_2} = \frac{0,277 + 0,277}{0,578} = 0,958.$$

5. По расчетным кривым для турбогенераторов с АРВ определяем периодическую составляющую тока прямой последовательности от генераторов:

$$I_{\text{нк1}}^{(2)} = 1,37.$$

7. Полный ток в поврежденных фазах в месте КЗ:

$$\begin{aligned} I_{\text{К}}^{(2)} &= m^{(2)} \cdot \left(I_{\text{нк1}}^{(2)} \cdot I_{\text{Н}\Sigma} + I_{\text{б}} \cdot \frac{1}{x_{\text{расч}}} \right) = \\ &= \sqrt{3} \cdot \left(1,37 \cdot 0,3 + 0,5 \cdot \frac{1}{0,958} \right) = 1,616 \text{ кА} \end{aligned}$$

где

$$I_{\text{Н}\Sigma} = \frac{2 \cdot S_{\text{НГ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{б}}} = \frac{2 \cdot 30}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,3 \text{ кА}.$$

б) Расчет тока при однофазном КЗ.

Для расчета тока однофазного КЗ необходимо составить и рассчитать схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей. Схемы прямой и обратной последовательностей рассчитаны ранее. Схема замещения нулевой последовательности приведена на рис. 4.5.

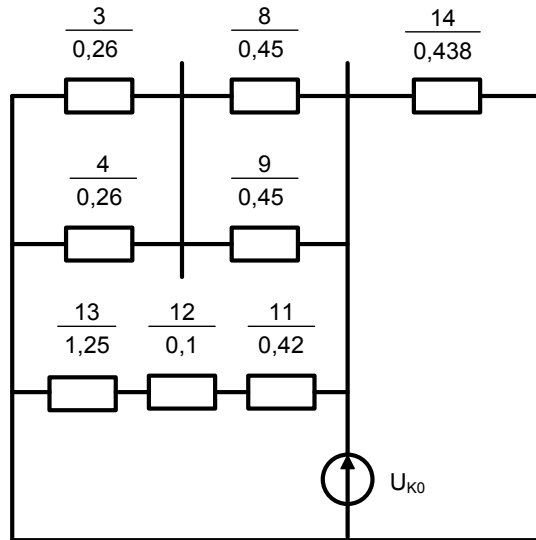


Рис. 4.5 – Схема замещения нулевой последовательности

1. Сопротивления нулевой последовательности элементов схемы в относительных единицах:

$$\begin{array}{l} T1, \\ T2: \end{array} \quad x_{3(0)} = x_{4(0)} = 0,26,$$

$$x_{12(0)} = 0,5 \cdot \frac{U_{к\%}}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_H} = \frac{0,5 \cdot 8 \cdot 100}{100 \cdot 40} = 0,1,$$

$$\begin{array}{l} T4 \\ T5 \end{array} \quad x_{13(0)} = x_{\mu 0} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_H} = \frac{(0,3 \div 1) \cdot S_{\delta}}{S_H} = \frac{0,5 \cdot 100}{40} = 1,25,$$

$$x_{14(0)} = \frac{U_{к\%}}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_H} = \frac{7 \cdot 100}{100 \cdot 16} = 0,438,$$

$$W1: \quad x_{8(0)} = x_{9(0)} = 3 \cdot x_{8(1)} = 3 \cdot 0,15 = 0,45,$$

$$W3: \quad x_{11(0)} = 2 \cdot x_{11(1)} = 2 \cdot 0,21 = 0,42.$$

2. Результирующее сопротивление схемы нулевой последовательности:

$$\begin{aligned} x_{0\Sigma} &= \left(x_{14(0)} \parallel \frac{(x_{3(0)} + x_{8(0)})}{2} \right) \parallel (x_{11} + x_{12} + x_{13}) = \\ &= \left(0,438 \parallel \frac{(0,26 + 0,45)}{2} \right) \parallel (0,42 + 0,1 + 1,25) = 0,176. \end{aligned}$$

3. Ток прямой последовательности в месте КЗ:

$$I_{K1}''^{(1)} = \frac{E_{\Sigma}''}{x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} = \frac{1,07}{0,277 + 0,293 + 0,176} = 1,43.$$

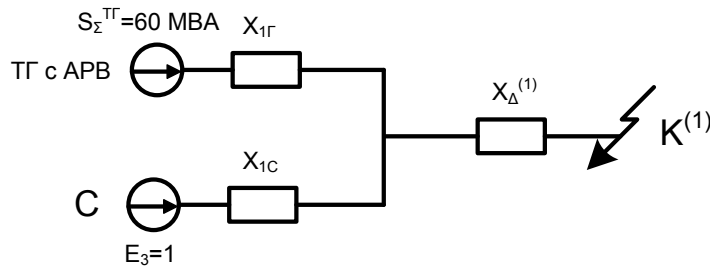
4. Полный ток в месте КЗ:

$$I_K''^{(1)} = m^{(1)} \cdot I_{K1}''^{(1)} \cdot I_6 = 3 \cdot 1,43 \cdot 0,5 = 2,145 \text{ кА.}$$

Расчет с использованием расчетных кривых.

1. Согласно правилу эквивалентности прямой последовательности в схеме прямой последовательности точку КЗ удалим на величину шунта:

$$x_{\Delta}^{(1)} = x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}.$$



$$x_{1Г} = 0,655,$$

$$x_{1С} = 0,479,$$

$$x_{\Delta}^{(1)} = 0,277 + 0,176 = 0,453.$$

2. Найдем коэффициенты токораспределения ветвей, характеризующие долю их участия в питании КЗ:

$$C_1 = \frac{(x_{1Г} \parallel x_{1С})}{x_{1Г}} = \frac{0,655 \cdot 0,479}{0,655 + 0,479} \cdot \frac{1}{0,655} = 0,422,$$

$$C_2 = \frac{(x_{1Г} \parallel x_{1С})}{x_{1С}} = \frac{0,655 \cdot 0,479}{0,655 + 0,479} \cdot \frac{1}{0,479} = 0,578,$$

3. Сопротивления ветвей будут:

$$x_{\Sigma} = (x_{1Г} \parallel x_{1С}) + x_{\Delta}^{(1)} = \frac{0,655 \cdot 0,479}{0,655 + 0,479} + 0,453 = 0,73,$$

$$x_{Г} = \frac{x_{\Sigma}}{C_1} = \frac{0,73}{0,422} = 1,73,$$

$$x_{С} = \frac{x_{\Sigma}}{C_2} = \frac{0,73}{0,578} = 1,26.$$

4. Определяем расчетные сопротивления ветвей:

$$\text{ТГ:} \quad x_{\text{расч1}} = x_{\text{Г}} \cdot \frac{S_{\Sigma\text{Г}}}{S_{\text{б}}} = 1,73 \cdot \frac{60}{100} = 1,038,$$

$$\text{С:} \quad x_{\text{расч2}} = x_{\text{с}} = 1,26.$$

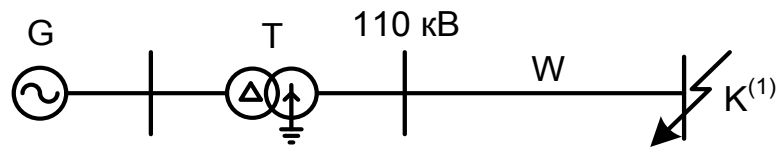
5. По расчетным кривым для ТГ с АРВ определяем периодическую составляющую тока прямой последовательности от ветви генераторов:

$$I_{\text{нк1}}^{(1)} = 0,72.$$

6. Полный ток в месте КЗ будет:

$$\begin{aligned} I_{\text{к}}^{(1)} &= m^{(1)} \cdot \left(I_{\text{нк1}}^{(1)} \cdot I_{\text{н}\Sigma} + \frac{1}{x_{\text{расч2}}} \cdot I_{\text{б}} \right) = \\ &= 3 \cdot \left(0,72 \cdot 0,3 + \frac{1}{1,26} \cdot 0,5 \right) = 1,84 \text{ кА.} \end{aligned}$$

Задача 4.2. Определить ударный ток при однофазном КЗ для схемы:

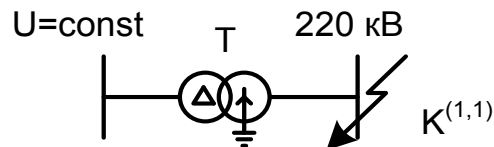


$$\text{G: } S_{\text{н}} = 200 \text{ МВА; } \cos\varphi = 0,8; x_d'' = 0,2.$$

$$\text{T: } S_{\text{н}} = 160 \text{ МВА, } U_{\text{к}} = 10 \text{ \%}.$$

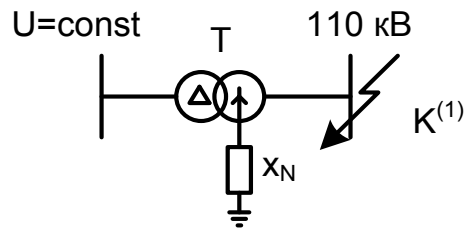
$$\text{W: } l=70 \text{ км.}$$

Задача 4.3. Определить ток, протекающий через нейтраль трансформатора при двухфазном КЗ на землю для схемы:



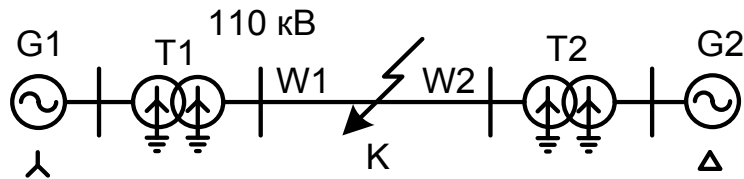
$$\text{T: } S_{\text{н}} = 125 \text{ МВА, } U_{\text{к}} = 10 \text{ \%}.$$

Задача 4.4. Определить сопротивление заземления нейтрали трансформатора, чтобы снизить ток однофазного КЗ в 2 раза по отношению к трехфазному.



T: $S_H = 100 \text{ MVA}$, $U_K = 10 \%$.

Задача 4.5. Определить результирующее сопротивление нулевой последовательности при поперечной несимметрии для схемы:

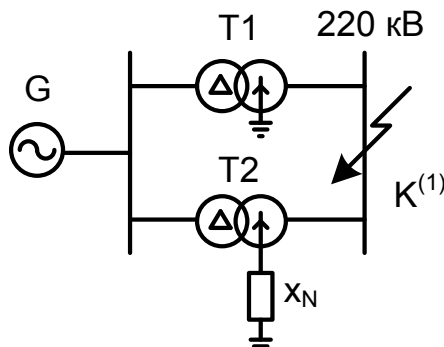


G1, G2: $S_H = 125 \text{ MVA}$; $\cos\varphi = 0,8$; $x_d'' = 0,12$.

T1, T2: $S_H = 125 \text{ MVA}$, $U_K = 10 \%$.

W: $l=50 \text{ км}$.

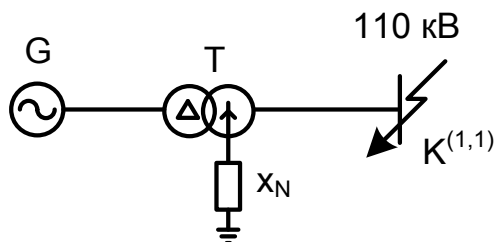
Задача 4.6. Определить ток однофазного КЗ для схемы:



G: $S_H = 63 \text{ MVA}$, $\cos\varphi = 0,8$; $x_d'' = 0,18$.

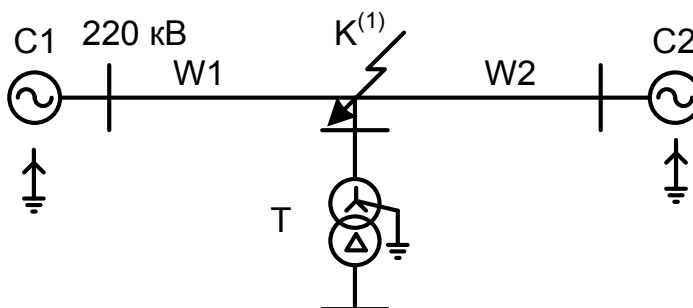
T1, T2: $S_H = 80 \text{ MVA}$, $U_K = 9 \%$; $X_N = 10 \text{ Ом}$.

Задача 4.7. Определить ток двухфазного КЗ на землю и ток в нейтрали трансформатора для схемы:



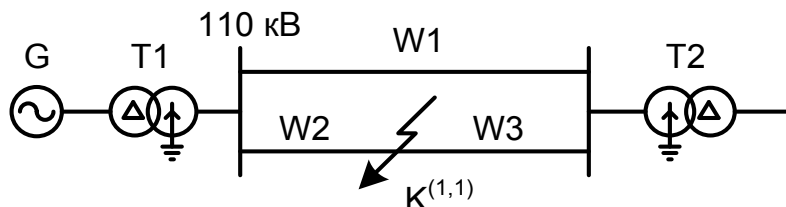
G: $S_H = 130 \text{ MVA}$; $\cos\varphi = 0,8$; $x_d'' = 0,2$; $x_2 = 0,28$.
 T: $S_H = 160 \text{ MVA}$, $U_K = 10,5 \%$; $X_N = 15 \text{ Ом}$.

Задача 4.8. Определить ударный ток однофазного КЗ и напряжения в неповрежденных фазах для схемы:



C1: $S_1 = 2000 \text{ MVA}$; $x_{c1} = 0,7$; $x_{c2} = 0,7$; $x_{c0} = 0,95$.
 C2: $S_2 = 1000 \text{ MVA}$; $x_{c1} = 0,3$; $x_{c2} = 0,3$; $x_{c0} = 0,65$.
 T: $S_H = 40 \text{ MVA}$, $U_K = 10,5 \%$.
 W1: $l = 120 \text{ км}$; $x_0 = 2x_1$.
 W2: $l = 90 \text{ км}$; $x_0 = 2x_1$.

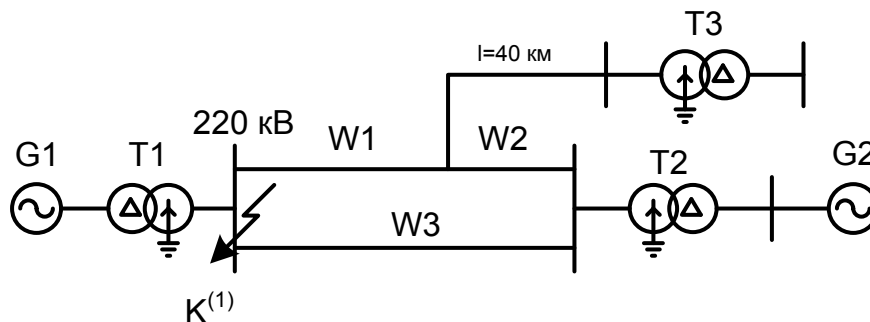
Задача 4.9. По типовым кривым определить сверхпереходный ток двухфазного КЗ на землю для схемы:



G: $P_H = 200 \text{ МВт}$; $\cos\varphi = 0,85$; $x_d'' = 0,138 \approx x_2$, $U_H = 13,8 \text{ кВ}$.
 T1: $S_H = 250 \text{ MVA}$, $U_K = 10,5 \%$.
 T2: $S_H = 100 \text{ MVA}$, $U_K = 9,7 \%$.
 W1: $l = 80 \text{ км}$; $x_0 = 3,5x_1$ – без учета влияния соседней цепи;
 $x_{0 \text{ I-II}} = 2x_1$ – реактивность взаимоиндукции между цепями в нулевой последовательности;
 W2: $l = 30 \text{ км}$; W3: $l = 50 \text{ км}$.

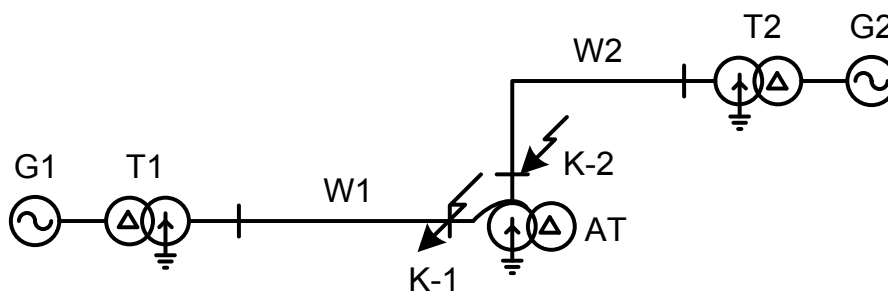
Задача 4.10. Определить сверхпереходный ток однофазного КЗ для схемы, приведенной ниже.

G1: $S_H = 117$ МВА; $\cos\varphi = 0,8$; $x_d'' = 0,2 \approx x_2$;
 G2: $S_H = 63$ МВА; $\cos\varphi = 0,8$; $x_d'' = 0,15 \approx x_2$;
 T1: $S_H = 125$ МВА, $U_K = 10,5\%$; T2: $S_H = 80$ МВА, $U_K = 8,5\%$;
 T3: $S_H = 60$ МВА, $U_K = 10,5\%$.
 W1: $l=100$ км; W2: $l=40$ км; W3: $l=140$ км;
 $x_0 = 3,5x_1$ – влияние соседних цепей не учитывать.



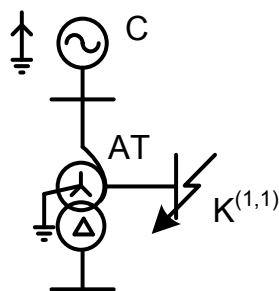
Задача 4.11. При однофазном КЗ поочередно в точках К-1 и К-2 схемы определить начальные сверхпереходные токи нулевой последовательности в линиях W1 и W2 и в нейтрали автотрансформатора АТ. Определение произвести для условий, когда у автотрансформатора АТ:

- имеется третья обмотка;
- третья обмотка отсутствует (или разомкнута). До КЗ оба генератора работали на холостом ходу с номинальным напряжением.



G1: $S_H = 117$ МВА; $\cos\varphi = 0,8$; $x_d'' = 0,133 \approx x_2$; $U_H = 10,5$ кВ
 G2: $S_H = 120$ МВА; $\cos\varphi = 0,8$; $x_d'' = 0,285 \approx x_2$; $U_H = 6,3$ кВ
 T1: $S_H = 120$ МВА, $U_K = 12\%$; $n_T = 230/10,5$;
 T2: $S_H = 60$ МВА, $U_K = 5,2\%$; $n_T = 115/6,3$;
 АТ: $S_H = 80$ МВА, $U_{КВС} = 8\%$; $U_{КВН} = 30\%$; $U_{КСН} = 20\%$;
 $n_T = 230/115/6,3$;
 W1: $l=100$ км; $x_0 = 2x_1$; W2: $l=62$ км; $x_0 = 3x_1$.

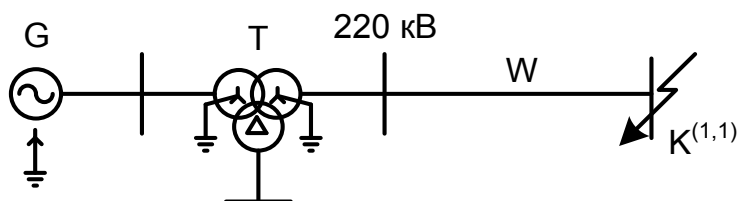
Задача 4.12. Определить сверхпереходный ток двухфазного КЗ на землю и напряжение в неповрежденной фазе для схемы:



$$G: S = \infty;$$

$$AT: S_H = 125 \text{ MVA}, U_{KBC} = 10,5 \%; U_{KBH} = 36,3 \%; U_{KCH} = 23 \%; \\ n_T = 230/115/10,5;$$

Задача 4.13. Определить ток нулевой последовательности при двухфазном КЗ на землю для схемы:

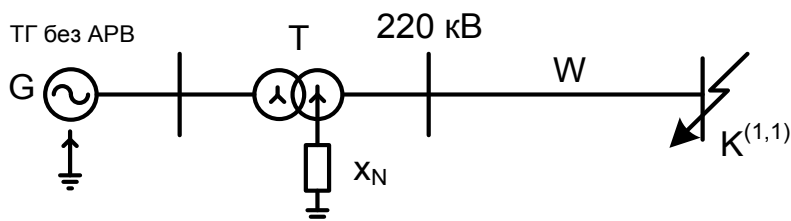


$$G: S_H = 63 \text{ MVA}; x_d'' = 0,18; \cos\varphi = 0,8;$$

$$T: S_H = 63 \text{ MVA}, U_{KBC} = 10,5 \%; U_{KBH} = 18 \%; U_{KCH} = 6 \%;$$

$$W: l=120 \text{ км}; x_0 = 2x_1.$$

Задача 4.14. Определить установившийся ток при двухфазном КЗ на землю.

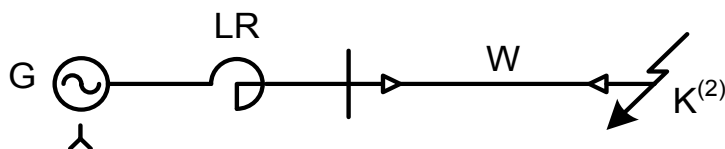


$$G: P_H = 80 \text{ МВт}; x_d'' = 0,18; \cos\varphi = 0,8; K_c = 0,65; I_{*H} = 0,7;$$

$$T: S_H = 125 \text{ MVA}, U_K = 10,5 \%.$$

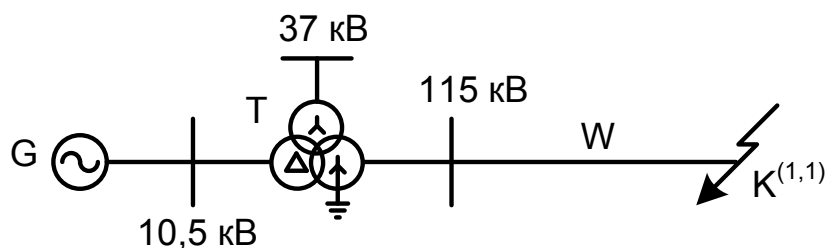
$$W: l=100 \text{ км}; x_0 = 3x_1; X_{*N} = 0,9.$$

Задача 4.15. Определить установившийся ток при двухфазном КЗ для схемы:



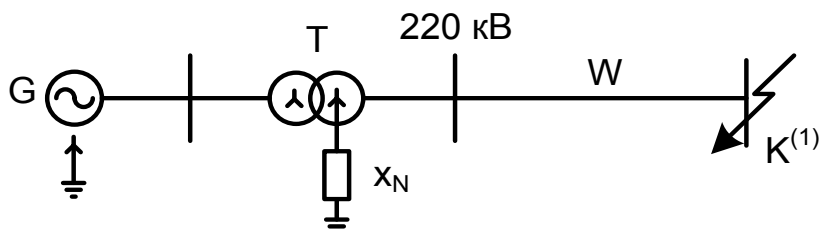
G: ТГ с АРВ; $P_H = 60$ МВт; $x_d'' = 0,15$; $\cos\varphi = 0,8$; $K_c = 0,8$; $I_{*fnp} = 3,2$;
 W: $l=6$ км; LR: $U_H = 10$ кВ; $x_p = 0,24$ Ом; $I_H = 1000$ А.

Задача 4.16. Определить напряжение прямой последовательности для двухфазного КЗ на землю в схеме:



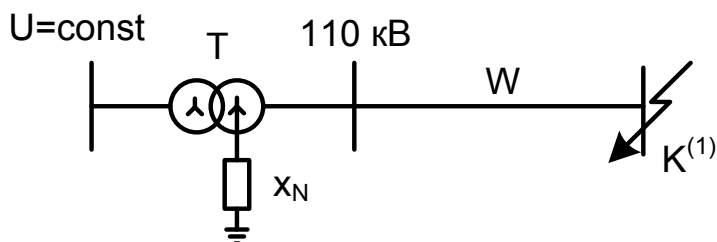
G: $P_H = 120$ МВт; $x_d'' = 0,2$; $\cos\varphi = 0,85$; $x_2 = 0,22$; $x_0 = 0,05$; $I_H = 0,9$;
 T: $S_H = 160$ МВА, $U_{квс} = 11\%$; $U_{квн} = 32\%$; $U_{кчн} = 20\%$;
 W: $l=90$ км; $x_0 = 2x_1$.

Задача 4.17. По расчетным кривым определить ударный ток однофазного КЗ и ток в нейтрали трансформатора для схемы:



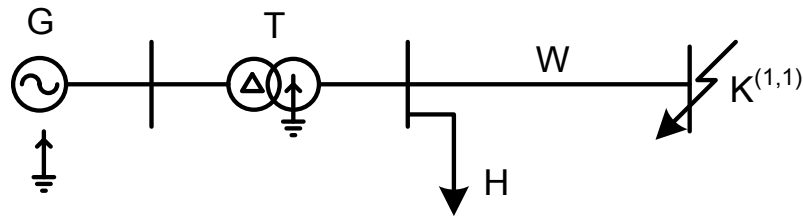
G: ТГ с АРВ; $P_H = 160$ МВт; $x_d'' = 0,25$; $\cos\varphi = 0,85$; $x_2 = x_1$; $x_0 = 0,08$;
 T: $S_H = 200$ МВА, $U_K = 10\%$; $X_N = 4$ Ом..
 W: $l=120$ км; $x_0 = 3x_1$.

Задача 4.18. Определить ударный ток однофазного КЗ.



T: $S_H = 125$ МВА, $U_K = 10,5\%$; $X_{*N} = 0,5$;
 W: $l=80$ км; $x_0 = 2x_1$.

Задача 4.19. Определить по расчетным кривым установившийся ток при двухфазном КЗ на землю.



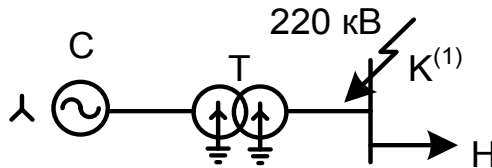
G: ГГ с АРВ; $P_H = 100$ МВт; $\cos\varphi = 0,8$; $x_d'' = 0,18$;

T: $S_H = 125$ МВА, $U_K = 10$ %.

H: $S_H = 20$ МВА;

W: $l=80$ км; $x_0 = 2,5x_1$.

Задача 4.20. Определить ударный ток в месте однофазного КЗ для схемы:

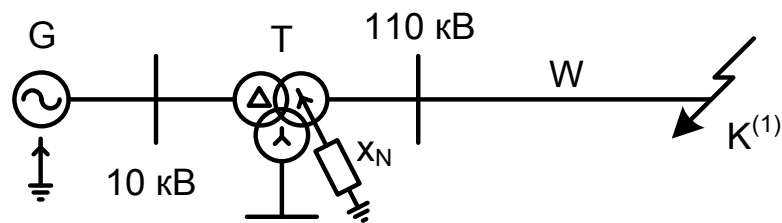


C: $S_{кз} = 2000$ МВА;

T: $S_H = 160$ МВА, $U_K = 10,5$ %.

H: $S_H = 40$ МВА.

Задача 4.21. Определить ток установившегося режима, протекающий через нейтраль трансформатора при однофазном КЗ.



G: $P_H = 63$ МВт; $x_d'' = 0,18$; $\cos\varphi = 0,8$; $K_C = 0,8$; $I_{*H} = 0,9$;

T: $S_H = 80$ МВА, $U_{квс} = 7$ %; $U_{квн} = 18,5$ %; $U_{кчн} = 11$ %; $X_{*N} = 0,7$.

Литература

1. Методы расчета токов короткого замыкания: сборник задач / Н.Н. Волков [и др.]. – М.: МЭИ, 2000. – 56 с.
2. Крючков, И.П. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах: учебное пособие для вузов / И.П. Крючков. – М.: МЭИ, 2000.
3. Крючков, И.П. Практические методы расчета токов короткого замыкания / И.П. Крючков. – М.: МЭИ, 1993.
4. Будницкий, А.Б. Токи короткого замыкания / А.Б. Будницкий, М.Л. Колниболотский. – Киев: Гос. изд-во техн. лит-ры УССР, 1960.
5. Ульянов, С.А. Сборник задач по электромагнитным переходным процессам в электрических системах / С.А. Ульянов. – М.: Энергия, 1968.
6. Евминов, Л.И. Электромагнитные переходные процессы в системах электроснабжения: учебное пособие для студентов специальности «Электроэнергетика» высших учебных заведений / Л.И. Евминов. – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2003. – 301 с.
7. Беляева, Е.Н. Как рассчитать ток короткого замыкания / Е.Н. Беляева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 130 с.

2.4 «Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах». Методическое пособие к курсовой работе по дисциплине «Переходные процессы в электроэнергетических системах».

Введение

Пояснения к курсовой работе

1. Общие сведения о переходных процессах

Надежность работы электрической системы и ее отдельных элементов в значительной степени зависит от того, насколько правильно и полно при ее проектировании учтены опасные проявления переходных процессов.

Под переходными процессами понимают процесс перехода от одного режима работы электрической цепи к другому, отличающемуся чем-либо от предыдущего (например, амплитудой и фазой тока, частотой, значениями параметров схемы и пр.).

Переходные процессы возникают в электрических системах как при нормальной эксплуатации (включение и отключение нагрузок, источников питания, отдельных цепей, производство испытаний и пр.), так и в аварийных условиях (короткое замыкание, обрыв одной или двух фаз и т.д.).

Возникновение переходного процесса связано, с одной стороны, с изменением электромагнитного равновесия электрической системы, с другой, - нарушением баланса между электромагнитным моментом и моментом на валу электрической машины.

Исследование переходных процессов для многих задач можно в какой-то степени идеализировать, учитывая то обстоятельство, что благодаря довольно большой постоянной инерции электрических машин скорость протекания электромагнитных и электромеханических процессов различна.

Это позволяет в принципе единые по природе переходные процессы условно разделить на электромагнитные и электромеханические переходные процессы.

В настоящих методических указаниях рассматриваются только электромагнитные переходные процессы, вызванные коротким замыканием (КЗ) и местной несимметрией в сети (обрыв одной или двух фаз).

При изучении данного курса студент должен, в первую очередь, иметь четкое и ясное представление о физической природе переходных процессов. Не следует стремиться к механическому запоминанию громоздких формул. Необходимо четко представлять исходные положения при постановке задачи, основные этапы выводов и доказательств и уметь правильно формулировать и применять полученные при решении задачи результаты.

2. Общие сведения о коротких замыканиях.

Замыканием называется всякое случайное или преднамеренное соединение между собой двух или более различных точек электрической цепи или сети. Коротким замыканием (КЗ) называется замыкание, приводящее к резкому изменению параметров режима электрической цепи или сети.

В системе с изолированной нейтралью замыкание одной из фаз на землю называется "простым замыканием". Основной причиной КЗ является нарушение изоляции электрического оборудования. Эти нарушения вызываются: перенапряжением, прямыми ударами молнии, старением изоляционных материалов, недостаточно тщательным уходом за оборудованием и непосредственными механическими повреждениями. К КЗ могут приводить ошибочные действия эксплуатационного персонала и перекрытия токоведущих частей животными или птицами.

Чаще всего КЗ происходит через переходное сопротивление электрической дуги, возникающей в месте повреждения изоляции. Иногда возникают металлические КЗ без переходного сопротивления. В дальнейшем для определения наиболее возможных токов КЗ рассматриваются лишь металлические КЗ.

В трехфазной системе возможны следующие виды коротких замыканий: трехфазное – $K^{(3)}$; двухфазное – $K^{(2)}$; однофазное – $K^{(1)}$; двухфазное на землю – $K^{(1,1)}$. Практически чаще всего встречаются однофазные КЗ (около 65%) и значительно реже – трехфазное КЗ (около 5%).

Трехфазное КЗ является симметричным, так как при нем все фазы остаются в одинаковых условиях, и симметрия токов (периодических составляющих) и напряжений не нарушается.

Остальные виды КЗ являются несимметричными.

Помимо КЗ в одной точке возможны КЗ одновременно в различных точках сети, а также КЗ с одновременным обрывом одной из фаз или другим нарушением симметрии трехфазной цепи. Эти нарушения режима относятся к сложным видам повреждений.

Последствиями коротких замыканий являются резкое увеличение тока в короткозамкнутой цепи и снижение напряжения в электрической сети, особенно вблизи места повреждения. Увеличение тока приводит к значительным механическим воздействиям на токоведущие части и изоляторы, на обмотки электрических машин. Прохождение больших токов вызывает повышенный нагрев токоведущих частей и изоляции, что может привести к дальнейшему развитию аварии.

Резкое снижение напряжения при КЗ может привести к нарушению устойчивости параллельной работы генераторов и к системной аварии с большим народнохозяйственным ущербом.

Величина тока КЗ зависит от мощности генерирующих источников, электрической удаленности этих источников от места КЗ, вида КЗ, времени с момента возникновения КЗ.

Для уменьшения последствий КЗ необходимо как можно быстрее отключить поврежденный участок, что достигается применением быстродействующих выключателей и релейной защиты с минимальной выдержкой времени. Немаловажную роль играют автоматическое регулирование и форсировка возбуждения генераторов, позволяющие поддерживать напряжение в аварийном режиме на необходимом уровне. Все электрические аппараты и токоведущие части электрических станций должны быть выбраны таким образом, чтобы исключалось их разрушение при прохождении по ним наибольших возможных токов КЗ, в связи с чем возникает необходимость расчета этих величин.

Данный предмет имеет прикладной характер, поэтому для лучшего усвоения курса студенты специальностей I-43.01.01, I-43.01.02, I-43.01.03 и I-53.01.04 всех видов обучения выполняют курсовую работу, которая посвящена расчету токов КЗ.

3. Задание на курсовую работу и график ее выполнения.

При проектировании электрических систем и систем электроснабжения, а также в процессе их эксплуатации требуется производить ряд расчетов, среди которых важное место занимают расчеты процесса КЗ. Под расчетом процесса КЗ понимается вычисление токов и напряжений при заданном виде КЗ.

В связи с этим темой курсовой работы является определение аварийных токов и напряжений в электрической системе при внезапных КЗ, определяющих электромагнитный переходный процесс при заданных условиях.

Каждому студенту выдается индивидуальное задание на курсовую работу, которое разрабатывается руководителем и утверждается на кафедре. В задании на работу указывается номер схемы электрической системы (рис. 1÷4), данные параметров элементов системы (табл. 1), место и виды повреждений.

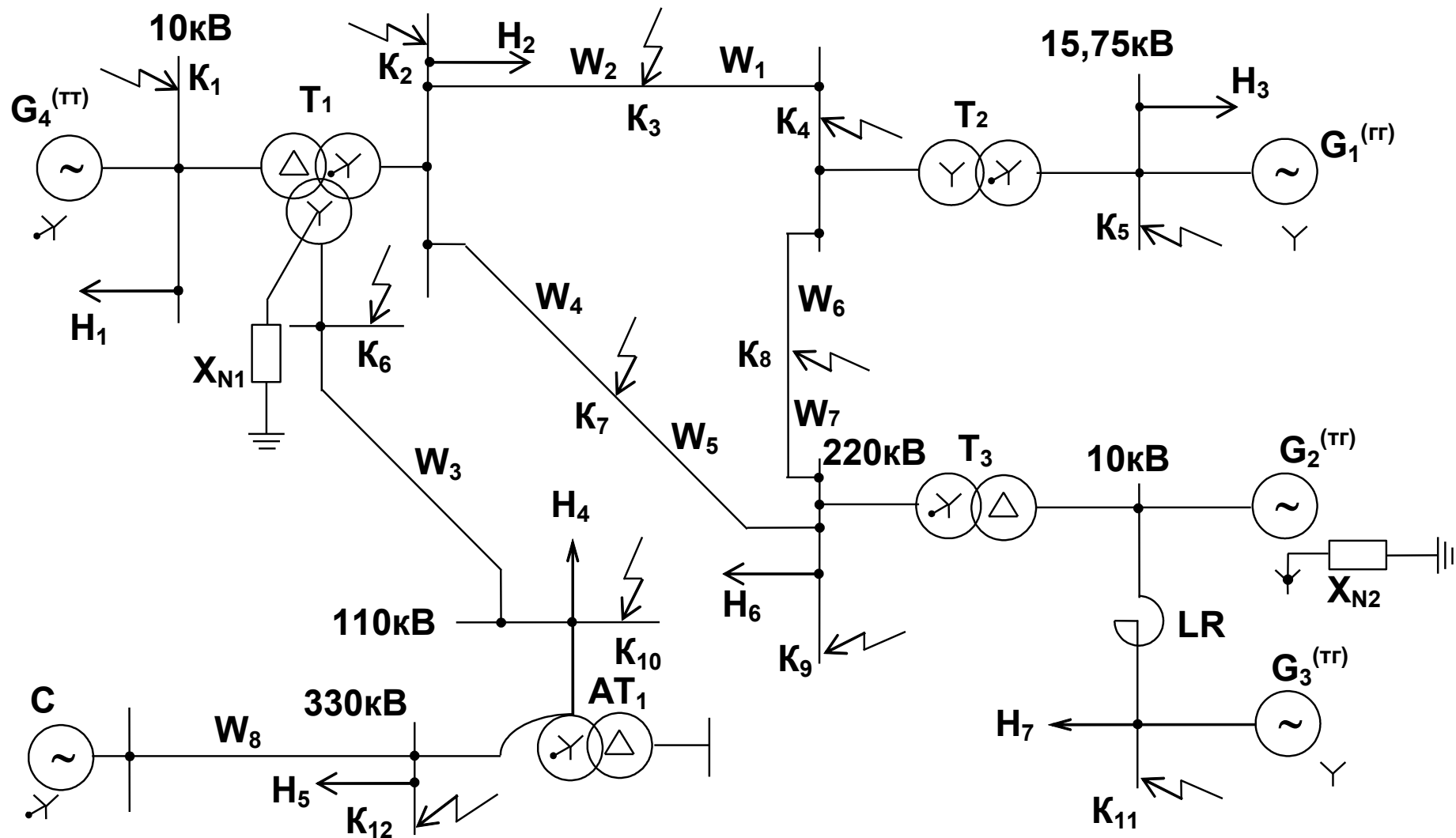


Рис. 1

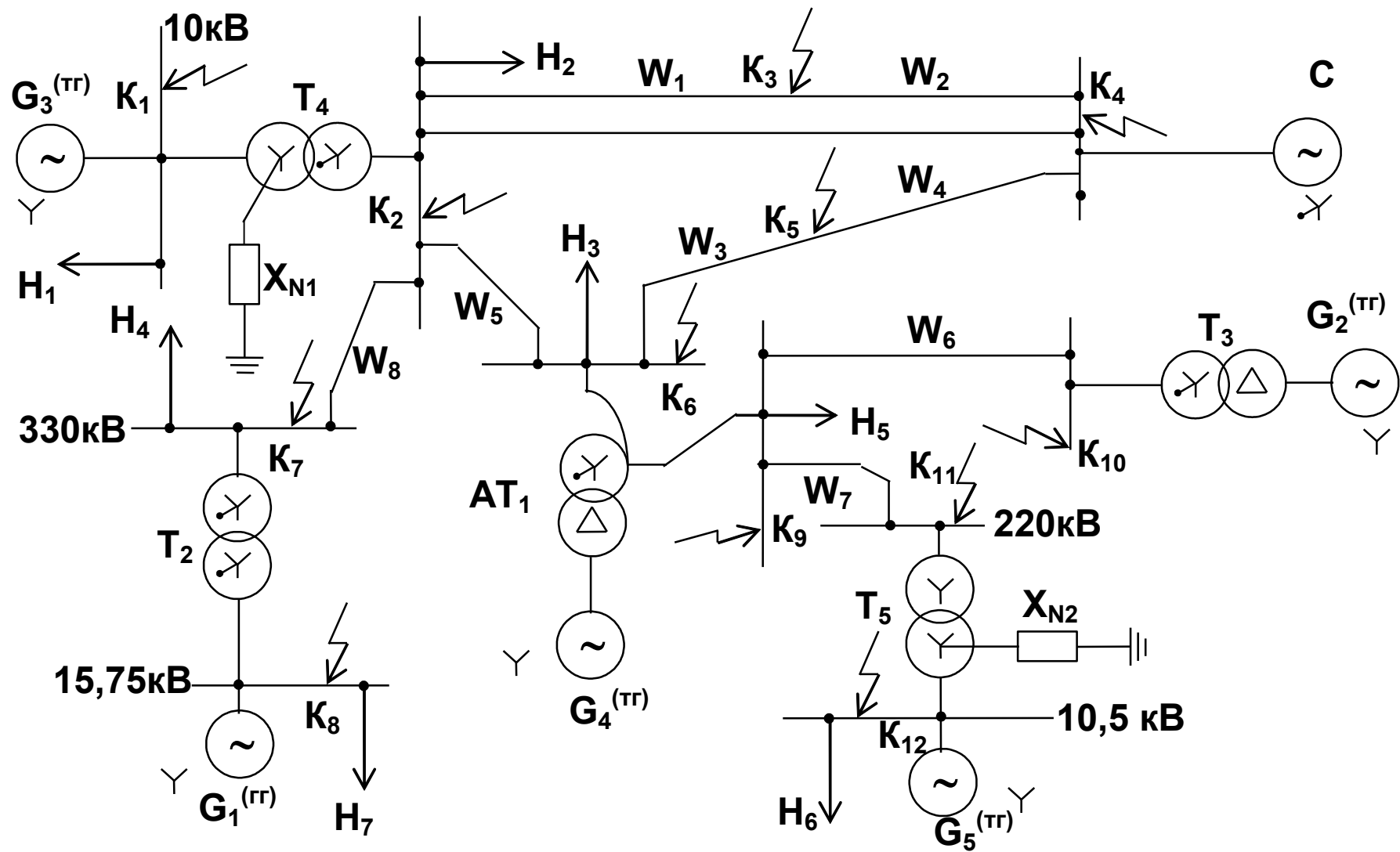


Рис. 2

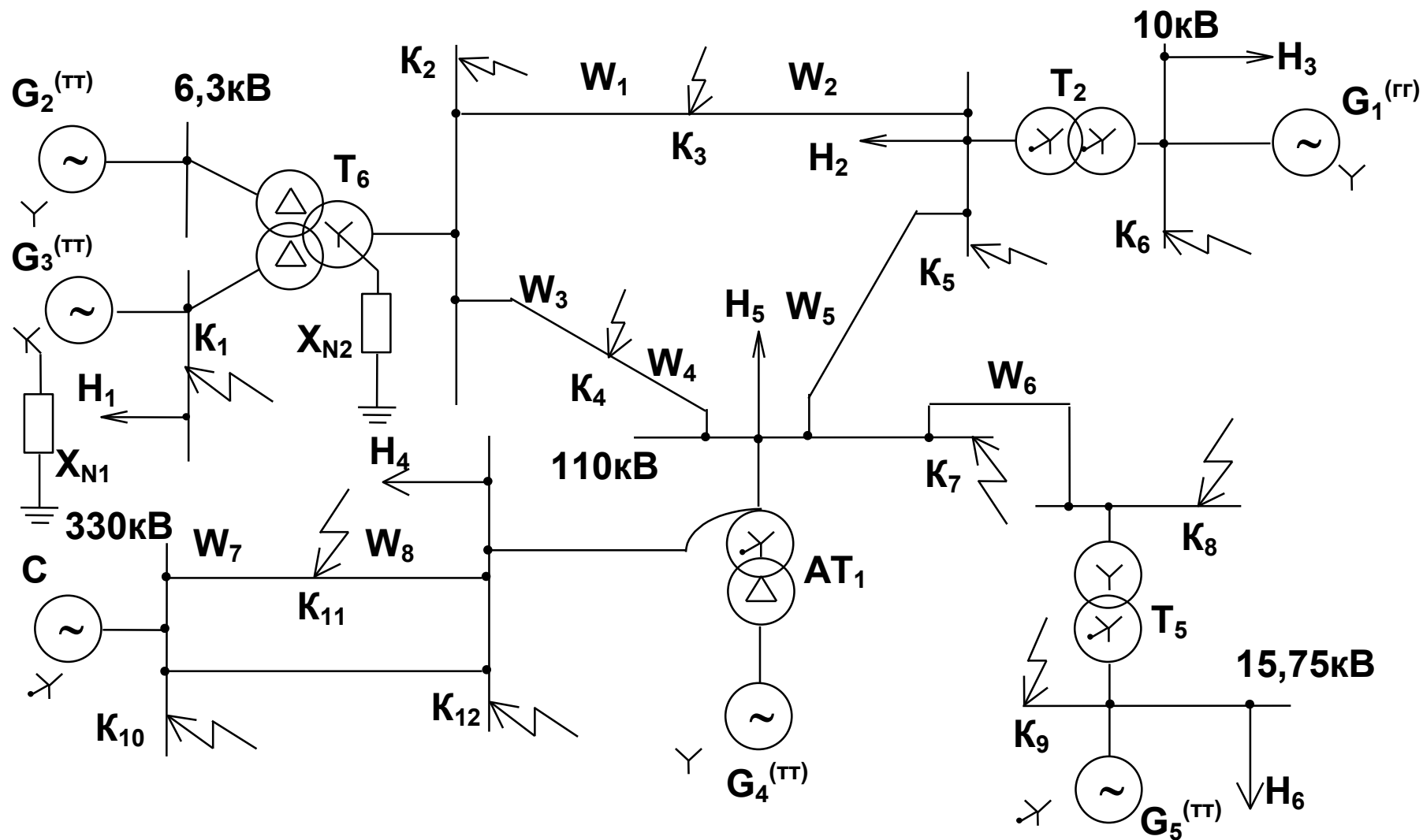


Рис. 3

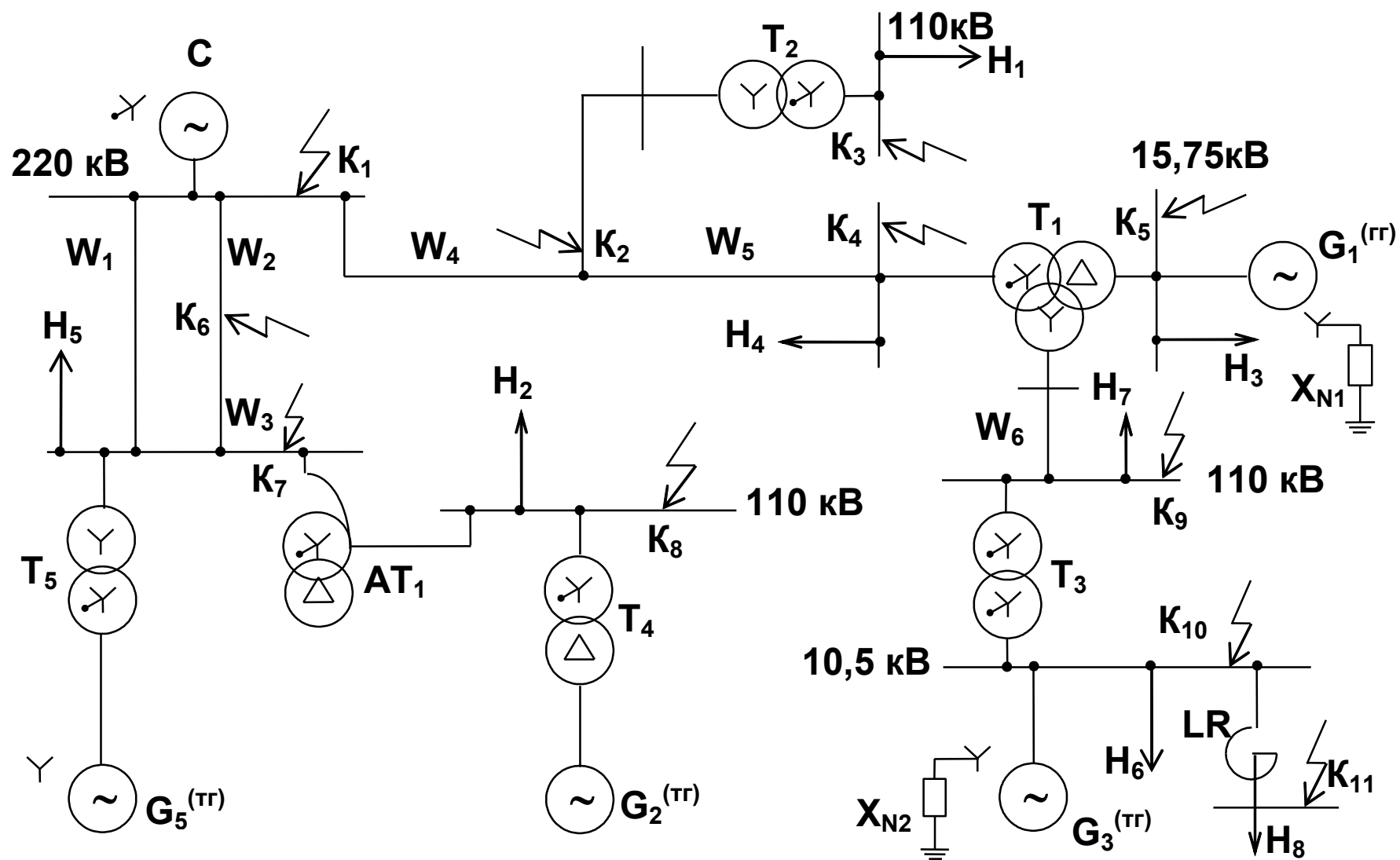


Рис. 4

Таблица 1

Обозначение на схеме	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
1	2	3	4
C	$S_H=1600 \text{ MB}\cdot\text{A}$ $X_{*H}=0,31$ $X_{*2}=0,48$ $X_{*0}=0,31$	$S=\infty$	$S_{K3}=3000 \text{ MB}\cdot\text{A}$ $X_{*2}=0,6$ $X_{*0}=0,78$
$G_1^{(IT)}$	$S_H=300 \text{ MB}\cdot\text{A}$ $\cos\varphi=0,85$ $K_C=0,48$ $X_d''=0,21$ $I_{*f}=2,9$	$P_H=260 \text{ MBT}$ $\cos\varphi=0,8$ $K_C=1,2$ $X_d''=0,24$ $I_{*f}=2,8$	$P_H=300 \text{ MBT}$ $\cos\varphi=0,85$ $K_C=1,15$ $X_d''=0,213$ $I_{*H}=0,9$
$G_2^{(IT)}$	$P_H=100 \text{ MBT}$ $\cos\varphi=0,85$ $K_C=0,605$ $X_d''=0,18$ $I_{*f}=2,5$	$S_H=75 \text{ MBT}$ $\cos\varphi=0,8$ $K_C=0,75$ $X_d''=0,16$ $I_{*H}=0,8$	$P_H=50 \text{ MBT}$ $\cos\varphi=0,8$ $K_C=0,76$ $X_d''=0,13$ $I_{*f}=2,7$
$G_3^{(IT)}$	$S_H=120 \text{ MB}\cdot\text{A}$ $\cos\varphi=0,85$ $K_C=0,55$ $X_d''=0,213$ $I_{*H}=0,95$	$P_H=60 \text{ MBT}$ $\cos\varphi=0,8$ $K_C=0,73$ $X_d''=0,17$ $I_{*f}=2,7$	$P_H=100 \text{ MBT}$ $\cos\varphi=0,85$ $K_C=0,49$ $X_d''=0,2$ $I_{*H}=0,9$
$G_4^{(IT)}$	$S_H=180 \text{ MB}\cdot\text{A}$ $\cos\varphi=0,8$ $K_C=0,75$ $X_d''=0,19$ $I_{*H}=0,84$	$P_H=300 \text{ MBT}$ $\cos\varphi=0,85$ $K_C=0,6$ $X_d''=0,185$ $I_{*f}=2,45$	$P_H=600 \text{ MBT}$ $\cos\varphi=0,85$ $K_C=0,57$ $X_d''=0,21$ $I_{*f}=2,5$
$G_5^{(IT)}$	$S_H=200 \text{ MB}\cdot\text{A}$ $\cos\varphi=0,85$ $K_C=0,58$ $X_d''=0,125$ $I_{*f}=2,1$	$S_H=400 \text{ MB}\cdot\text{A}$ $\cos\varphi=0,8$ $K_C=0,6$ $X_d''=0,14$ $I_{*H}=0,95$	$P_H=250 \text{ MBT}$ $\cos\varphi=0,8$ $K_C=0,57$ $X_d''=0,137$ $I_{*f}=2,3$
AT ₁	$S_H=250 \text{ MB}\cdot\text{A}$ $U_{KBH-CH}=10 \%$ $U_{KBH-HH}=34 \%$ $U_{KCH-HH}=22,5 \%$ $S_{HH}=0,5 S_H$	$S_H=200 \text{ MB}\cdot\text{A}$ $U_{KBH-CH}=10 \%$ $U_{KBH-HH}=35 \%$ $U_{KCH-HH}=22 \%$ $S_{HH}=0,5 S_H$	$S_H=125 \text{ MB}\cdot\text{A}$ $U_{KBH-CH}=10 \%$ $U_{KBH-HH}=32 \%$ $U_{KCH-HH}=21,5 \%$ $S_{HH}=0,5 S_H$
1	2	3	4
T ₁	$S_H=200 \text{ MB}\cdot\text{A}$ $U_{KBH-CH}=10,5 \%$ $U_{KBH-HH}=18 \%$	$S_H=400 \text{ MB}\cdot\text{A}$ $U_{KBH-CH}=11 \%$ $U_{KBH-HH}=17,5 \%$	$S_H=750 \text{ MB}\cdot\text{A}$ $U_{KBH-CH}=10,5 \%$ $U_{KBH-HH}=17 \%$

	$U_{KCH-HH}=6\%$	$U_{KCH-HH}=6,5\%$	$U_{KCH-HH}=6\%$
T_2	$S_H=450\text{ MB}\cdot\text{A}$ $U_K=10,5\%$	$S_H=300\text{ MB}\cdot\text{A}$ $U_K=10\%$	$S_H=400\text{ MB}\cdot\text{A}$ $U_K=10,5\%$
T_3	$S_H=125\text{ MB}\cdot\text{A}$ $U_K=11\%$	$S_H=100\text{ MB}\cdot\text{A}$ $U_K=11\%$	$S_H=160\text{ MB}\cdot\text{A}$ $U_K=10,5\%$
T_4	$S_H=160\text{ MB}\cdot\text{A}$ $U_K=11\%$	$S_H=80\text{ MB}\cdot\text{A}$ $U_K=10\%$	$S_H=120\text{ MB}\cdot\text{A}$ $U_K=10,5\%$
T_5	$S_H=250\text{ MB}\cdot\text{A}$ $U_K=10,5\%$	$S_H=600\text{ MB}\cdot\text{A}$ $U_K=10\%$	$S_H=375\text{ MB}\cdot\text{A}$ $U_K=11\%$
T_6	$S_H=80\text{ MB}\cdot\text{A}$ $U_{KBH-HH}=10,5\%$ $U_{KHH1-HH2}=18\%$ $S_{KHH1}=S_{HH2}=0,5$	$S_H=125\text{ MB}\cdot\text{A}$ $U_{KBH-HH}=10,5\%$ $U_{KHH1-HH2}=14\%$ $S_{KHH1}=S_{HH2}=0,5$	$S_H=40\text{ MB}\cdot\text{A}$ $U_{KBH-HH}=10,5\%$ $U_{KHH1-HH2}=14\%$ $S_{KHH1}=S_{HH2}=0,5$
H_1	$S_H=60\text{ MB}\cdot\text{A}$	$S_H=40\text{ MB}\cdot\text{A}$	$S_H=20\text{ MB}\cdot\text{A}$
H_2	$S_H=100\text{ MB}\cdot\text{A}$	$S_H=200\text{ MB}\cdot\text{A}$	$S_H=180\text{ MB}\cdot\text{A}$
H_3	$S_H=10\text{ MB}\cdot\text{A}$	$S_H=15\text{ MB}\cdot\text{A}$	$S_H=20\text{ MB}\cdot\text{A}$
H_4	$S_H=130\text{ MB}\cdot\text{A}$	$S_H=100\text{ MB}\cdot\text{A}$	$S_H=80\text{ MB}\cdot\text{A}$
H_5	$S_H=150\text{ MB}\cdot\text{A}$	$S_H=120\text{ MB}\cdot\text{A}$	$S_H=115\text{ MB}\cdot\text{A}$
H_6	$S_H=30\text{ MB}\cdot\text{A}$	$S_H=40\text{ MB}\cdot\text{A}$	$S_H=50\text{ MB}\cdot\text{A}$
H_7	$S_H=70\text{ MB}\cdot\text{A}$	$S_H=50\text{ MB}\cdot\text{A}$	$S_H=80\text{ MB}\cdot\text{A}$
H_8	$S_H=50\text{ MB}\cdot\text{A}$	$S_H=30\text{ MB}\cdot\text{A}$	$S_H=40\text{ MB}\cdot\text{A}$
LR	$I_H=2500\text{ A}$ $U_H=10\text{ кВ}$ $X_P=12\%$	$I_H=2000\text{ A}$ $U_H=10\text{ кВ}$ $X_P=0,105\text{ Ом}$	$I_H=2500\text{ A}$ $U_H=10\text{ кВ}$ $X_P=10\%$
X_{N1}	$X_N=1,2\text{ Ом}$	$X_N=0,8\text{ Ом}$	$X_N=1,0\text{ Ом}$
X_{N2}	$X_{N^*}=0,5$	$X_{N^*}=0,65$	$X_{N^*}=0,3$
W_1	$l=70\text{ км}$	$l=30\text{ км}$	$l=50\text{ км}$
W_2	$l=90\text{ км}$	$l=120\text{ км}$	$l=90\text{ км}$
W_3	$l=130\text{ км}$	$l=160\text{ км}$	$l=145\text{ км}$
W_4	$l=60\text{ км}$	$l=70\text{ км}$	$l=40\text{ км}$
W_5	$l=80\text{ км}$	$l=90\text{ км}$	$l=120\text{ км}$
W_6	$l=50\text{ км}$	$l=108\text{ км}$	$l=90\text{ км}$
W_7	$l=105\text{ км}$	$l=52\text{ км}$	$l=30\text{ км}$
W_8	$l=280\text{ км}$	$l=235\text{ км}$	$l=305\text{ км}$

Примечание: все трансформаторы и автотрансформаторы – трехфазные и трёхстержневые.

В курсовой работе необходимо произвести расчет трехфазного или однофазного КЗ в сети 0,4 кВ для схемы, приведенной на рис. 5.

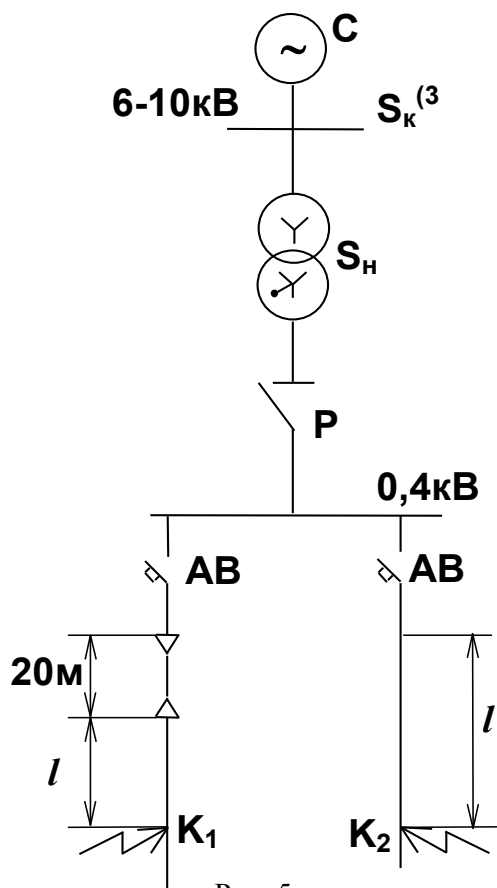


Рис. 5

Для этого в задании на работу приводится мощность КЗ системы $S_k^{(3)}$ на шинах, питающих распределительную сеть; мощность питающего трансформатора S_H ; место повреждения (K_1 или K_2), а также сечение F и длина l кабельной или воздушной линии, которые выполнены из алюминия.

В задание на курсовую работу могут входить специальные вопросы для более глубокой проработки одного из разделов по расчету токов КЗ. Здесь же указывается дата выдачи задания и срок сдачи законченной работы.

Прием задания к исполнению отмечается датой и подписью студента.

Выполнение курсовой работы в группах дневного отделения должно вестись по приводимому в задании графику.

В соответствии с графиком работы проводятся тематические групповые и индивидуальные консультации. Оформление расчетно-пояснительной записки должно вестись по мере завершения

соответствующих разделов курсовой работы; полностью оформленная записка сдается руководителю для проверки.

4. Содержание и оформление пояснительной записки

Законченная курсовая работа представляется в виде пояснительной записки, в которой изложение следует вести от первого лица множественного числа (принимаем, вычисляем и т.д.). Пояснительная записка должна содержать титульный лист, задание, оглавление, краткое введение, освещение всех разделов, подлежащих выполнению в курсовой работе, и список использованной литературы.

В оглавлении перечисляются заголовки записки и указываются номера страниц, на которых они помещены.

Во введении приводятся перспективы развития энергетики республики Беларусь и назначение расчетов токов КЗ.

Основная часть записки должна содержать исходные и преобразованные схемы, расчеты их параметров, а также величины определённых аварийных токов и напряжений.

Пояснительная записка выполняется чернилами от руки на одной стороне писчей бумаги формата А4. Страницы работы нумеруются арабскими цифрами. Титульный лист включают в общую нумерацию, которая должна быть сквозной (задание, рисунки, таблицы и т.д.). На

титульном листе номер не ставят, на последующих страницах номер проставляют в правом верхнем углу. Объем расчетной записки составляет 20-25 страниц.

Глава 1. Методы расчетов тока трехфазного короткого замыкания.

1.1. Назначение и порядок выполнения расчетов.

Современные энергосистемы включают в себя большое количество электростанций, трансформаторных подстанций, линий электропередач различного напряжения. Для выбора электрических аппаратов, проводников, шин, кабелей и токоограничивающих реакторов в них необходимо знать токи КЗ. При этом основная цель расчета состоит в определении периодической составляющей тока трехфазного КЗ в месте повреждения. Учет аperiodической составляющей производят приближенно.

Производить расчеты токов КЗ с учетом всех факторов достаточно сложно и часто практически невозможно. Вместе с тем, для решения вышеуказанных практических задач при проектировании и эксплуатации электроустановок оказывается вполне достаточным располагать приближенными значениями токов КЗ. Поэтому при расчетах вводится ряд допущений, не оказывающих значительного влияния на точность и позволяющих существенно упростить расчет. К таким допущениям относятся следующие:

1. Пренебрегают насыщением магнитных систем, что позволяет считать все уравнения, описывающие переходный процесс, линейными.

2. Принимают, что ЭДС всех генерирующих источников совпадают по фазе (не учитывают качаний генераторов в процессе КЗ), что дает возможность перейти от комплексных величин к скалярным.

3. Пренебрегают токами намагничивания силовых трансформаторов и автотрансформаторов.

4. Трехфазная система сохраняет симметрию во всех точках, кроме места повреждения.

5. Пренебрегают емкостными проводимостями, кроме случая простого замыкания на землю и расчета переходных процессов в длинных линиях электропередачи.

6. Нагрузки учитываются приближенно некоторым постоянным сопротивлением, величина которого зависит от стадии переходного процесса.

7. Пренебрегают учетом активных сопротивлений проводников в сетях 35 кВ и выше (если $r_{\Sigma} < \frac{1}{3} x_{\Sigma}$).

8. Приближенно учитывают затухание аperiodической составляющей тока КЗ в сложной схеме.

Следует иметь в виду, что эти допущения не вызывают ошибок, превышающих 5%.

Расчет токов КЗ начинают с составления расчетной схемы. Расчетная схема представляет собой однолинейную схему рассматриваемой системы с указанием тех элементов и их параметров, которые влияют на величину тока КЗ. Расчетная схема установки должна отражать нормальный режим работы.

По расчетной схеме составляют схему замещения. Схемой замещения называют электрическую схему, соответствующую по исходным данным расчетной схеме, но в которой все электромагнитные (трансформаторные) связи заменены электрическими. При этом активные элементы схемы (генерирующие источники и нагрузка) вводятся в схему замещения своими ЭДС и сопротивлениями соответствующего режима, а остальные пассивные элементы (трансформаторы и автотрансформаторы, воздушные и кабельные линии, реакторы) - только своими сопротивлениями. Таким образом, расчет токов при трехфазном КЗ выполняют в следующем порядке:

- 1) для рассматриваемой системы составляют расчетную схему;
- 2) по расчетной схеме составляют электрическую схему замещения;
- 3) путем постепенного преобразования приводят схему к простому виду так, чтобы каждый источник питания или группа источников с результирующей ЭДС были связаны с точкой КЗ одним сопротивлением $X_{рез}$;
- 4) пользуясь законом Ома, по результирующим ЭДС и $X_{рез}$ определяют начальное значение периодической составляющей тока КЗ.

1.2. Составление схем замещения в относительных единицах.

Сопротивление элементов электрических цепей может быть задано в именованных величинах и в процентах или относительных величинах. Для того, чтобы схему замещения можно было преобразовать к простейшему виду, необходимо привести параметры элементов схем к одной какой-либо ступени напряжения и выразить эти параметры в единых масштабах. Последнее в установках напряжением свыше 1000 В удобнее всего производить с помощью системы относительных единиц (о.е.). Чтобы получить относительное значение какой-либо величины, нужно поделить ее на величину, принятую за единицу измерения. При этом, за единицу измерения или, как принято называть, за базисную величину может быть принято любое количественное значение параметра соответствующей размерности.

Сущность системы о.е. заключается в том, что все фигурирующие в расчетах величины - сопротивления X , токи I , напряжения U и мощность S - выражаются не в обычных единицах (Ом, кА, кВ, МВ·А), а в долях от принятых за базисные единицы $X_б, I_б, U_б, S_б$.

Базисные величины связаны между собой законом Ома: $X_б = \frac{U_б}{\sqrt{3}I_б}$ и

уравнением мощности $S_б = \sqrt{3} \cdot U_б \cdot I_б$. Из четырех базисных единиц только две выбираются произвольно, а две другие получаются из указанных соотношений.

Относительное значение любой величины при выбранных базисных условиях определяется по формуле

$$A_{*\bar{b}} = \frac{A}{A_{\bar{b}}}, \quad (1.1)$$

где A - значение величины в именованных единицах;

$A_{\bar{b}}$ - базисное значение этой же величины.

Звездочка * указывает, что величина выражена в о.е., индекс \bar{b} - что она приведена к базисным условиям.

Используя выражение (1.1) для определения сопротивления в о.е., получим:

$$X_{*\bar{b}} = \frac{X}{X_{\bar{b}}} = X \frac{\sqrt{3}I_{\bar{b}}}{U_{\bar{b}}} = X \frac{\sqrt{3}I_{\bar{b}}U_{\bar{b}}}{U_{\bar{b}}U_{\bar{b}}} = X \frac{S_{\bar{b}}}{U_{\bar{b}}^2}, \quad (1.2)$$

где X - заданное индуктивное сопротивление, Ом на фазу.

Обычно относительные сопротивления элементов (генераторов, двигателей, трансформаторов и реакторов) задаются при номинальных условиях, т.е. за базисные величины приняты номинальные. Их величины определяются по выражению (1.2), где базисные величины заменяются соответствующими номинальными, т.е.

$$X_{*n} = X \frac{\sqrt{3}I_n}{U_n} = X \frac{S_n}{U_n^2}, \quad (1.3)$$

Чтобы вести расчет в о.е. необходимо все ЭДС и сопротивления элементов схемы выразить в о.е. при выбранных базисных условиях. Если эти величины заданы в именованных единицах, для их расчета служат выражения (1.1) и (1.2), когда же они заданы в относительных номинальных единицах, их пересчет к базисным условиям производится по следующим соотношениям:

$$E_{*\bar{b}} = E_{*n} \frac{U_n}{U_{\bar{b}}}; \quad (1.4)$$

$$X_{*\bar{b}} = X_{*n} \frac{I_{\bar{b}}}{I_n} \frac{U_n}{U_{\bar{b}}}; \quad (1.5)$$

или
$$X_{*\bar{b}} = X_{*n} \frac{S_{\bar{b}}}{S_n} \frac{U_n^2}{U_{\bar{b}}^2}. \quad (1.6)$$

Схема замещения может быть составлена точно, т.е. с учетом действительных коэффициентов трансформации участвующих трансформаторов, или приближенно, когда номинальное напряжение всех элементов, находящихся на одной ступени трансформации, принимают одинаковым и равным средненоминальному ($U_{ср.н}$) для данной ступени в соответствии со следующей шкалой: 765; 515; 340; 230; 158; 115; 37; 24; 20; 18; 15,75; 13,8; 10,5; 6,3; 3,15; 0,69; 0,4; 0,23; 0,127 кВ. В дальнейшем будем пользоваться приближенным приведением.

Практика расчетов токов КЗ показала, что наиболее целесообразно задаваться базисной мощностью и базисным напряжением, причем их значения принимают такими, чтобы счетная работа была простой. Базисную

мощность можно принимать любой величины, но для удобства расчетов желательно принимать величину, кратную десяти или кратную установленной мощности генерирующих источников расчетной схемы.

За базисное напряжение при приближенном приведении принимают средненоминальные напряжения ступеней $U_{ср.н.}$. В этом случае пересчет относительных величин, выраженных при номинальных условиях, к базисным осуществляется по выражениям

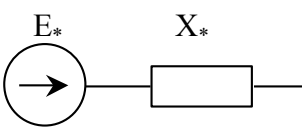
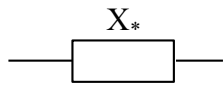
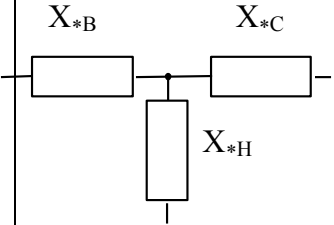
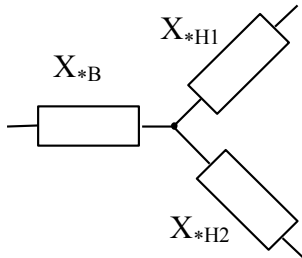
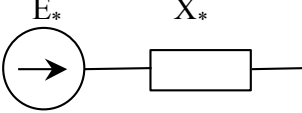
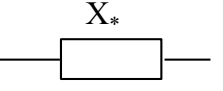
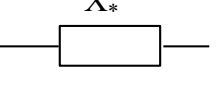
$$E_{*б} = E_{*н}; \quad (1.7)$$

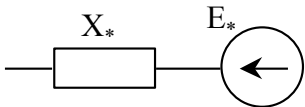
$$X_{*б} = X_{*н} \frac{I_b}{I_n} \quad \text{или} \quad X_{*б} = X_{*н} \frac{S_b}{S_n}. \quad (1.8)$$

В табл. 1.1 даются схемы замещения элементов и формулы для определения их параметров в о.е. по приближенному приведению, в которых: S_b, S_n - базисная и номинальная мощность, МВ·А; I_b - базисный ток, кА; I_n, U_n - номинальный ток и напряжение, кА, кВ; $X_{*н}, E_{*н}$ - относительные сопротивления и ЭДС элементов схемы при их номинальных данных; $S_{кз}$ - мощность КЗ энергосистемы, МВ·А; S_∞ - система бесконечной мощности (система, в которой напряжение остается неизменным при любых изменениях режима); $X_{уд}$ - удельное сопротивление 1 км: для воздушных принимается равным 0,4 Ом/км, для кабельных - 0,08 Ом/км; l - длина ЛЭП, км; $U_k\%$ - напряжение КЗ трансформатора в процентах; $U_{ср.н}$ - среднее номинальное напряжение, кВ.

Сопротивления элементов схемы, приведенные к базисным условиям, наносят на схему замещения. Для этого каждый элемент в схеме замещения обозначают дробью: в числителе ставят порядковый номер элемента, а в знаменателе - значение относительного индуктивного сопротивления. ЭДС элементов придают порядковые номера, и указывается величина в о.е.

Таблица 1.1

Элемент электроустановки	Исходный параметр	Схема замещения	Формулы для расчёта параметров в о.е.
Генератор	E_{*H} X_{*H} S_{*H}		$E_* = E_{*H}$ $X_* = X_{*H} \frac{S_{\delta}}{S_H}$
Двухобмоточный трансформатор	$U_K\%$ S_H		$X_* = \frac{U_K\%}{100} \frac{S_{\delta}}{S_H}$
Трёхобмоточный трансформатор (автотрансформатор)	$U_{KB-H}\%$ $U_{KB-C}\%$ $U_{KC-H}\%$ S_H		$X_{*i} = \frac{U_{Ki}\%}{100} \frac{S_{\delta}}{S_H}$, где $i=B, C, H$ $U_{KB} = 0,5(U_{KB-C} + U_{KB-H} - U_{KC-H})\%$ $U_{KC} = 0,5(U_{KB-C} + U_{KC-H} - U_{KB-H})\%$ $U_{KH} = 0,5(U_{KB-H} + U_{KC-H} - U_{KB-C})\%$
Двухобмоточный трансформатор с расщеплением на 2 ветви	S_H $U_{KB-H}\%$ $U_{KH1-H2}\%$ $S_1 = S_2 = 0,5 \cdot S_H$		$X_{*B} = [(U_{KB-H}\% - 0,5 U_{KH1-H2}\%)/100] \frac{S_{\delta}}{S_H}$ $X_{*H1} = X_{*H2} = \frac{U_{KH1-H2}\%}{100} \frac{S_{\delta}}{2S_H}$
Система	$S = \infty$ S_{K3} X_{*H}, S_{*H}		$E_* = 1; X_* = 0$ $E_* = 1; X_* = \frac{S_{\delta}}{S_{K.3}}$ $E_* = 1; X_* = X_{*H} \frac{S_{\delta}}{S_H}$
Линия электропередачи	X_{y0} l U_H		$X_* = X_{y0} l \frac{S_{\delta}}{U_{cp.H}^2}$
Реактор	$X_P, \text{ Ом,}$ $X_P\%, I_H, U_H$		$X_* = X_P \frac{S_{\delta}}{U_{cp.H}^2}$ $X_* = \frac{X_P\%}{100} \frac{I_{\delta}}{I_H} \frac{U_H}{U_{cp.H}^2}$

Обобщённая нагрузка	E_{*H} X_{*H} S_H		$E_* = E_{*H}$ $X_* = X_{*H} \frac{S_0}{S_H}$
---------------------	-------------------------------	---	--

Примечание. При расчете сопротивления реактора базисный ток должен быть приведен к ступени, на которой включен реактор.

Пример 1.1. Составить схему замещения и определить ее параметры для расчетной схемы рис. 1.1.

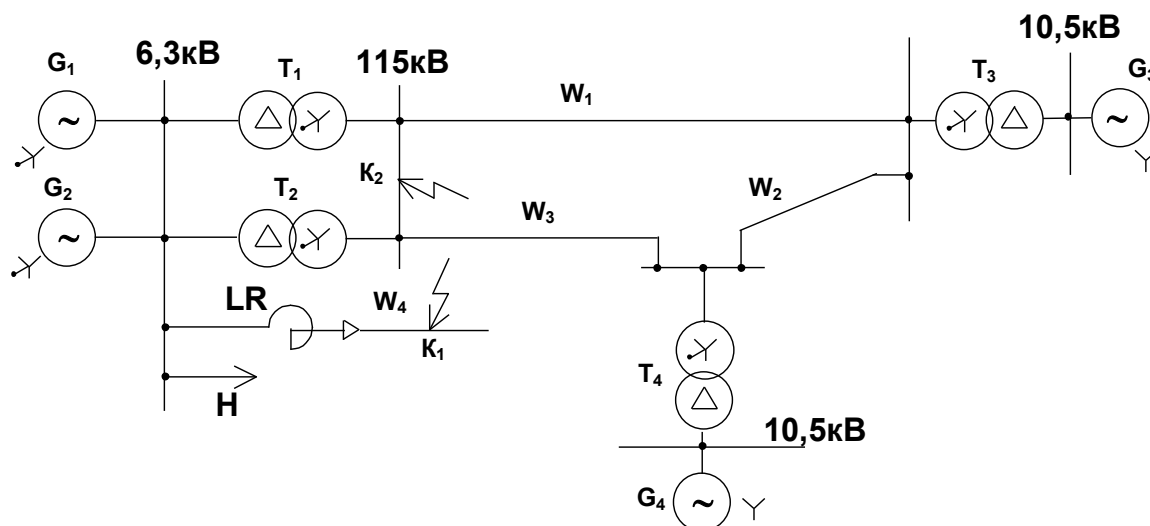


Рис. 1.1.

Исходные данные элементов схемы.

Генераторы: турбо (ТГ), гидро (ГГ).

G_1 (ТГ) - $X_d'' = 0,2$;	$E_{*H} = 1,1$;	$S_H = 60$ МВ·А;	$\cos\varphi = 0,8$;
G_2 (ТГ) - $X_d'' = 0,15$;	$E_{*H} = 1,08$;	$S_H = 120$ МВ·А;	$\cos\varphi = 0,8$;
G_3 (ТГ) - $X_d'' = 0,18$;	$E_{*H} = 1,1$;	$S_H = 80$ МВ·А;	$\cos\varphi = 0,8$;
G_4 (ТГ) - $X_d'' = 0,12$;	$E_{*H} = 1,05$;	$S_H = 100$ МВ·А;	$\cos\varphi = 0,8$.

Линии электропередач:

$W_1 - l = 80$ км;

$W_2 - l = 70$ км;

$W_3 - l = 60$ км;

$W_4 - l = 5$ км.

Трансформаторы:

$T_1 - S_H = 80$ МВ·А; $U_K = 10\%$;

$T_2 - S_H = 120$ МВ·А; $U_K = 12\%$;

$T_3 - S_H = 120$ МВ·А; $U_K = 14\%$;

$T_4 - S_H = 140$ МВ·А; $U_K = 8\%$.

Реакторы:

LR - $X_p = 6\%$; $I_H = 1000$ A; $U_H = 6$ кВ.

Нагрузка: $S_H = 30$ МВ·А; $E_{*H} = 0,8$; $X_{*H} = 0,35$

Схема замещения для расчётов токов КЗ представлена на рис. 1.2.

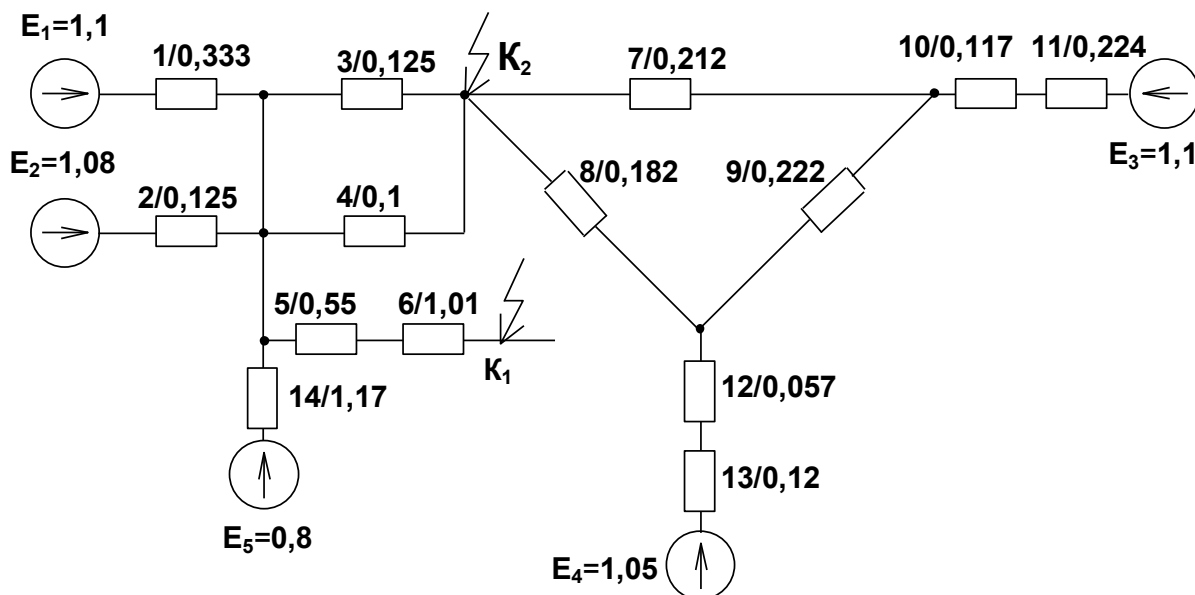


Рис. 1.2

Определим параметры элементов этой схемы замещения при

$$S_{\bar{\sigma}} = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А}; \quad U_{\bar{\sigma}} = 6,3 \text{ кВ}; \quad \text{и} \quad I_{\bar{\sigma}} = \frac{S_{\bar{\sigma}}}{\sqrt{3}U_{\bar{\sigma}}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 9,15 \text{ кА}$$

по формулам табл. 1.1.

Генераторы:

ЭДС - $E_i = E_{*i}$;

$$G_1 - E_1 = 1,1; \quad G_2 - E_2 = 1,08;$$

$$G_3 - E_3 = 1,1; \quad G_4 - E_4 = 1,05.$$

Сопротивления - $X_* = X_d'' \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_H}$.

$$G_1 - X_1 = 0,2 \cdot \frac{100}{60} = 0,333;$$

$$G_3 - X_{11} = 0,18 \cdot \frac{100}{80} = 0,224;$$

$$G_2 - X_2 = 0,15 \cdot \frac{100}{120} = 0,125;$$

$$G_4 - X_{13} = 0,12 \cdot \frac{100}{100} = 0,12.$$

Трансформаторы:

сопротивления - $X_* = \frac{U_K \% S_{\bar{\sigma}}}{100 S_H}$.

$$T_1 - X_3 = \frac{10}{100} \cdot \frac{100}{80} = 0,125;$$

$$T_1 - X_4 = \frac{12}{100} \cdot \frac{100}{120} = 0,1;$$

$$T_3 - X_{I0} = \frac{14}{100} \cdot \frac{100}{120} = 0,117; \quad T_4 - X_{I2} = \frac{8}{100} \cdot \frac{100}{140} = 0,057.$$

Линии электропередач:

$$\text{сопротивления} - X_* = X_{y0} \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{\text{ср.н.}}^2}.$$

$$X_7 = 0,4 \cdot 80 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,212; \quad X_9 = 0,4 \cdot 70 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,222;$$

$$X_8 = 0,4 \cdot 60 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,182; \quad X_6 = 0,08 \cdot 5 \cdot \frac{100}{6,3^2} = 1,01.$$

Реактор:

$$\text{Сопротивление} - X_* = \frac{X_p \%}{100} \cdot \frac{I_6}{I_n} \cdot \frac{U_n}{U_{\text{ср.н.}}}.$$

$$LR - X_5 = \frac{6}{100} \cdot \frac{9,16}{1} \cdot \frac{6}{6,3} = 0,55.$$

Нагрузка:

$$\text{ЭДС} - E_* = E_{*н}; \quad H - E_5 = 0,8.$$

$$\text{Сопротивление} - X_* = X_{*н} \frac{S_6}{S_n}; \quad H - X_{I4} = 0,35 \cdot \frac{100}{30} = 1,17.$$

1.3. Преобразование схем замещения

После того как схема замещения составлена и определены сопротивления всех элементов, она преобразуется к наиболее простому виду. Преобразование (свертывание) схемы выполняется в направлении от источника питания к месту КЗ. Поэтому преобразование схемы выгодно вести так, чтобы аварийная ветвь по возможности была сохранена до конца преобразования или, в крайнем случае, участвовала в нем только на последних его этапах. В частности, концы нагрузочных ветвей, ЭДС которых принимаются равными нулю (установившийся режим), не следует соединять с точкой трехфазного КЗ, а лучше эти ветви объединять с генераторами в эквивалентные ветви. При этом новым сопротивлениям и ЭДС, полученным при преобразованиях, даются возрастающие порядковые номера.

Для преобразования схем используются методы, известные из теоретических основ электротехники. Так, последовательные сопротивления непосредственно суммируются, параллельные - суммируются через проводимости, а при смешанных сопротивлениях используются те и другие методы. Схема, состоящая из последовательных, параллельных и смешанных сопротивлений, является простой схемой и легко преобразуется к простейшему виду.

Если схема содержит замкнутые контуры, она является сложной, и для преобразования ее к простейшему виду необходимо использовать более сложные приемы.

Преобразование треугольника (Δ) в звезду (Y) и наоборот (рис. 1.3). Сопротивления треугольника определяются через сопротивления звезды по формулам:

$$X_{12} = X_1 + X_2 + \frac{X_1 X_2}{X_3}; \quad X_{13} = X_1 + X_3 + \frac{X_1 X_3}{X_2}; \quad X_{23} = X_2 + X_3 + \frac{X_2 X_3}{X_1}, \quad (1.9)$$

а сопротивление звезды по формулам:

$$X_1 = \frac{X_{12} X_{13}}{X_{12} + X_{13} + X_{23}}; \quad X_2 = \frac{X_{12} X_{23}}{X_{12} + X_{13} + X_{23}}; \quad X_3 = \frac{X_{13} X_{23}}{X_{12} + X_{13} + X_{23}}. \quad (1.10)$$

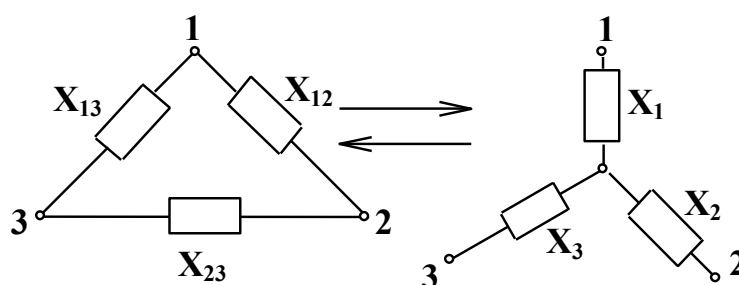


Рис. 1.3

Замена нескольких генераторов, сходящихся в одной точке, одним эквивалентным. Пусть имеется схема (рис. 1.4), содержащая n генераторов, сходящихся в точке a . Тогда сопротивления и ЭДС преобразованной схемы рассчитываются по формулам

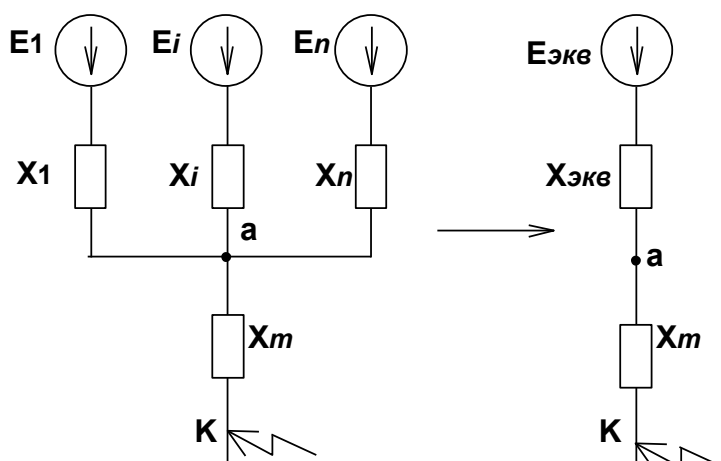


Рис. 1.4

$$X_{\text{экв}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{X_i}}; \quad (1.11)$$

$$E_{\text{экв}} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i \frac{1}{X_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{X_i}}. \quad (1.12)$$

Если в схеме две ЭДС, формулы упрощаются и имеют следующий вид:

$$E_{\text{экв}} = \frac{E_1 X_2 + E_2 X_1}{X_1 + X_2}; \quad X_{\text{экв}} = \frac{X_1 X_2}{X_1 + X_2}. \quad (1.13)$$

Иногда пользуются так называемым способом токораспределения (коэффициентов распределения). В процессе преобразования схемы замещения часто возникает задача разделения так называемых связанных цепей. Этот случай показан на рис. 1.5.

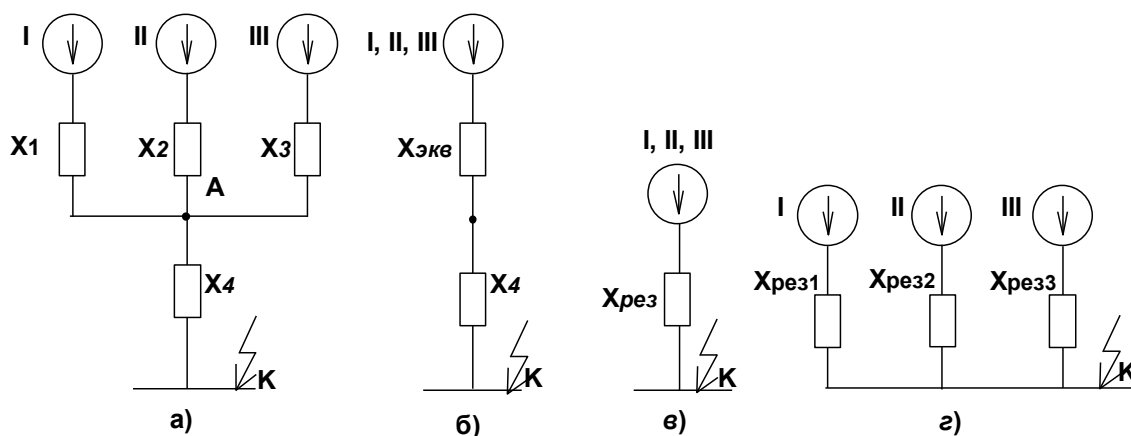


Рис. 1.5

Токи от источников I, II, III проходят через общее сопротивление X_4 . Для того чтобы определить ток, поступающий к точке КЗ от каждого источника, необходимо преобразовать схему к лучевому виду (при расчете по индивидуальному изменению), показанному на рис. 1.5, г. При расчете по схеме, полученной при таком преобразовании, токи, подтекающие в точку КЗ от отдельных источников, должны быть такими же, какими они получились бы в схеме до преобразования. Расчет производится в следующем порядке.

Составляют схему замещения для данной точки КЗ и путем постепенного преобразования приводят ее к виду, показанному на рис. 1.5, а, причем в общем случае число ветвей источников может быть любым. Далее определяют результирующее сопротивление схемы (рис. 1.5, в):

$$X_{рез} = X_{экв} + X_4, \quad (1.14)$$

где $X_{экв}$ - эквивалентное сопротивление всех источников питания относительно точки А схемы:

$$X_{экв} = X_1 || X_2 || X_3. \quad (1.15)$$

Принимают относительное значение периодической составляющей тока в месте повреждения за единицу ($I_{*П} = I$) и находят коэффициенты распределения, т.е. долю участия в токе КЗ каждого источника. На основании законов Кирхгофа можно записать:

$$I_{*П I} + I_{*П II} + I_{*П III} = I, \quad (1.16)$$

а также $\frac{I_{*III}}{I_{*II}} = \frac{X_{экв}}{X_1}$; $\frac{I_{*III}}{I_{*II}} = \frac{X_{экв}}{X_2}$ и т.д.

Отсюда коэффициенты распределения по ветвям

$$\begin{aligned} C_1 &= I_{*II} = X_{экв}/X_1; \\ C_2 &= I_{*III} = X_{экв}/X_2; \\ C_3 &= I_{*IV} = X_{экв}/X_3. \end{aligned} \quad (1.17)$$

Таким образом, используя коэффициенты распределения, можно по суммарному току в месте КЗ определить, как он распределится по ветвям. Правильность вычисления коэффициентов можно проверить по выполнению условия

$$C_1 + C_2 + C_3 = 1. \quad (1.18)$$

Учитывая, что токораспределение по ветвям, должно остаться неизменным, получаем (рис. 1.5, г):

$$X_{рез1} = X_{рез}/C_1; \quad X_{рез2} = X_{рез}/C_2; \quad X_{рез3} = X_{рез}/C_3. \quad (1.19)$$

Метод рассечения узла

Когда трехфазное КЗ находится в узле с несколькими сходящимися в нем ветвями (рис. 1.6, а) и необходимо определить токи в этих ветвях, прибегают к методу разрезания узла по точке КЗ. На каждой образовавшейся отдельной ветви сохраняется точка КЗ (рис. 1.6, б).

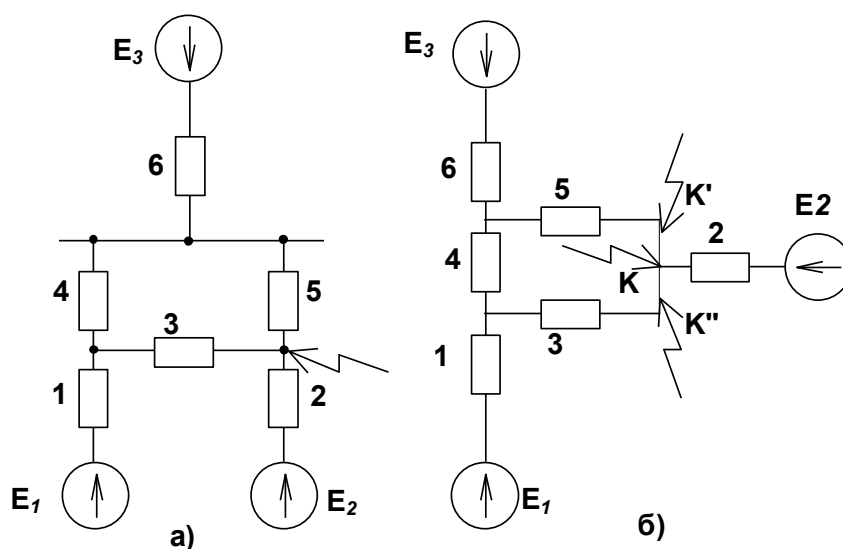


Рис. 1.6

Далее полученную схему нетрудно преобразовать относительно любой из точек КЗ, учитывая другие ветви с короткими замыканиями как обычные нагрузочные ветви с ЭДС равными нулю. Такой прием особенно эффективен, когда нужно найти ток в

одной из ветвей, присоединенных к точке КЗ.

Определённые трудности в упрощении схем возникают, когда точка КЗ находится в одном из узлов многоугольника, к другим узлам которого присоединены генерирующие ветви. Примером могут служить случаи КЗ в схемах, приведенных на рис. 1.7 и 1.8.

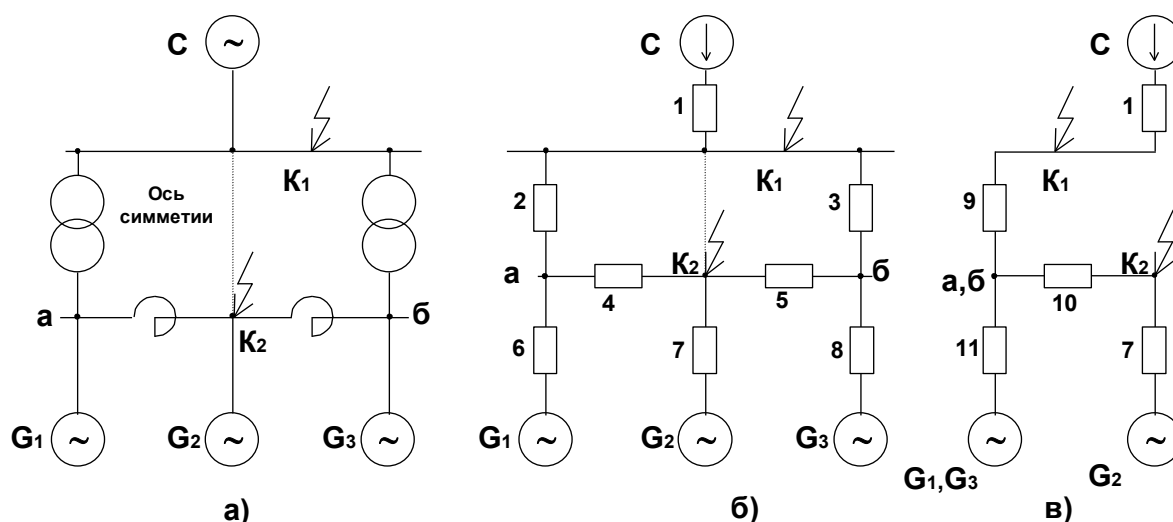


Рис. 1.7.

Значительное упрощение схем достигается совмещением точек одинакового потенциала. Если точка КЗ делит схему на две симметричные части, например, точки K_1 , K_2 (рис. 1.7 а), то при одинаковых характеристиках генераторов G_1 , G_2 и трансформаторов узлы а и б схемы будут иметь одинаковые потенциалы вследствие чего их можно совместить. При совмещении равнопотенциальных точек сопротивления одноименных точек складываются, как параллельные, и получают новую схему (рис. 1.7 в). В этой схеме $X_9 = X_2 || X_3$; $X_{10} = X_4 / X_5$; $X_{11} = X_6 || X_8$. Дальнейшее преобразование схемы производится по обычным правилам.

Рассмотрим случай, показанный на рис. 1.8. Здесь генераторы G_1 и G_2 имеют одинаковые ЭДС, вследствие чего их можно объединить в эквивалентную машину с $S = 2 \cdot S_n$. При таком объединении образуется треугольник сопротивлений (X_4 , X_6 , X_7), который преобразуется в звезду (X_9 , X_{10} , X_{11}), как показано на рис. 1.8, б. В схеме на рис. 1.8 в, определяют сопротивления $X_{12} = X_2 + X_9$ и $X_{13} = X_5 + X_{10}$. Получившийся в результате треугольник (X_3 , X_{12} , X_{13}) преобразуется в звезду (X_{14} , X_{15} , X_{16}). После определения сопротивлений $X_{17} = X_1 + X_{14}$ и $X_{18} = X_{11} + X_{16}$ получаем окончательную схему, приведенную на рис. 1.8, г.

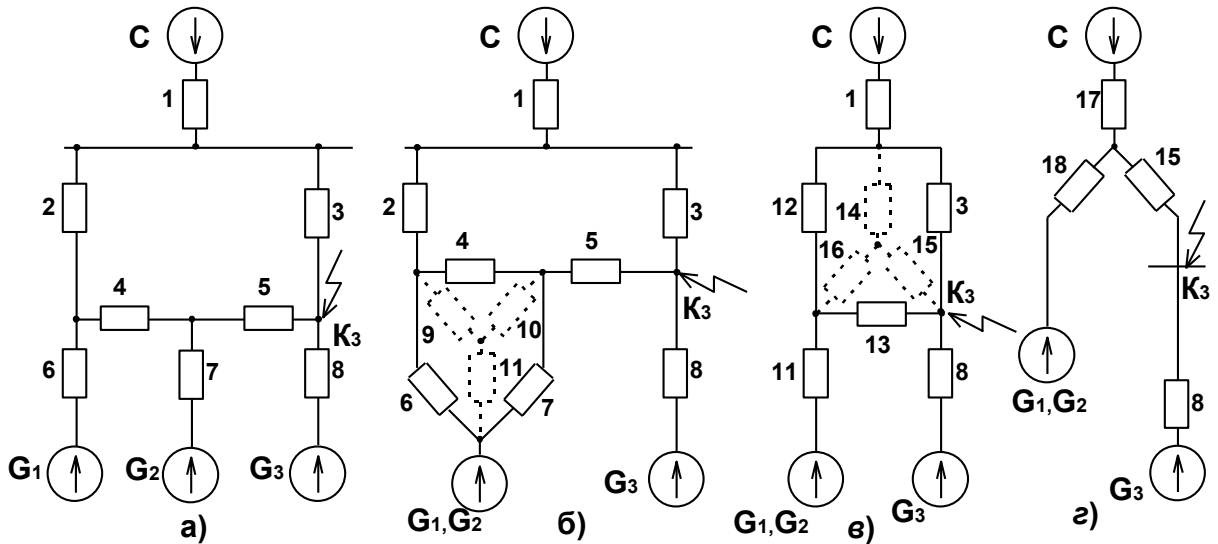


Рис. 1.8

Пример 1.2. Упростить схему замещения (рис. 1.2) при КЗ в точке K_1 .
 Заменяем несколько сопротивлений одним:

$$X_{15} = X_5 + X_6 = 0,55 + 1,01 = 1,56; \quad X_{16} = X_{10} + X_{11} = 0,117 + 0,224 = 0,341;$$

$$X_{17} = X_{12} + X_{13} = 0,057 + 0,12 = 0,177; \quad X_{18} = X_3 // X_4 = 0,125 // 0,1 = 0,057.$$

Используя указанные преобразования (заменяя Δ сопротивлений X_7, X_8, X_9 в Y X_{19}, X_{20}, X_{21} и ветви с E_1, X_{11} и E_2, X_2 в ветвь E_6, X_{22} с учётом последовательного и параллельного соединения сопротивлений), можно схему рис. 1.2 привести к более простой (рис. 1.9) и определить её новые параметры по формулам (1.10 и 1.13).

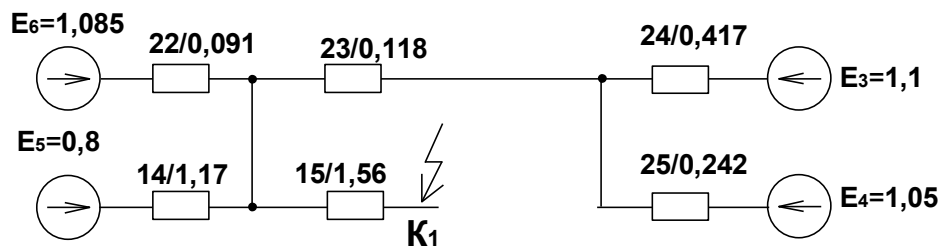


Рис. 1.9

$$X_{19} = \frac{X_7 \cdot X_8}{X_7 + X_8 + X_9} = \frac{0,212 \cdot 0,182}{0,212 + 0,182 + 0,222} = 0,0625;$$

$$X_{20} = \frac{X_7 \cdot X_9}{X_7 + X_8 + X_9} = \frac{0,212 \cdot 0,222}{0,212 + 0,182 + 0,222} = 0,0765;$$

$$X_{21} = \frac{X_8 \cdot X_9}{X_7 + X_8 + X_9} = \frac{0,182 \cdot 0,212}{0,212 + 0,182 + 0,222} = 0,0655;$$

$$X_{22} = \frac{X_1 \cdot X_2}{X_1 + X_2} = \frac{0,333 \cdot 0,125}{0,333 + 0,125} = 0,091;$$

$$E_6 = \frac{E_1 \cdot X_2 + E_2 \cdot X_1}{X_1 + X_2} = \frac{1,1 \cdot 0,125 + 1,08 \cdot 0,333}{0,333 + 0,125} = 1,085;$$

$$X_{23} = X_{18} + X_{19} = 0,057 + 0,0625 = 0,118;$$

$$X_{24} = X_{16} + X_{20} = 0,341 + 0,0765 = 0,417;$$

$$X_{25} = X_{17} + X_{21} = 0,177 + 0,0655 = 0,242.$$

Схему рис. 1.9 легко дальше привести к простейшему виду с помощью рассмотренных преобразований. По найденным результирующей ЭДС и результирующему сопротивлению определяем периодическую составляющую тока в месте КЗ.

После этого, постепенно развертывая схему, можно найти токи в отдельных ветвях и напряжения в различных точках исходной схемы.

Преобразование схемы должно производиться в следующей последовательности:

1. Необходимо проверить, нет ли в схеме точек одинакового потенциала и, если таковые обнаруживаются, совместить их.
2. Сложить последовательные и параллельные сопротивления.
3. Применить преобразование треугольника в звезду или наоборот.
4. Определить относительное результирующее сопротивление всей схемы до места КЗ.

1.4. Аналитический расчет установившегося режима короткого замыкания.

Под установившимся режимом понимают ту стадию процесса КЗ, когда все возникшие в начальный момент КЗ, свободные токи практически затухли и полностью закончен подъем тока возбуждения под действием автоматического регулирования возбуждения (АРВ).

Обычно считают, что этот режим наступает уже через несколько секунд после возникновения КЗ. При этом предполагается, что скорость вращения генератора остается неизменной (синхронной). Такое представление установившегося режима является условным, так как такой режим в современных электрических системах фактически не имеет места, ввиду того, что релейная защита отключает участок сети, на котором произошло КЗ.

Поэтому в настоящее время этот, режим не является характерным. Но знание уровня установившегося тока КЗ необходимо при определении ряда параметров (например, периодического тока КЗ и др.), при выборе и настройке некоторых видов релейной защиты (например, токовых защит генератора).

В установившемся режиме генераторы вводятся в схему замещения относительным значением ЭДС E_{*q} и синхронной ненасыщенной, реактивностью по продольной оси X_d , которые определяются по следующим выражениям:

$$E_{*q} = I_{*f} = \sqrt{(U_* \cos \varphi)^2 + (U_* \sin \varphi + I_* X_d)^2}; \quad (1.20)$$

$$X_d = \frac{C}{K_C}, \quad (1.21)$$

где U_* , $I_* \cos \varphi$ - соответственно напряжение, ток в о.е. и коэффициент мощности, при которых работал генератор до КЗ;

C - относительное значение ЭДС ненасыщенного генератора при токе возбуждения, равном единице вв. Среднее значение C для турбогенераторов - 1,2, а для гидрогенераторов - 1,06;

K_C - отношение короткого замыкания. Среднее значение K_C для турбогенераторов равно 0,7, для гидрогенераторов - 1,1.

Если действительную характеристику холостого хода генератора заменить прямой, проходящей через начало координат и точку с координатами (1,1), будем иметь:

$$X_d = \frac{1}{K_C}. \quad (1.22)$$

Нагрузки учитываются в расчетной схеме генерирующими ветвями $E_{*н}=0$ и относительным сопротивлением $X_{*н}=1,2$, которое приведено к полной мощности нагрузки и $U_{ср.н}$ ступени, где присоединена данная нагрузка.

Поэтому сопротивления X_d и $X_{*н}$ необходимо обязательно приводить к базисным условиям.

Следует отметить, что нагрузка, присоединенная непосредственно к точке КЗ, не играет никакой роли, поэтому она в схему замещения не вводится.

Генераторы в установившемся режиме КЗ в зависимости от наличия или отсутствия АРВ характеризуются различными параметрами. В связи с этим расчет аварийных токов при этом производится по-разному.

1.4.1. Расчет при отсутствии в схеме генераторов с АРВ

Когда генераторы не имеют АРВ, расчет установившегося режима трехфазного КЗ при принятых выше допущениях по существу сводится к определению токов и напряжений в линейной схеме, для которой известны все сопротивления и ЭДС.

Для расчета необходимо, используя все известные способы преобразования схем, найти результирующее сопротивление схемы относительно точки КЗ $X_{рез}$ с приложенной за ним результирующей ЭДС.

Пример 1.3. Определить величину установившегося тока при трехфазном КЗ в точке K_2 для расчетной схемы (рис. 1.1), в которой все генераторы без АРВ и до КЗ работали с номинальными параметрами.

Примем следующие базисные величины: $S_{\sigma}=100\text{МВ}\cdot\text{А}$; $U_{\sigma}=115\text{кВ}$.

В этом случае генераторы будут введены в схему замещения следующими значениями ЭДС и сопротивлений:

$$\begin{aligned} G_1; G_2; \quad E_1 = E_2 &= \sqrt{(1 \cdot 0,8)^2 + (1 \cdot 0,6 + 1 \cdot \frac{1,2}{0,7})^2} = 2,45; \\ X_1 &= X_d \frac{S_{\sigma}}{S_H} = \frac{C}{K_C} \frac{S_{\sigma}}{S_H} = \frac{1,2}{0,7} \frac{100}{60} = 2,857; \\ X_2 &= X_d \frac{S_{\sigma}}{S_H} = \frac{1,2}{0,7} \frac{100}{120} = 1,428; \\ G_3; G_4; \quad E_3 = E_4 &= \sqrt{(1 + 0,8)^2 + (1 \cdot 0,6 + 1 \cdot \frac{1,06}{1,1})^2} = 1,75; \\ X_{11} &= X_d \frac{S_{\sigma}}{S_H} = \frac{1,06}{1,1} \frac{100}{80} = 1,193; \\ X_{13} &= X_d \frac{S_{\sigma}}{S_H} = \frac{1,06}{1,1} \frac{100}{100} = 0,954. \end{aligned}$$

Нагрузка в схему замещения введётся $E_5 = E_{*H} = 0$ и сопротивлением

$$X_{14} = X_{*H} \frac{S_{\sigma}}{S_H} = 1,2 \frac{100}{30} = 4.$$

Сопротивления пассивных элементов (линии, трансформаторы, реакторы) останутся теми же, что и в схеме рис. 1.2.

Используя методы преобразования схем, получим результирующую схему рис. 1.10.

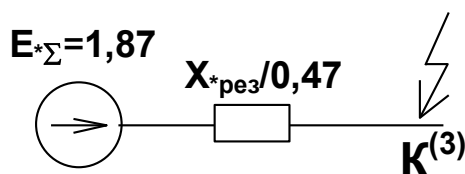


Рис. 1.10

По результирующим $E_{*\Sigma}$ и $X_{*рез}$ относительно места повреждения определяется ток КЗ:

$$I_{*\infty}^{(3)} = \frac{E_{*\Sigma}}{X_{*рез}} = \frac{1,87}{0,47} = 3,97$$

Для получения установившегося тока трехфазного КЗ в именованных единицах необходимо полученный результат умножить на базисный ток:

$$I_{\infty}^{(3)} = I_{*\infty}^{(3)} \cdot I_{\sigma} = 3,97 \cdot 0,5 = 1,987 \text{ кА},$$

$$\text{где } I_{\sigma} = \frac{S_{\sigma}}{\sqrt{3}U_{\sigma}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,5 \text{ кА}.$$

1.4.2. Расчёт при наличии в схеме генераторов с АРВ

В настоящее время все генераторы, выпускаемые отечественной промышленностью, снабжаются и работают с АРВ.

Снижение напряжения на выводах генератора при КЗ приводит в действие устройство АРВ, которое стремится поддержать напряжение на уровне номинального путем увеличения тока возбуждения. Поэтому можно заранее предвидеть, что токи и напряжения при этих условиях будут всегда больше, чем при отсутствии АРВ. Однако рост тока возбуждения у генератора ограничен предельным током возбуждения I_{*fnp} .

Следовательно, для каждого генератора можно установить наименьшую величину внешней реактивности при КЗ, за которой генератор при предельном возбуждении обеспечивает U_n на своих выводах. Такую реактивность называют критической $X_{*кр}$, которая может быть определена:

$$X_{*кр} = X_d \frac{U_{*н}}{E_{*qnp} - U_{*н}}; \quad (1.23)$$

связанный с ней критический ток:

$$I_{*кр} = \frac{U_{*н}}{X_{*кр}}. \quad (1.24)$$

Среднее значение $X_{*кр}$ для типовых генераторов при номинальных условиях составляет 0,5, а критического тока - 2.

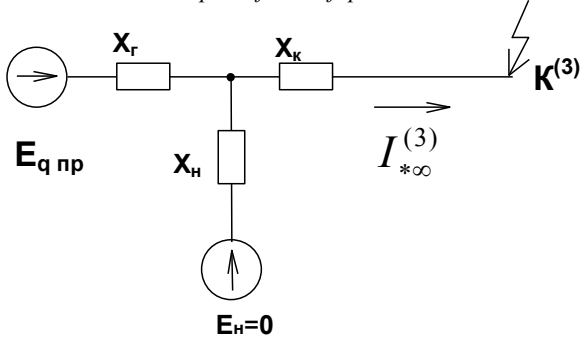
В установившемся режиме при трехфазном КЗ генератор, имеющий АРВ, может оказаться в одном из двух режимов - предельного возбуждения или нормального напряжения. Зная $X_{*кр}$ достаточно сопоставить с ним внешнюю реактивность $X_{*вн}$, чтобы однозначно решить вопрос, в каком режиме работает генератор.

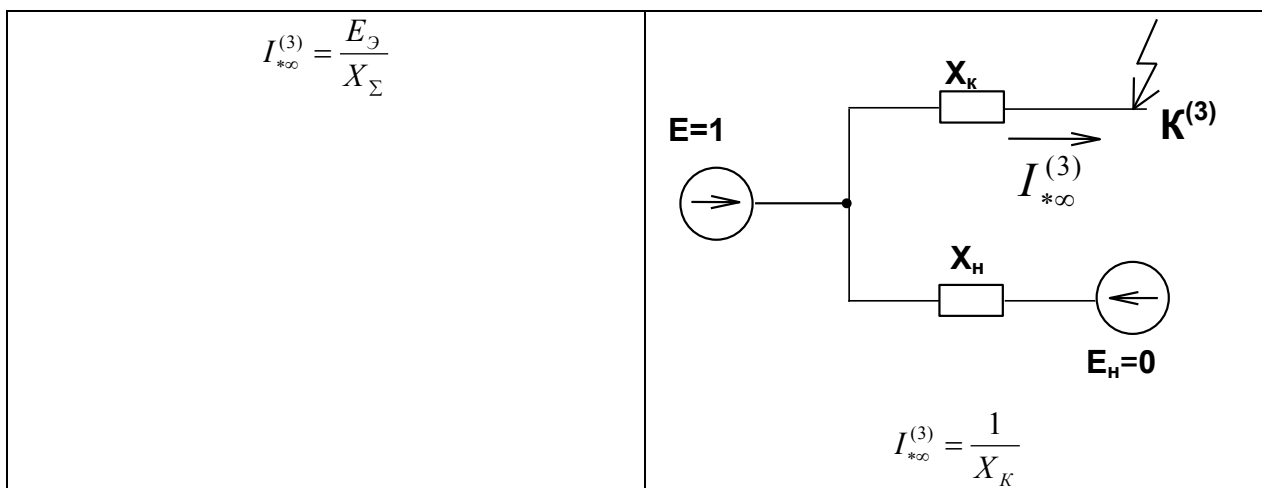
Внешняя реактивность представляет собой суммарное сопротивление всех элементов сети, по которым протекает ток, от выводов генератора до точки КЗ.

При сравнении $X_{*вн}$ и $X_{*кр}$ следует помнить, что они должны быть приведены к общим базисным условиям.

В табл. 1.2 сведены все соотношения, характеризующие указанные выше возможные режимы генератора при КЗ.

Таблица 1.2

Режим предельного возбуждения	Режим нормального напряжения
$X_{*вн} < X_{*кр}; I_{*f} = I_{*fnp}; U_* < U_{*н};$ 	$X_{*вн} \geq X_{*кр}; I_{*f} \leq I_{*fnp}; U_* = U_{*н};$



Пример 1.4. Определить установившийся ток трёхфазного КЗ для схемы рис 1.11 и остаточное напряжение на выводах генератора.

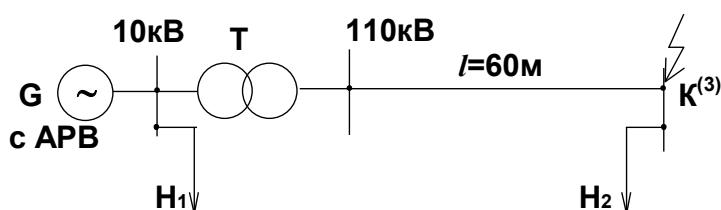


Рис. 1.11

Исходные данные:

$G - S_H = 240 \text{ МВ}\cdot\text{А};$

$K_c = 0,7;$

$I_{*fnp} = 3;$

$T - S_H = 240 \text{ МВ}\cdot\text{А}$

$U_K\% = 10,5\%;$

$H_1 - S_H = 24 \text{ МВ}\cdot\text{А};$

$H_2 - S_H = 10 \text{ МВ}\cdot\text{А}.$

Принимаем базисные условия: $S_{\sigma} = 240 \text{ МВ}\cdot\text{А}; U_{\sigma} = 115 \text{ кВ}.$

Схема замещения представлена на рис. 1.12 (нагрузка H_2 отсекается трехфазным КЗ, поэтому она в схему замещения не введена).

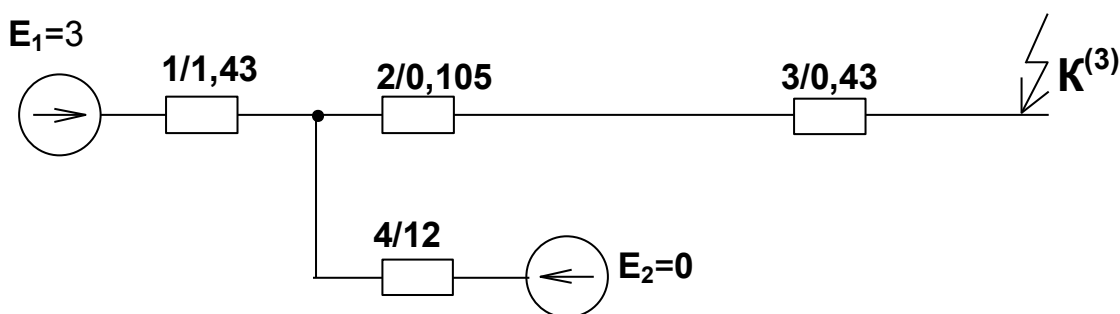


Рис 1.12

Определим параметры схемы замещения:

$$E_1 = I_{*fnp} = 3;$$

$$X_1 = X_d \frac{S_{\sigma}}{S_H} = \frac{1}{K_c} \cdot \frac{S_{\sigma}}{S_H} = \frac{1}{0,7} \cdot \frac{240}{240} = 1,43;$$

$$X_2 = \frac{U_K\%}{100} \cdot \frac{S_{\sigma}}{S_H} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{240}{240} = 0,105;$$

$$X_3 = X_{y0} \cdot \ell \cdot \frac{S_{\sigma}}{U_{cp,n}^2} = 0,4 \cdot 60 \cdot \frac{240}{115^2} = 0,43;$$

$$X_4 = X_{*H} \frac{S_{\sigma}}{S_H} = 1,2 \cdot \frac{240}{24} = 12;$$

$$X_{\Sigma} = \frac{X_1 \cdot X_4}{X_1 + X_4} + X_2 + X_3 = \frac{1,43 \cdot 12}{1,43 + 12} + 0,105 + 0,43 = 1,81.$$

Установим режим работы генератора:

$$X_{кр} = X_1 \frac{U_n}{E_1 - U_n} = 1,43 \frac{1}{3-1} = 0,715;$$

$$X_{вн} = (X_2 + X_3) // X_4 = \frac{(0,105 + 0,43)12}{0,105 + 0,43 + 12} = 0,51.$$

$X_{кр} > X_{вн}$, получаем режим предельного возбуждения.

Определим эквивалентную ЭДС:

$$E_{\Sigma} = \frac{E_1 \cdot X_4 + E_2 \cdot X_1}{X_1 + X_4} = \frac{3 \cdot 12}{1,43 + 12} = 2,7.$$

Определим результирующее сопротивление :

$$X_{\Sigma} = \frac{X_1 \cdot X_4}{X_1 + X_4} + X_2 + X_3 = \frac{1,43 \cdot 12}{1,43 + 12} + 0,105 + 0,43 = 1,81.$$

Определяем установившийся ток трёхфазного КЗ:

$$I_{*\infty}^{(3)} = \frac{E_{\Sigma}}{X_{\Sigma}} = \frac{2,7}{1,81} = 1,49;$$

$$I_{\infty}^{(3)} = I_{*\infty}^{(3)} \cdot I_{\sigma} = 1,49 \cdot 1,2 = 1,8 \text{ кА.}$$

Для определения остаточного напряжения необходимо вычислить падение напряжения от протекания установившегося тока КЗ по сопротивлению от точки КЗ до рассматриваемой точки.

$$U_{*осм} = I_{*\infty} (X_2 + X_3) = 1,49(0,105 + 0,43) = 0,8;$$

$$U_{осм} = U_{*осм} \cdot \frac{U_{\sigma}}{\sqrt{3}} = 0,8 \cdot \frac{10,5}{\sqrt{3}} = 4,6 \text{ кВ.}$$

Так как в практике расчеты токов КЗ в схеме с несколькими генераторами с АРВ производятся весьма редко, то на этом случае останавливаться не будем. Такие расчеты приведены в [1].

1.5. Вычисление начального сверхпереходного и ударного токов короткого замыкания

В начальный момент КЗ ($t=0$) индуктивности цепи исключают внезапное изменение полного тока, поэтому значение последнего в начальный момент является известным: оно равно току в конце заданного предшествующего режима. Однако при изменяющихся условиях этот ток состоит уже из новых слагающих, возникающих в данном процессе, - периодической, которая вызывается ЭДС, наводимой потоком ротора, и аperiodической, обусловленной изменением потока статора. Рассматривая

внезапное изменение тока в начальный момент, имеют в виду изменение лишь одной из его слагающих, а именно - периодической. При этом апериодическая слагающая обеспечивает в момент нарушения режима сохранение предшествующего мгновенного значения тока.

Особенностью начального момента переходного процесса в синхронном генераторе является то, что синхронная ЭДС претерпевает изменения. Поэтому необходимо в исследование ввести такие параметры, которые в начальный момент оставались бы неизменными и тем самым позволили бы связать предшествующий режим с переходным. Такими параметрами являются переходные (сверхпереходные) ЭДС и реактивности синхронной машины, определяемые на основе принципов постоянства результирующего потоко-сцепления обмотки возбуждения в момент изменения режима. Эти ЭДС остаются неизменными в начальный момент переходного процесса, и их значения вычисляются из предшествующего режима.

В начальный момент внезапного нарушения режима синхронная машина характеризуется следующими параметрами:

- при отсутствии демпферных обмоток - начальными переходными ЭДС E' , током I' и сопротивлением X'_d ;
- при наличии демпферных обмоток - начальными сверхпереходными ЭДС E'' , I' и X''_d .

Величину ЭДС для практических расчетов можно определить по выражению

$$E''_* = U_* + I_* X''_d \sin \varphi. \quad (1.25)$$

Важный фактор в начальный момент внезапного нарушения режима - поведение подключенной нагрузки. Обычно нагрузка учитывается в том случае, если она непосредственно связана с точкой КЗ, или находится в зоне малой электрической удаленности от нее ($X_k < 0,46$), или соизмерима по мощности с генераторами. При расчетах сверхпереходного режима индивидуально учитывают синхронные генераторы и компенсаторы, а также мощные синхронные и асинхронные двигатели. Электродвигатели относительно небольшой мощности и все электродвигатели, связанные с точкой КЗ через трансформаторы или реакторы, относят к ближайшей обобщенной нагрузке.

Обобщенная нагрузка характеризуется сверхпереходными реактивностями и ЭДС, относительные величины которых при полной рабочей мощности нагрузки и $U_{ср.н}$ той ступени, где она присоединена, составляют примерно $X''_{*н} = 0,35$, $E''_{*н} = 0,85$.

При определении максимального мгновенного значения полного тока или, иначе, ударного тока (i_y) обычно учитывают затухание лишь апериодической слагающей тока, считая, что амплитуда сверхпереходного тока за полпериода практически сохраняет свое начальное значение. При этом ударный ток определяется:

$$i_y = K_y \sqrt{2} I'' , \quad (1.26)$$

где K_y - ударный коэффициент, который показывает превышение ударного тока над амплитудой периодической слагающей.

Для практических расчетов можно рекомендовать следующие значения K_y : при КЗ на шинах генератора и синхронного двигателя $K_y = 1,9$; в остальных случаях $K_y = 1,8$.

Для обобщенной нагрузки $K_y = 1$, поэтому ее необходимо выделять в отдельную ветвь, если она присоединена непосредственно к точке КЗ, т.е.

$$i_y = K_y \sqrt{2} I'' + \sqrt{2} I''_n , \quad (1.27)$$

где I'' - начальный сверхпереходный ток от генераторов;

I''_n - начальный сверхпереходный ток от нагрузок.

Пример 1.5. Определить сверхпереходный и ударный ток КЗ в точке K_2 для схемы (рис. 1.1), в которой все генераторы до КЗ, работали с номинальными параметрами.

Примем следующие базисные величины: $S_{\bar{o}} = 100$ МВ·А; $U_{\bar{o}} = 115$ кВ. В этом случае генераторы будут введены в схему замещения следующими значениями ЭДС:

$$E_1'' = U_* + I_* X_d'' \sin \varphi = 1 + 1 \cdot 0,2 \cdot 0,6 = 1,12 ;$$

$$E_2'' = 1 + 1 \cdot 0,15 \cdot 0,6 = 1,09 ;$$

$$E_3'' = 1 + 1 \cdot 0,18 \cdot 0,6 = 1,108 ;$$

$$E_4'' = 1 + 1 \cdot 0,12 \cdot 0,6 = 1,072 .$$

Нагрузка в схему замещения введется ЭДС $E_5'' = 0,85$ и сопротивлением

$$X_{14} = X_{*n} \frac{S_{\bar{o}}}{S_n} = 0,35 \frac{100}{30} = 1,166 .$$

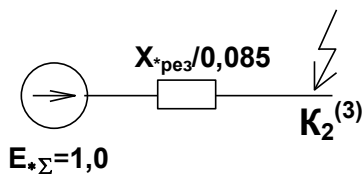


Рис.1.13

Сопротивления генераторов и пассивных элементов остаются теми же, что и в схеме рис. 1.2.

Преобразовав схему к простейшему виду рис. 1.13, определим периодическую составляющую тока в начальный момент времени:

$$I_*^{(3)} = \frac{E_{*\Sigma}''}{X_{*рез}} = \frac{1,09}{0,085} = 12,82 ;$$

$$I''^{(3)} = I_*^{(3)} I_{\bar{o}} = 12,82 \cdot 0,5 = 6,41 \text{ кА} .$$

Определим ударный ток:

$$i_y = K_y \sqrt{2} I'' = 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 6,41 = 16,35 \text{ кА} .$$

1.6. Расчет переходных процессов по расчетным кривым

Выше были рассмотрены аналитические способы определения токов КЗ. При этом сравнительно просто находится начальное значение сверхпереходного тока, ударный ток и установившийся ток КЗ. Все промежуточные значения токов КЗ определяются довольно громоздко, а для выбора электрических аппаратов при проектировании электрических станций и подстанций необходимо знать токи КЗ для произвольного момента времени. Поэтому на практике для определения тока КЗ для любого момента времени пользуются расчетными кривыми (рис. 1.14), позволяющими определять ток КЗ весьма просто и с достаточной точностью.

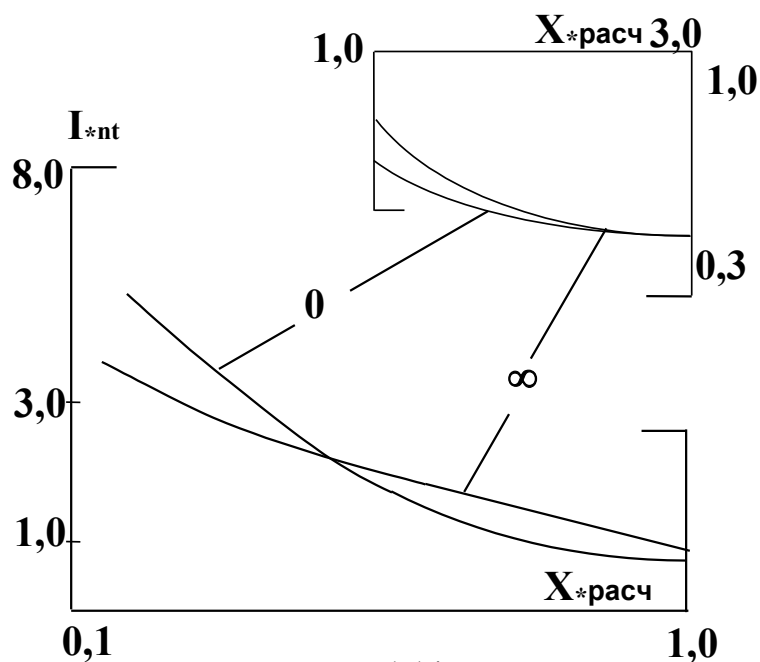


Рис. 1.14

Построение этих кривых осуществлено исходя из схемы рис. 1.15.

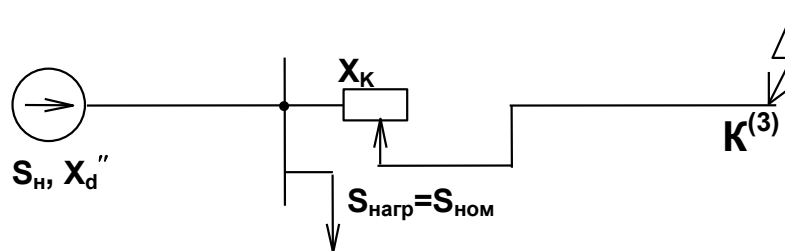


Рис 1.15

В этой схеме генератор представлен своим сверхпереходным сопротивлением X_d'' и полной номинальной мощностью S_n , линия - переменным сопротивлением X_k , и к шинам генератора подсоединена номинальная нагрузка.

При изменяющемся X_k линии делались трехфазные КЗ различной длительности, и соответственно к этому строились расчетные кривые. При этом за базисную мощность схемы рис. 1.15 принималась номинальная мощность генератора, и поэтому X_d'' генератора, X_k линии и X_n'' нагрузки

были приведены к номинальной мощности генератора. Кривые позволяют найти только относительное значение периодической слагающей тока КЗ. Аперриодическая слагающая тока КЗ, как затухающая до нуля приблизительно за 0,2 с, практический интерес представляет весьма редко, но всегда учитывается в ударном токе. Такие специальные кривые, представляющие собой зависимости относительной величины периодической составляющей тока в месте КЗ от $X_{*расч}$ для разных моментов времени, приводятся в справочной литературе.

Под расчетным сопротивлением $X_{*расч}$ принята сумма сверхпереходной реактивности генератора X_d'' (независимо от момента КЗ) и реактивности аварийной цепи X_k , выраженной в о.е. при номинальных условиях генератора, т.е. $X_{*расч} = X_d'' + X_k$. В $X_{*расч}$ не отражено наличие нагрузки. Наличие нагрузки учтено при построении расчетных кривых.

Так как на практике сопротивления схемы замещения приводятся к произвольно выбранной базисной мощности, а кривые построены при базисной мощности, равной, номинальной мощности генератора, то для получения $X_{*расч}$ по $X_{*рез.}$, полученному при произвольной базисной мощности, необходимо пересчитать $X_{*рез.}$ с приведением его к номинальной мощности всех генераторов рассматриваемой схемы. Это делается по формуле

$$X_{*расч} = X_{*рез} \frac{S_{н\Sigma}}{S_б}; \quad S_{н\Sigma} = S_{н1} + S_{н2} + \dots + S_{нn}, \quad (1.27)$$

где $S_{н1}, S_{н2}, \dots, S_{нn}$ – номинальные мощности генераторов, участвующих в питании данной схемы.

Кривые построены до значения $X_{*расч} = 3$. Если $X_{*расч} \geq 3$, то относительное значение периодической слагающей тока КЗ во времени остается неизменным и определяется по формуле

$$I_{*н} = \frac{1}{X_{*расч}}. \quad (1.28)$$

Для определения I'' по расчетным кривым необходимо пользоваться кривой для времени $t = 0$, а при определении $I_{*∞}$ для $t = ∞$. При определении тока КЗ по расчетным кривым в именованных единицах необходимо относительную величину тока умножать не на базисный ток, а на номинальный ток луча, который определяется по выражению

$$I_n = \frac{S_{н\Sigma}}{\sqrt{3}U_б}. \quad (1.29)$$

При пользовании кривыми делаются допущения, что ЭДС всех генераторов, участвующих в схеме, равны между собой. Поэтому при приведении схемы к простейшему виду ЭДС не эквивалентизируются.

Методика пользования расчетными кривыми достаточно проста. Для нахождения по ним значения периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени необходимо определить $X_{*расч}$ относительно

рассматриваемой точки КЗ, используя схему замещения для начального момента КЗ. Нагрузки в схему замещения не вводятся, за исключением тех, которые подключены непосредственно к месту повреждения. Их учет производится индивидуально, путем введения составляющих ЭДС и сопротивлений, характеризующих нагрузку в сверхпереходном режиме. По $X_{*расч}$ из расчетных кривых определяют величину периодической составляющей тока для данного момента времени. Начальное значение периодической составляющей тока определяется как сумма периодических составляющих генерирующих источников и нагрузки.

Расчетные кривые можно применять к сложным системам с большим числом генераторов. При этом возможны два варианта расчета:

- 1) по общему изменению тока;
- 2) по индивидуальному изменению тока.

1.6.1. Расчет по общему изменению тока

Расчет по общему изменению наиболее применим для схем с однотипными генераторами, условия работы которых при КЗ отличаются незначительно, а также при приближенных расчетах токов в схемах с разнотипными генераторами.

Этот расчет основан на допущении, что все генераторы, участвующие в схеме, могут быть заменены одним эквивалентным генератором номинальной мощности.

Пример 1.6. Определить I'' , i_y , I_∞ при трехфазном КЗ в точке К для схемы рис. 1.16,а. Необходимые для расчета данные приведены на схеме. Все генераторы снабжены устройствами АРВ.

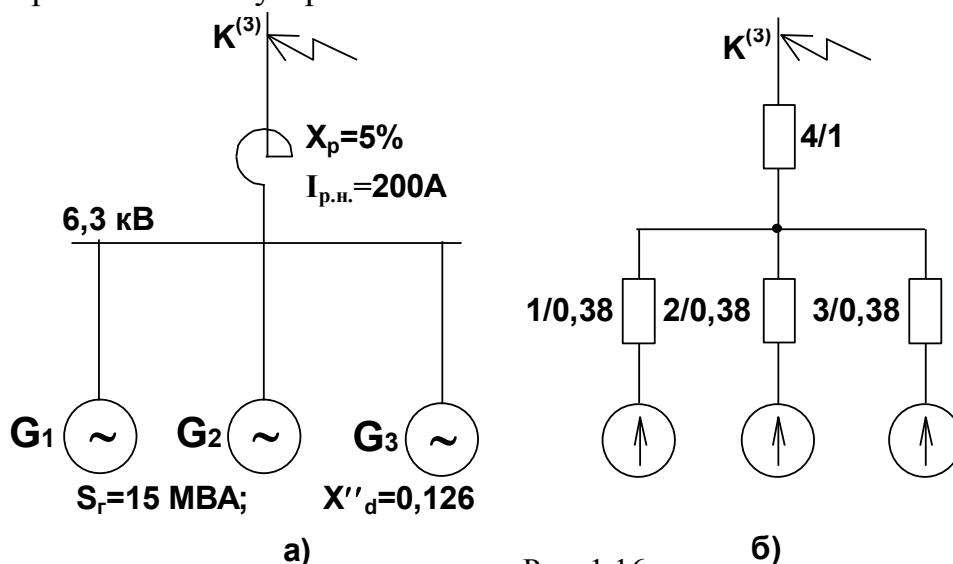


Рис. 1.16

В данном случае за базисную мощность удобнее принять $S_\sigma = S_{n\Sigma} = 3 \cdot 15 = 45 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ и $U_\sigma = 6,3 \text{ кВ}$. Тогда

$$I_{\delta} = I_{n\Sigma} = \frac{S_{n\Sigma}}{\sqrt{3}U_{\delta}} = \frac{45}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 4,1 \text{ кА.}$$

Приводим все сопротивления к базисной мощности. Сопротивления генераторов

$$X_1 = X_2 = X_3 = X_d'' \frac{S_{\delta}}{S_{Г.ном}} = 0,126 \cdot \frac{45}{15} = 0,38.$$

Сопротивление реактора

$$X_4 = \frac{X_p \% I_{\delta} U_n}{100 I_n U_{н.ср}} = 0,05 \frac{4,1 \cdot 6}{0,2 \cdot 6,3} = 1.$$

Схема замещения приведена на рис. 1.16,б.

Расчетное сопротивление цепи до точки К

$$X_{расч} = X_{рез} \frac{S_{n\Sigma}}{S_{\delta}} = \left(\frac{0,38}{3} + 1 \right) \cdot \frac{45}{45} = 1,13.$$

По полученному расчетному сопротивлению из расчетных кривых для времени $t=0$ и $t=\infty$ определяем периодические составляющие тока $I_{*nkt=0} = 0,9$; $I_{*nkt=\infty} = 1,02$.

Получим токи КЗ в именованных единицах:

$$I'' = 0,9 \cdot 4,1 = 3,7 \text{ кА}; \quad I_{\infty} = 1,02 \cdot 4,1 = 4,2 \text{ кА};$$

$$i_y = \sqrt{2} K_y I'' = 2,55 \cdot 3,7 = 9,4 \text{ кА.}$$

Обратим внимание, что в данном примере начальное значение сверхпереходного тока получилось меньше установившегося тока КЗ. Объясняется, это тем, что точка КЗ является удаленной от генераторов, и поэтому регуляторы возбуждения АРВ обеспечили увеличение тока в установившемся режиме.

Расчет по общему изменению тока может привести к существенным погрешностям при объединении разнотипных генераторов (турбо- и гидро-), генераторов с АРВ и без АРВ, и в особенности - генераторов большой и малой мощности, когда первые имеют значительную удаленность относительно точки КЗ. Поэтому в этих случаях и при наличии в схемах систем бесконечной мощности, когда расчет по общему изменению тока вообще не осуществим, рекомендуется выполнять расчет по индивидуальному изменению.

1.6.2. Расчет по индивидуальному изменению тока

Расчетные кривые построены для расчетных схем, симметричных относительно места короткого замыкания, т.е. все генераторы однотипны и с одинаковыми относительными сопротивлениями по отношению к месту КЗ. Но действительные расчетные схемы, как правило, отличаются от вышеуказанных. Поэтому для асимметричных схем (при разнотипных источниках питания относительно места КЗ) должно учитываться: индивидуальное изменение тока в отдельных генераторах (или лучах). Расчет по индивидуальному изменению тока, т.е. приведение к лучевой схеме (рис.

1.5), основан на допущении, что процессы КЗ отдельных генераторов независимы и могут быть представлены как процессы в простейших цепях, сходящихся в общей точке КЗ. В этом случае эквивалентная суммарная реактивность n -ой цепи принимается равной X_{pez}/C_n , где C_n - коэффициент распределения тока для данной ветви (такое преобразование схемы приводится в п.1.3).

Сущность этого метода заключается в том, что генераторы, находящиеся в одинаковых или близких условиях, объединяются в группы и выделяются в отдельные ветви. Практика показывает, что в схеме любой сложности обычно достаточно выделения двух-трех групп. Токи от каждой ветви находятся отдельно (как и при расчете по общему изменению). Если помимо генераторов в схеме имеется источник бесконечной мощности, то периодическая слагающая тока от него принимается неизменной в течение всего процесса КЗ и определяется как

$$I_{пс} = \frac{I_{\delta}}{X_{*c}}, \quad (1.30)$$

где $X_{*c} = X_{pez}/C_c$ - эквивалентная реактивность луча системы.

Ток в месте повреждения определяется как сумма токов всех ветвей.

Пример 1.7. Определить I'' , i_y , I_{∞} при трехфазном КЗ в точке K_2 для схемы рис. 1.1, в которой все генераторы без АРВ.

Принимаем базисные условия: $S_{\delta}=100\text{МВ}\cdot\text{А}$; $U_{\delta}=115\text{кВ}$.

Составляем схему замещения, в которой генераторы вводим своими сверхпереходными сопротивлениями, ЭДС которых не определяется, а учитывается величина полной мощности генерирующих ветвей. Нагрузку в схему замещения не вводим. Схема замещения при принятых базисных условиях показана на рис. 1.17.

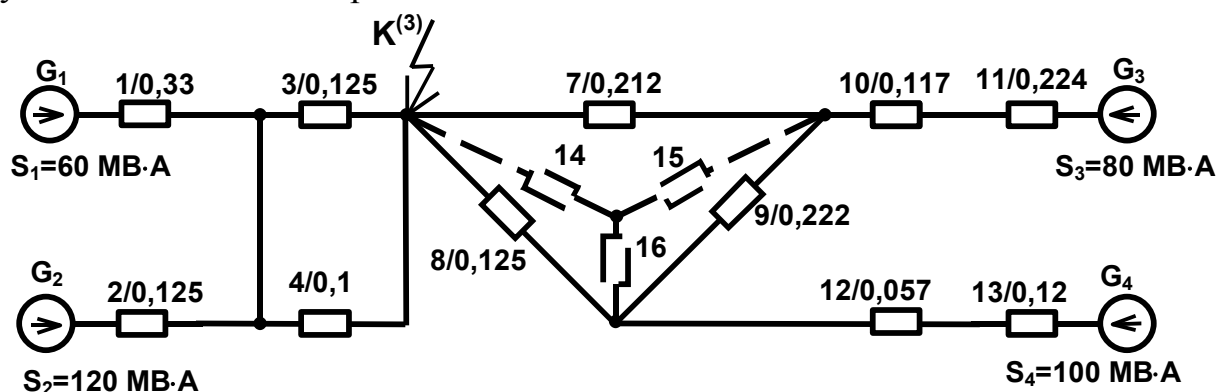


Рис. 1.17

Используя известные методы преобразования схем получим схему рис 1.18.

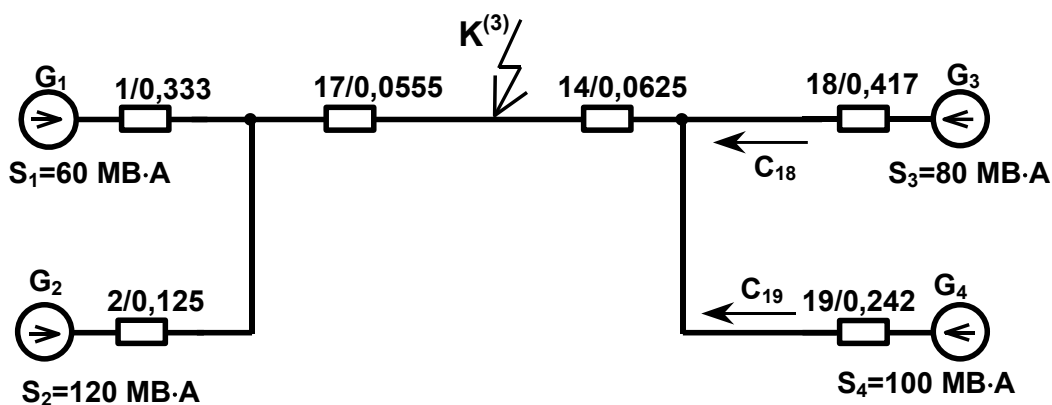


Рис. 1.18

$$X_{14} = \frac{X_7 \cdot X_8}{X_7 + X_8 + X_9} = \frac{0,212 \cdot 0,182}{0,212 + 0,182 + 0,222} = 0,0625;$$

$$X_{17} = X_3 // X_4 = \frac{0,125 \cdot 0,1}{0,125 + 0,1} = 0,0555;$$

$$X_{18} = \frac{X_7 \cdot X_9}{X_7 + X_8 + X_9} + X_{10} + X_{11} = 0,0765 + 0,117 + 0,224 = 0,417;$$

$$X_{19} = \frac{X_8 \cdot X_9}{X_7 + X_8 + X_9} + X_{12} + X_{13} = 0,0655 + 0,057 + 0,12 = 0,242.$$

Так как генераторы G_1 и G_2 однотипны и по отношению к точке КЗ находятся в близких условиях, объединим их в один эквивалентный генератор суммарной мощностью $S_5=S_1+S_2=180$ МВ·А и эквивалентным сопротивлением

$$X_{20} = X_1 // X_2 = \frac{0,333 \cdot 0,125}{0,458} = 0,091.$$

Генераторы G_3 и G_4 связаны с точкой КЗ через общее сопротивление X_{14} . Преобразование схемы к лучевой (рис. 1.19) производим с помощью коэффициентов распределения тока.

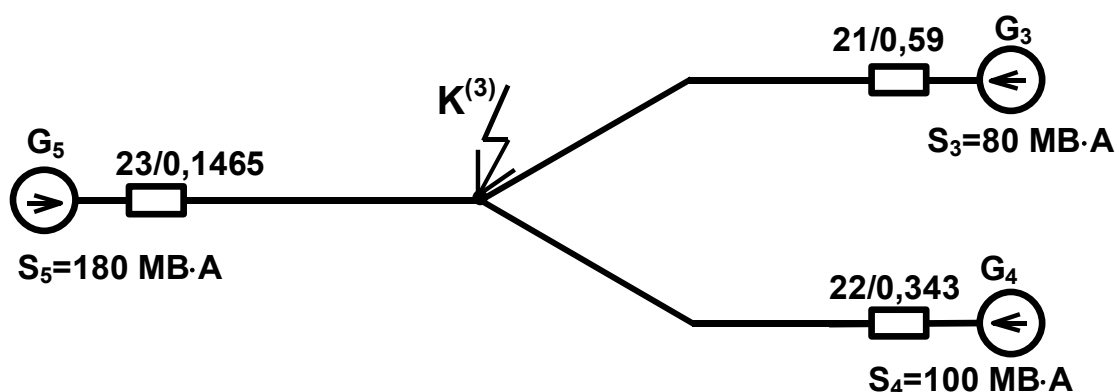


Рис. 1.19

$$X_{\text{экв}} = X_{18} // X_{19} = \frac{0,417 \cdot 0,242}{0,417 + 0,242} = 0,153;$$

$$X_{\text{рез}} = X_{\text{экв}} + X_{14} = 0,153 + 0,0625 = 0,216;$$

$$C_{18} = \frac{X_{\text{экв}}}{X_{18}} = \frac{0,153}{0,417} = 0,368; \quad C_{19} = \frac{X_{\text{экв}}}{X_{19}} = \frac{0,153}{0,242} = 0,632;$$

$$X_{21} = \frac{X_{\text{экв}}}{C_{18}} = \frac{0,216}{0,368} = 0,59; \quad X_{22} = \frac{X_{\text{экв}}}{C_{19}} = \frac{0,216}{0,632} = 0,343;$$

$$X_{23} = X_{20} + X_{17} = 0,091 + 0,0555 = 0,1465.$$

Дальнейший расчет заключается в применении метода расчетных кривых для каждой ветви в отдельности.

$$X_{*расч5} = X_{23} \frac{S_5}{S_6} = 0,1465 \cdot \frac{180}{100} = 0,264;$$

$$X_{*расч3} = X_{21} \frac{S_3}{S_6} = 0,59 \cdot \frac{80}{100} = 0,264;$$

$$X_{*расч4} = X_{22} \frac{S_4}{S_6} = 0,349 \cdot \frac{100}{100} = 0,343.$$

По кривым для турбогенераторов определим ток от G_5 :

$$I_{*5нкл=0} = 3,9; \quad I_{*5нкл=\infty} = 1,3.$$

Ток в именованных единицах

$$I_5'' = I_{*5нкл=0} I_{н5} = 3,9 \frac{180}{\sqrt{3} \cdot 115} = 3,51 \text{ кА};$$

$$I_{5\infty} = I_{*5нкл=\infty} I_{н5} = 1,3 \frac{180}{\sqrt{3} \cdot 115} = 1,16 \text{ кА}.$$

По кривым для гидрогенераторов

$$I_{*3нкл=0} = 2,3; \quad I_{*3нкл=\infty} = 1,4; \quad I_{*4нкл=0} = 3,3; \quad I_{*4нкл=\infty} = 1,6.$$

Ток в именованных единицах от G_3 и G_4 :

$$I_3'' = I_{*3нкл=0} I_{н3} = 2,3 \frac{180}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,92 \text{ кА};$$

$$I_{3\infty} = I_{*3нкл=\infty} I_{н3} = 1,4 \frac{180}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,54 \text{ кА};$$

$$I_{4\infty} = I_{*4нкл=\infty} I_{н4} = 1,6 \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,8 \text{ кА};$$

$$I_4'' = I_{*4нкл=0} I_{н4} = 3,3 \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 115} = 1,67 \text{ кА}.$$

Суммарные токи КЗ в точке K

$$I'' = I_5'' + I_3'' + I_4'' = 3,51 + 0,92 + 1,67 = 6,1 \text{ кА};$$

$$I_{\infty}'' = I_{5\infty}'' + I_{3\infty}'' + I_{4\infty}'' = 1,16 + 0,54 + 0,8 = 2,5 \text{ кА};$$

Ударный ток

$$i_y'' = K_y \sqrt{2} I'' = 2,55 \cdot 6,1 = 15,6 \text{ кА}.$$

Пример 1.18. Преобразовать схему замещения рис. 1.20 к лучевому виду (для расчета по расчетным кривым). Параметры элементов схемы приведены к базисным условиям $S_{\text{б}} = 1000 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ и $U_{\text{ср.н.}} = 115 \text{ кВ}$.

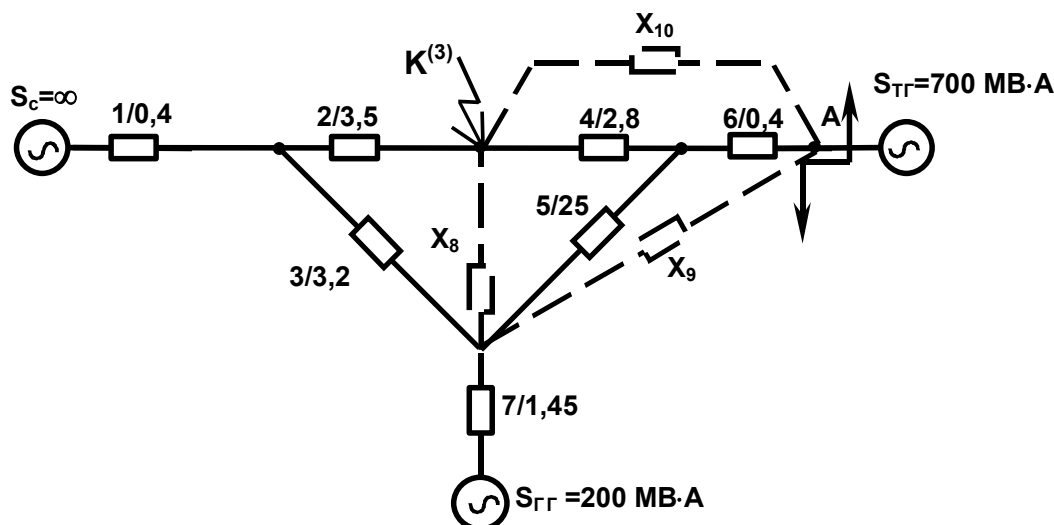


Рис. 1.20

Преобразуем Y с сопротивлениями 4,5,6 в Δ с сопротивлениями 8,9,10.

$$X_8 = X_4 + X_5 + \frac{X_4 \cdot X_5}{X_6} = 2,8 + 2,5 + \frac{2,8 \cdot 2,5}{0,4} = 22,8;$$

$$X_9 = 2,5 + 0,4 + \frac{2,5 \cdot 0,4}{2,8} = 3,26; \quad X_{10} = 2,8 + 0,4 + \frac{2,8 \cdot 0,4}{2,5} = 3,65.$$

Произведем рассечение узла А и одновременно преобразуем Δ с X_2, X_3, X_8 в Y с сопротивлениями X_{11}, X_{12}, X_{13} . Получим схему рис. 1.21.

$$X_{11} = \frac{X_2 \cdot X_3}{X_2 + X_3 + X_8} = 0,38; \quad X_{12} = \frac{X_2 \cdot X_8}{X_2 + X_3 + X_8} = 2,7;$$

$$X_{13} = \frac{X_3 \cdot X_8}{X_2 + X_3 + X_8} = 2,47.$$

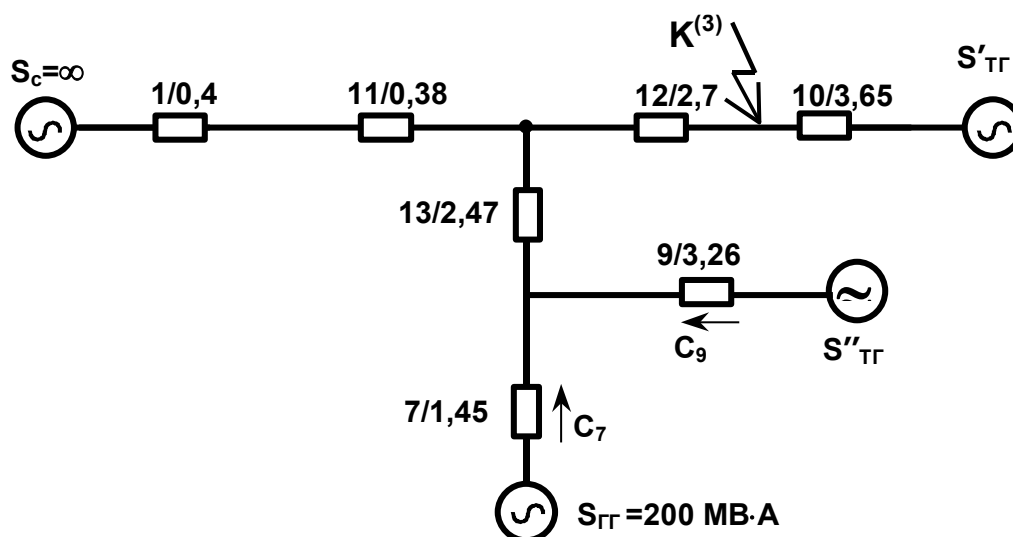


Рис. 1.21

$$X_{14} = X_1 + X_{11} = 0,78; \quad X_{\text{экв}} = \frac{X_7 \cdot X_9}{X_7 + X_9} = 1;$$

$$C_7 = \frac{X_{\text{экв}}}{X_7} = \frac{1}{1,45} = 0,69; \quad C_9 = \frac{X_{\text{экв}}}{X_9} = \frac{1}{3,26} = 0,31;$$

$$X_{\text{рез}} = X_{\text{экв}} + X_{13} = 1 + 2,47 = 3,47;$$

$$X_{15} = \frac{X_{\text{рез}}}{C_7} = \frac{3,47}{0,69} = 5; \quad X_{16} = \frac{X_{\text{рез}}}{C_9} = \frac{3,47}{0,31} = 11,2.$$

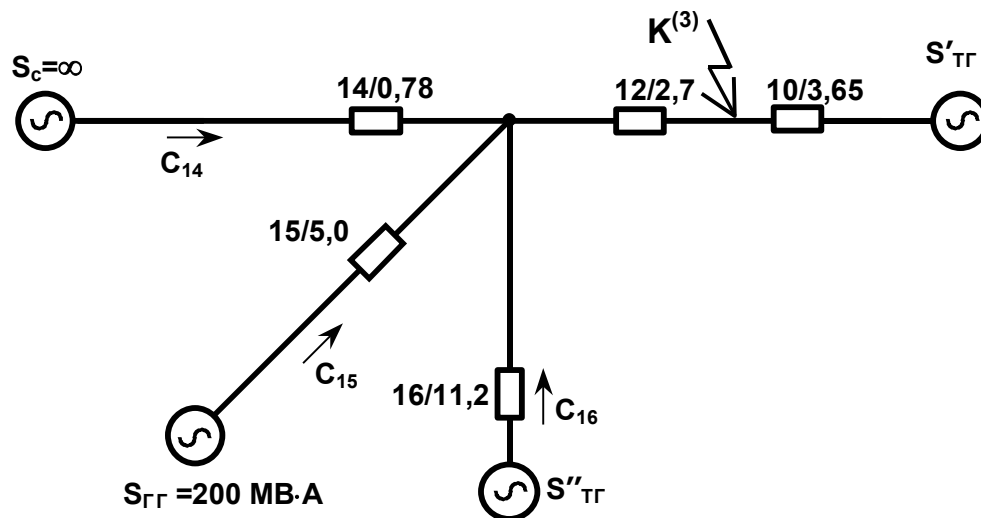


Рис. 1.22

Аналогичным образом, преобразуя схему рис. 1.22, получим схему рис. 1.23.

Объединим рассеченный узел с турбогенератором в один, после чего получим окончательную расчетную схему, приведенную на рис. 1.24.

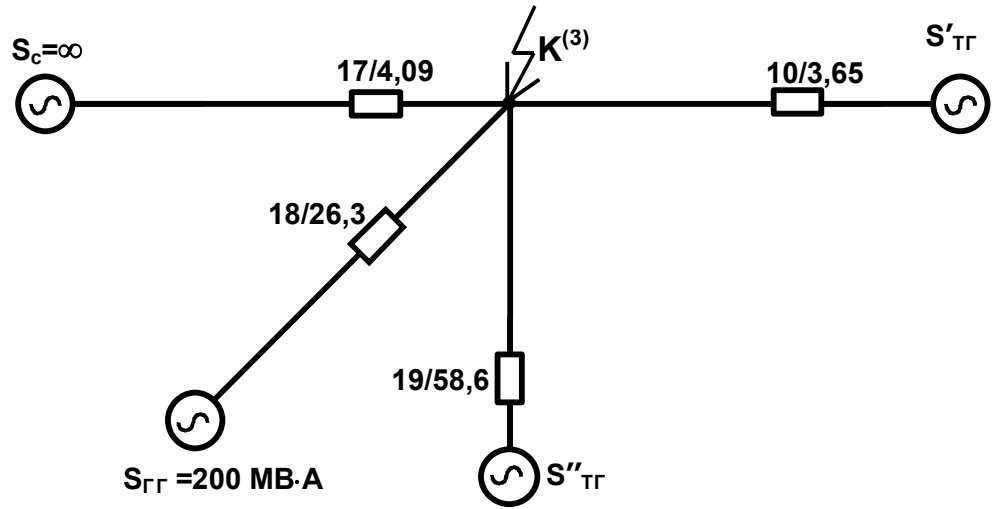


Рис. 1.23

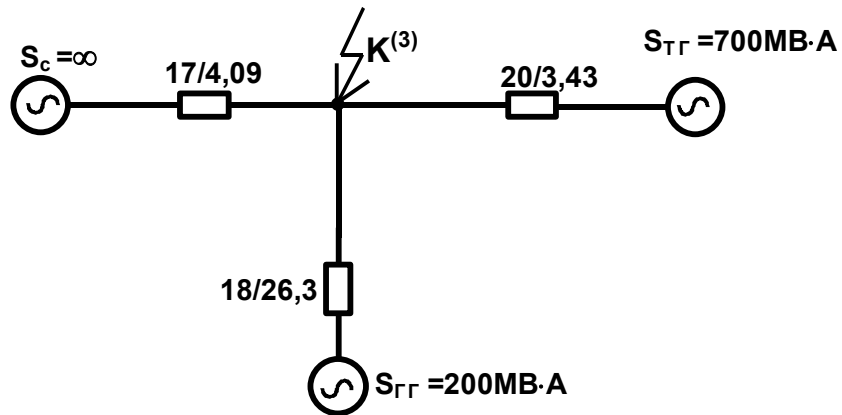


Рис. 1.24

$$X_{20} = \frac{X_{10} \cdot X_{19}}{X_{10} + X_{19}} = \frac{3,65 \cdot 58,6}{3,65 + 58,6} = 3,43.$$

Глава 2. Расчет переходных процессов при несимметричных КЗ

2.1. Общие положения

Токи в поврежденных фазах при несимметричных КЗ значительно превышают токи неповрежденных фаз и по значению в ряде случаев могут превосходить токи трехфазного КЗ. В связи с этим появляется необходимость в расчетах параметров несимметричных КЗ.

При однофазных и двухфазных КЗ, когда трехфазная система становится несимметричной, фазы оказываются в разных условиях, что не позволяет выполнить расчет трехфазного КЗ только для одной из фаз. Для определения токов, возникающих при несимметричных КЗ, потребовалось бы составлять несколько уравнений Кирхгофа для многих контуров и узлов, образующихся в рассматриваемой несимметричной трехфазной системе. Решение этих уравнений с учетом индивидуальных связей между фазами даже для сравнительно простой схемы является сложной задачей.

С целью упрощения расчета токов КЗ делаются допущения, при которых трехфазная система сохраняет симметрию во всех точках, кроме места повреждения, что не вносит в расчет существенных погрешностей, так как это допущение практически отвечает действительности. Расчет переходных процессов даже при этом допущении существенно затруднен тем, что при несимметричных повреждениях образуется пульсирующее поле ротора, вызывающее полный спектр высших гармоник ЭДС генератора. Для большинства задач проектирования и эксплуатации электрических систем обычно определяют лишь основные гармоники искомых величин. При таком принятом в дальнейшем ограничении наибольшие преимущества для расчета переходных процессов, вызванных поперечной (несимметричные КЗ) и продольной (обрыв одной или двух фаз) несимметрией, имеет метод симметричных составляющих.

Сущность этого метода состоит в том, что любую несимметричную трехфазную систему векторов (токов, напряжений и т.п.) можно представить в виде трех симметричных систем. Одна из них имеет прямую последовательность чередования фаз ($A_1 - B_1 - C_1$), другая - обратную ($A_2 - C_2 - B_2$). Третья система, называемая системой нулевой последовательности, состоит из трех равных векторов, совпадающих по фазе (A_0, B_0, C_0).

Для симметричных систем применение метода симметричных составляющих значительно упрощается, так как в этом случае каждая из симметричных составляющих системы напряжений пропорциональна соответствующей составляющей системы токов. Законы Ома и Кирхгофа применимы в отдельности к нулевым, прямым и обратным симметричным составляющим. Токи прямой, обратной и нулевой последовательностей вызывают падения напряжения только, соответственно, прямой, обратной и нулевой последовательностей. Большим достоинством метода симметричных составляющих применительно к расчету КЗ является то, что он сводит вычисление токов и напряжений при несимметричных КЗ к простому

вычислению этих же величин при некотором условном (фиктивном) трехфазном КЗ. Поэтому все изложенное ранее в отношении расчета токов и напряжений при трехфазном КЗ используется и при вычислении этих величин при несимметричных замыканиях.

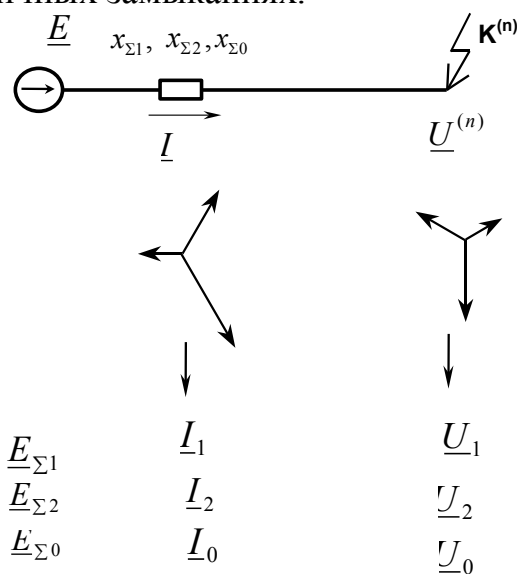


Рис. 2.1

Применение этого метода рассмотрим для случая несимметричного КЗ в простейшей схеме (рис. 2.1), элементы которой для токов ($\underline{I}_1, \underline{I}_2, \underline{I}_0$) последовательностей обладают соответственно результирующими сопротивлениями $X_{\Sigma 1}, X_{\Sigma 2}, X_{\Sigma 0}$. ЭДС генераторов в силу симметричного выполнения статорной обмотки является ЭДС только прямой последовательности. Что касается ЭДС, вызванных реакцией токов других последовательностей, то их будем учитывать в виде падений напряжений с обратным знаком в соответствующих реактивностях машины, т.е. ЭДС генераторов обратной и нулевой последовательностей в схемах замещения этих последовательностей будут равными нулю.

Разложив в месте повреждения несимметричную систему фазных напряжений и токов, протекающих по элементам схемы, на симметричные составляющие $\underline{U}_1, \underline{U}_2, \underline{U}_0$ и $\underline{I}_1, \underline{I}_2, \underline{I}_0$, на основании второго закона Кирхгофа для каждой последовательности одной из фаз можно записать следующие уравнения в комплексной форме:

$$\underline{E}_{\Sigma 1} = \underline{U}_1 + j\underline{I}_1 X_{\Sigma 1}; \quad (2.1)$$

$$0 = \underline{U}_2 + j\underline{I}_2 X_{\Sigma 2}; \quad (2.2)$$

$$0 = \underline{U}_0 + j\underline{I}_0 X_{\Sigma 0}. \quad (2.3)$$

При однократной продольной несимметрии (обрыв одной или двух фаз) уравнения (2.1) - (2.3) будут иметь такой же вид, только вместо фазных напряжений $\underline{U}_1, \underline{U}_2, \underline{U}_0$ в них следует ввести падения напряжений $\Delta \underline{U}$ соответствующих последовательностей на концах местной несимметрии.

Сопровитления $X_{\Sigma 1}$, $X_{\Sigma 2}$, $X_{\Sigma 0}$ в этом случае должны быть результирующими сопротивлениями соответствующих схем при продольной несимметрии.

Система трех уравнений (2.1) - (2.3) содержит шесть неизвестных величин - три составляющие напряжения и три составляющие тока. Недостающие для расчета этих величин три уравнения получают из граничных условий, которыми характеризуется тот или иной вид повреждения. Это позволяет по известной несимметрии в месте повреждения установить соответствующие соотношения между токами и напряжениями отдельных последовательностей.

При разложении известной несимметрии на составляющие определяются составляющие последовательностей той особой фазы, для которой записаны уравнения (2.1) - (2.3). Обычно такой фазой принимаются фаза А и симметричные составляющие (токов или напряжений). \underline{F}_{A1} , \underline{F}_{A2} , \underline{F}_0 рассчитываются по известной несимметрии \underline{F}_A , \underline{F}_B , \underline{F}_C (рис. 2.2) по выражениям:

$$\underline{F}_{A1} = \frac{1}{3}(\underline{F}_A + a\underline{F}_B + a^2\underline{F}_C); \quad (2.4)$$

$$\underline{F}_{A2} = \frac{1}{3}(\underline{F}_A + a^2\underline{F}_B + a\underline{F}_C); \quad (2.5)$$

$$\underline{F}_0 = \frac{1}{3}(\underline{F}_A + \underline{F}_B + \underline{F}_C), \quad (2.6)$$

где $a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ - фазный множитель;

$$a^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}; \quad a^2 - a = -j\sqrt{3};$$

$$a - a^2 = j\sqrt{3}; \quad a^2 + a + 1 = 0.$$

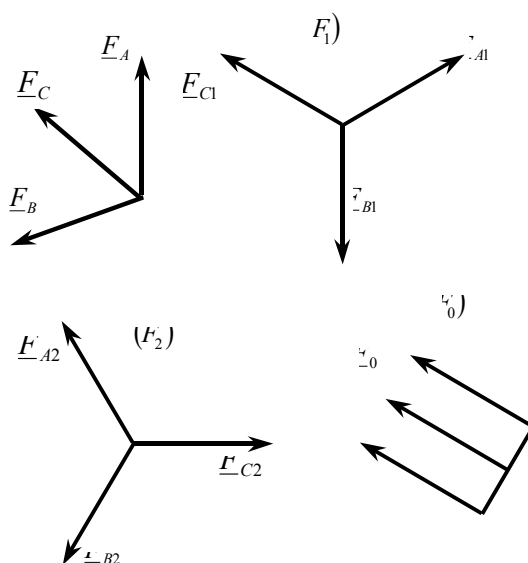


Рис.2.2.

В результате совместного решения уравнений (2.1) - (2.3) с уравнениями граничных условий находят симметричные составляющие токов и напряжений в месте повреждения для принятой особой фазы А. Вычисление фазных токов и напряжений фаз, охваченных аварийным режимом, производят по соотношениям:

$$\underline{F}_A = \underline{F}_{A1} + \underline{F}_{A2} + \underline{F}_o; \quad (2.7)$$

$$\underline{F}_B = a^2 \underline{F}_{A1} + a \underline{F}_{A2} + \underline{F}_o; \quad (2.8)$$

$$\underline{F}_C = a \underline{F}_{A1} + a^2 \underline{F}_{A2} + \underline{F}_o. \quad (2.9)$$

Таким образом, расчёт переходных процессов при несимметричных КЗ сводится к определению результирующего сопротивления схемы замещения каждой последовательности, нахождению токов и напряжений симметричных составляющих из решения приведенной системы уравнений, а по ним - полных фазных токов и напряжений в месте повреждения.

2.2. Составление схем замещения для токов прямой, обратной и нулевой последовательностей.

В симметричных трехфазных цепях с ненасыщенными магнитными элементами может быть применен принцип наложения, предполагающий, что отдельные составляющие действуют независимо друг от друга. Это обстоятельство позволяет составлять отдельные схемы замещения для каждой последовательности. Поэтому для анализа и расчета несимметричных КЗ в общем случае необходимо составить схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательности.

При симметричных трехфазных КЗ напряжение в месте повреждения равно нулю. При несимметричных КЗ напряжение прямой последовательности в месте повреждения не равно нулю. Поскольку напряжение в месте КЗ несимметрично, в нем присутствуют также составляющие обратной, а при КЗ на землю - и нулевой последовательностей. Ясно, что по мере продвижения по цепи от места короткого замыкания к источникам питания напряжение прямой последовательности возрастает от U_1 до E_1 , а напряжение обратной и нулевой последовательностей уменьшается соответственно от U_2 и U_0 до нуля.

Схемы замещения отдельных последовательностей составляются только для одной фазы, как это делается в случае симметричного трехфазного КЗ.

Схема прямой последовательности является обычной схемой, которую составляют для расчета любого симметричного трехфазного режима. В зависимости от применяемого метода расчета и интересующего

момента переходного процесса в эту схему вводят генераторы и нагрузки соответствующими реактивностями и ЭДС.

По конфигурации схема замещения обратной последовательности будет полностью повторять схему, замещения прямой последовательности и отличается лишь тем, что в схеме обратной последовательности ЭДС всех генерирующих источников принимаются равными нулю; кроме того, считают, что сопротивления обратной последовательности генераторов и нагрузок не зависят от вида несимметрии и продолжительности переходного процесса.

Схема нулевой последовательности, как и схема обратной, не содержит ЭДС. Конфигурация схемы нулевой последовательности определяется схемой сети повышенных напряжений (110 кВ и выше), схемами соединения обмоток трансформаторов и режимом заземления их нейтралей.

Напряжения различных последовательностей при составлении соответствующих схем замещения прикладываются между местом повреждения и обратным проводом (для нулевой последовательности обратным проводом служит земля).

Токи прямой и обратной последовательности являются трехфазными симметричными токами. Токи нулевой последовательности являются однофазным током, разветвленным между фазами и возвращающимся, через землю и параллельные ей цепи. Путь циркуляции токов нулевой последовательности резко отличен от путей протекания токов прямой и обратной последовательностей, что и обуславливает значительное отличие схемы нулевой последовательности от схем других последовательностей. Это отличие заключается не только в конфигурациях схем, но и в значениях параметров схемы замещения. Параметры элементов схем для токов обратной, и нулевой последовательности приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Элементы схем замещения	Параметры элементов для токов			Примечание
	прямой послед.	обратной послед.	нулевой послед.	
1. Реактор	X_1	$X_2=X_1$	$X_0=X_1$	
2. Трансформатор	X_1	$X_2=X_1$	см.табл. 2.2	
3. Синхронные машины:				В практ. расчётах $X_2 \approx X_1$
а) без демпф. обмоток	X_1	$X_2 = 1,45X'_d \frac{S_\sigma}{S_n}$	$X_0 = (0,15 - 0,6)X''_d \cdot \frac{S_\sigma}{S_n}$	
б) с демпф. обмотками.	X_1	$X_2 = 1,22X''_d \frac{S_\sigma}{S_n}$		
4. Асинхронные двигатели	X_1	$X_2=X_1$	по данным зав.- изгот.	
5. Обобщённая нагрузка	X_1	$X_2 = 0,35 \frac{S_\sigma}{S_n}$		
6. Кабели	X_1	$X_2=X_1$	$X_0 = (3,5 - 4,6)X_1$	
7. Воздушные ЛЭП:	X_1	$X_2=X_1$		
одноцепная ЛЭП без тросов			$X_0=3,5X_1$	
то же со стальными тросами			$X_0=3X_1$	
то же с хорошо проводящими тросами			$X_0=2X_1$	
двухцепная ЛЭП без тросов			$X_0=5,5X_1$	
то же со стальными тросами			$X_0=4,7X_1$	
то же с хорошо проводящими тросами			$X_0=3X_1$	

Сопротивление нулевой последовательности трансформаторов и автотрансформаторов определяется схемой соединения обмоток и конструктивным исполнением. Так, если несимметрия возникла со стороны трансформатора, где обмотка соединена в треугольник или звезду без заземленной нейтрали, токи нулевой последовательности не могут проходить через данный трансформатор, и его сопротивление в схемах замещения нулевой последовательности равно бесконечности.

Путь для циркуляции токов нулевой последовательности имеет место лишь в тех трансформаторах, которые со стороны места повреждения имеют обмотку, соединенную в звезду с заземлением нейтрали. В этом случае сопротивление трансформатора должно быть учтено в схеме замещения нулевой последовательности.

Основные варианты соединения обмоток силовых трансформаторов, схемы замещения их для токов нулевой последовательности и формулы определения результирующего сопротивления нулевой последовательности данной ветви приведены в табл. 2.2.

Силовые автотрансформаторы работают с глухозаземленной нейтралью и, как правило, имеют обмотку, соединенную треугольником.

Схема замещения такого автотрансформатора аналогична схеме замещения силового трансформатора с соединением обмоток $Y_0/Y_0/\Delta$.

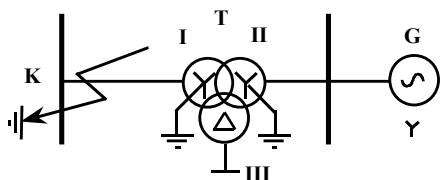
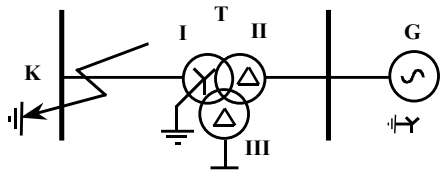
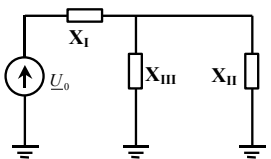
Как видно из табл. 2.2, для всех трансформаторов независимо от их типа и конструкции при соединении обмоток по схеме Y_0/Δ и $Y_0/\Delta-\Delta$ сопротивление нулевой последовательности равно сопротивлению прямой последовательности. Если при соединении обмоток Y_0/Y_0 (табл. 2.2-3) обеспечен путь для токов нулевой последовательности только со стороны одной из обмоток, а также если обмотки имеют соединение Y_0/Y , то для групп из трех однофазных, а также для четырех и пятистержневых и броневого трансформаторов будем иметь $X_{\mu 0} = \infty$, а для трехфазных трёхстержневых трансформаторов $X_0 = X_I + X_{\mu 0}$. Сопротивления отдельных обмоток двухобмоточного трансформатора приблизительно одинаковы и равны половине $U_k\%$, т.е. $X_I = X_{II} = 0,5X_I$.

При составлении схемы замещения нулевой последовательности прежде всего необходимо выяснить наличие замкнутого контура для токов нулевой последовательности. Для образования такого контура необходимо, чтобы в цепи, электрически связанной с точкой КЗ, имелась хотя бы одна заземленная нейтраль. При наличии нескольких электрически связанных между собой заземленных нейтралей токи нулевой последовательности разветвляются между ними.

Если в короткозамкнутой цепи имеются трансформаторы, то при наличии определенных условий токи нулевой последовательности могут трансформироваться.

Таблица 2.2

№ п/п	Схема соединения обмоток силового трансформатора	Схема замещения силового трансформатора	Результирующее сопротивление нулевой последовательности ветви с трансформатором
1			$X_0 = X_I + X_{II} = X_I$
2			$X_0 = X_I + X_{\mu 0} // (X_{II} + X_{r0})$
3			$X_0 = X_I + X_{\mu 0}$
4			$X_0 = X_I + X_{II} // X_{III}$
5		-	$X_0 = \infty$
6			$X_0 = X_I + X_{III} // (X_{II} + X_{r0})$
7			$X_0 = X_I + X_{III}$

8			
9			$X_0 = X_I + X_{II} // X_{III}$

$X_{\mu 0}$ - реактивность намагничивания нулевой последовательности трансформатора $X_{*\mu 0} = (0,3 \div 1)$ при номинальных параметрах трансформатора;

X_{G0} - результирующее сопротивление нулевой последовательности внешней цепи (генератора).

Для трансформаторов с соединением обмоток по схеме Y_0/Y_0 токи нулевой последовательности могут трансформироваться лишь при условии наличия с обеих сторон путей для их прохождения. Это в равной мере относится и к трехобмоточным трансформаторам. В трансформаторе с соединением обмоток Y_0/Δ ток нулевой последовательности со стороны звезды наводит в треугольнике ток той же последовательности. Этот ток проходит по соединенной в треугольник обмотке, не выходя за ее пределы. Токи в линии со стороны обмотки трансформатора, соединенной в треугольник, не содержат нулевой составляющей. Поэтому вся присоединенная со стороны треугольника сеть в схему нулевой последовательности не входит даже, в том случае, если в ней имеются заземленные нейтрали.

Составление схемы замещения нулевой последовательности следует начинать с места повреждения. При этом считается, что все три фазы в этой точке замкнуты накоротко, и к ней приложено напряжение нулевой последовательности. Далее в схему замещения вводится все те элементы, по которым протекают токи.

Если в нейтральных (генераторов, трансформаторов) имеются сопротивления, то они вводятся в схему нулевой последовательности с коэффициентом 3, учитывающим падение напряжения в этом сопротивлении, вызываемое суммой токов нулевой последовательности всех трех фаз. Сопротивление заземления нейтрали в схеме замещения нулевой последовательности включается последовательно с сопротивлением той обмотки, в нейтраль которой оно присоединено.

При преобразовании схемы нулевой последовательности необходимо иметь в виду, что концы элементов схемы, через которые, возвращаются токи нулевой последовательности, имеют потенциал земли. Поэтому их можно объединить в одну общую точку.

Результирующее сопротивление схем отдельных последовательностей определяют при помощи тех же приемов

преобразования схем, которые использовались ранее при вычислении токов трехфазного КЗ.

При расчете несимметричных. КЗ по расчетным кривым в силу приближенности данного метода для генераторов принято $X_2 = X_1$, поэтому можно ограничиться составлением только двух схем - прямой и нулевой последовательностей.

Пример 2.1. Составить схему замещения нулевой последовательности для схемы (рис. 2.3, а), в которой обмотки, трансформатора и прочие элементы обозначены порядковыми номерами.

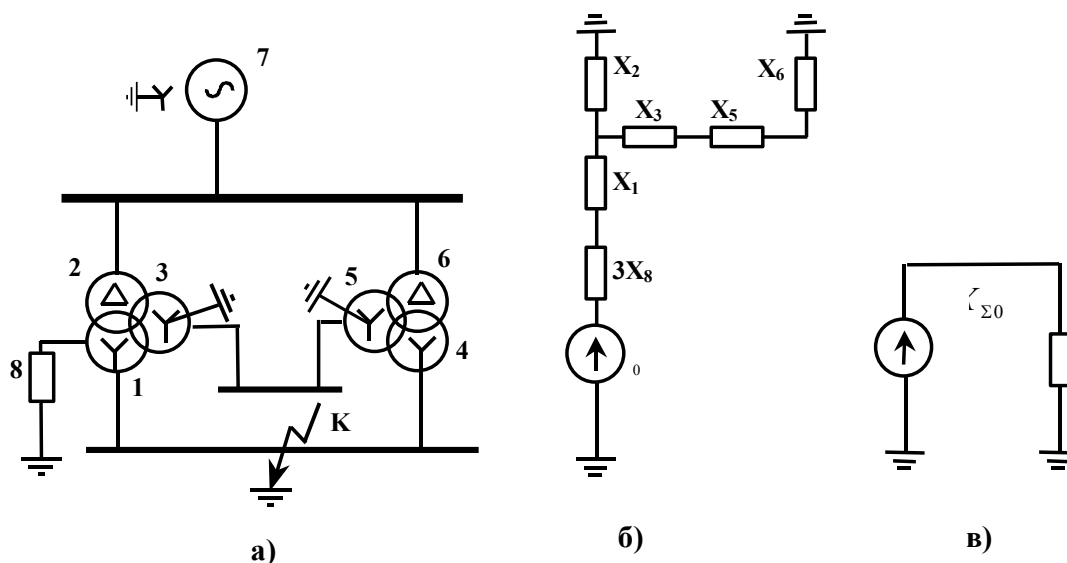


Рис. 2.3.

Если сопротивление заземления нейтрали (X_8) задано в Омах, то для получения его в о.е. воспользуется формулой

$$X_{*8} = X_8 \frac{S_{\delta}}{U_{cp.n}^2};$$

где $U_{cp.n}$ - среднее номинальное напряжение обмотки, нейтраль которой заземлена через X_8 .

После последовательного и параллельного сложения соответствующих сопротивлений схема, преобразуется к виду, приведенному на рис. 2.3 в, где $X_{\Sigma 0} = (X_6 + X_5 + X_3) // X_2 + X_1 + 3X_8$.

Пример 2.2. Определить результирующие сопротивления схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей при поперечной несимметрии в точке K_2 , схемы рис. 1.1. Данные генераторов, трансформаторов, линий электропередач такие же, как и в примере 1.1.

Схему замещения прямой последовательности рассматривать не будем, так как результирующие ЭДС и сопротивления ее были определены ($E_{\Sigma} = 1,09$; $X_{\Sigma 1} = 0,05$) в примере 1.5.

Схема замещения обратной последовательности приведена на рис. 2.4. Сопротивления элементов этой схемы определены через сопротивления схем прямой последовательности по формулам табл. 2.1. Сопротивления генераторов приняты равными $1,22 \cdot X_d'' \frac{S_{\bar{0}}}{S_H}$.

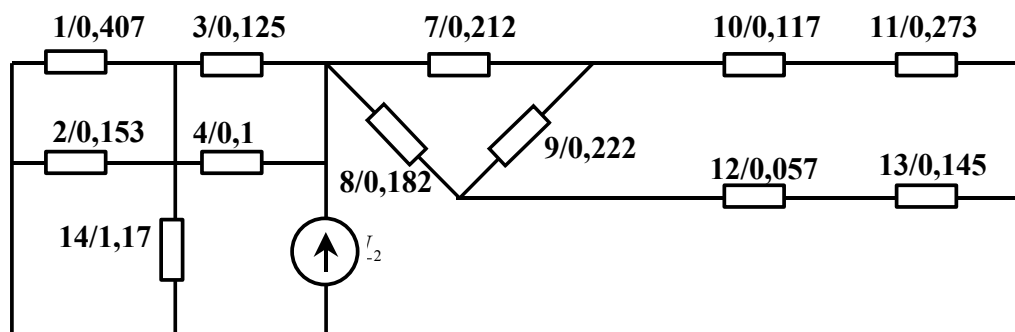


Рис.2.4.

Дальнейшее преобразование схемы заключается в определении результирующего сопротивления относительно места повреждения (рис. 2.5).

$$X_{15} = X_1 // X_2 = 0,111;$$

$$X_{16} = X_3 // X_4 = 0,0555;$$

$$X_{17} = X_{10} + X_{11} = 0,39;$$

$$X_{18} = X_{12} + X_{13} = 0,203;$$

$$X_{19} = \frac{X_7 \cdot X_8}{X_7 + X_8 + X_9} = 0,0625;$$

$$X_{20} = \frac{X_7 \cdot X_9}{X_7 + X_8 + X_9} = 0,0765;$$

$$X_{21} = \frac{X_8 \cdot X_9}{X_7 + X_8 + X_9} = 0,0655;$$

$$X_{22} = X_{15} // X_{14} + X_{16} = 0,157$$

$$X_{23} = (X_{20} + X_{17}) // (X_{21} + X_{18}) + X_{19} = 0,17.$$

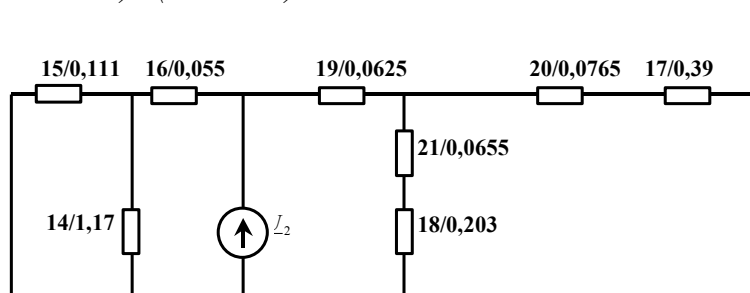


Рис.2.5.

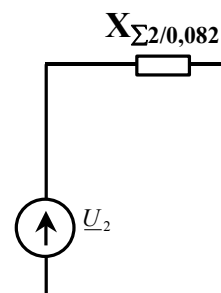


Рис.2.6.

Результирующее сопротивление схемы обратной последовательности (рис. 2.6) $X_{\Sigma 2} = X_{22} // X_{23} = 0,082$.

Схема замещения нулевой последовательности приведена на рис.2.7. Сопротивление линий определено в ней, как для одноцепных ЛЭП с хорошо проводящими тросами. После преобразования треугольника в звезду, последовательного и параллельного сложений соответствующих

сопротивлений схема преобразуется к виду, приведенному на рис. 2.8., где $X_{\Sigma 0}=0,0742$.

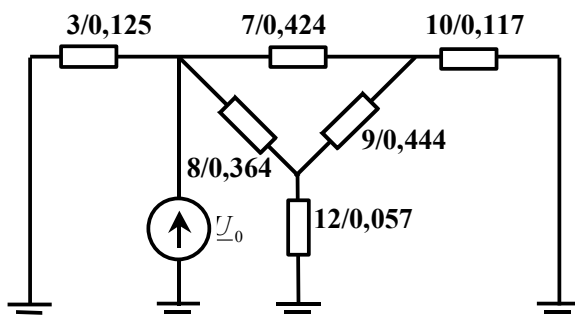


Рис.2.7.

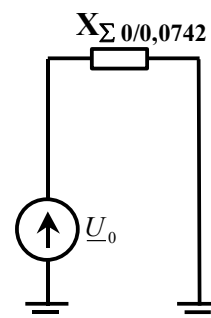


Рис.2.8.

2.3. Аналитический расчет аварийных токов и напряжений при несимметричных повреждениях

Определение аварийных токов и напряжений производится в предположении, что схемы отдельных последовательностей составлены для соответствующего режима и приведены к простейшему виду, т.е. найдены результирующая ЭДС $E_{\Sigma 1}$ и результирующие реактивности $X_{\Sigma 1}$, $X_{\Sigma 2}$, $X_{\Sigma 0}$ схем. Для удобства рассуждений (наглядности) КЗ рассматриваются не на проводах, а на отпайках, отходящих от проводов линий, причем сопротивление отпайки равно нулю. За положительное направление токов принимается направление к месту повреждения. Для упрощения записи индексы вида КЗ при величинах опускаются.

2.3.1. Двухфазное короткое замыкание

Для этого вида КЗ (рис. 2.9) токи нулевой последовательности отсутствуют. Замыкание между фазами В и С характеризуется следующими граничными условиями в месте повреждения: ток в фазе А равен нулю, так как она не охвачена аварийным режимом; сумма токов фаз В и С равна нулю, что следует из первого Закона Кирхгофа; фазные напряжения фаз В и С

одинаковы, так как фазы электрически соединены между собой, т.е.

$$\underline{I}_{KA} = 0; \quad (2.11)$$

$$\underline{I}_{KB} + \underline{I}_{KC} = 0 \text{ или } \underline{I}_{KB} = -\underline{I}_{KC}; \quad (2.12)$$

$$\underline{U}_{KB} = \underline{U}_{KC}. \quad (2.13)$$

Из совместного решения уравнений (2.1) – (2.3) и (2.11) – (2.13) находятся составляющие токов и напряжений

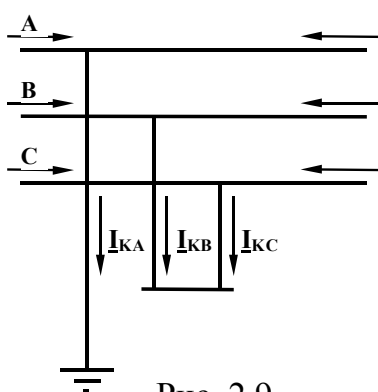


Рис. 2.9.

$$\underline{I}_{KA1} = -\underline{I}_{KA2}; \quad \underline{I}_{K0} = 0; \quad (2.14)$$

$$\underline{U}_{KA1} = \underline{U}_{KA2} = jX_{\Sigma 2} \underline{I}_{KA1}; \quad (2.15)$$

$$\underline{I}_{KA1} = \frac{\underline{E}_{\Sigma 1}}{j(X_{\Sigma 1} + X_{\Sigma 2})}. \quad (2.16)$$

Теперь легко находим ток КЗ в фазах В и С по (2.8. – 2.9) с учетом (2.14):

$$\underline{I}_{KB} = -j\sqrt{3}\underline{I}_{KA1}; \quad \underline{I}_{KC} = j\sqrt{3}\underline{I}_{KA1} \quad (2.17)$$

Фазные напряжения \underline{U}_{KA} , \underline{U}_{KB} , \underline{U}_{KC} находим по (2.7 –2.9) при условии $\underline{U}_{K0} = 0$:

$$\underline{U}_{KA} = 2jX_{\Sigma 2} \underline{I}_{KA1}; \quad (2.18)$$

$$\underline{U}_{KB} = \underline{U}_{KC} = -jX_{\Sigma 2} \underline{I}_{KA1}. \quad (2.19)$$

Обратим внимание на то, что напряжение неповрежденной фазы в два раза выше напряжения поврежденных фаз и противоположно по знаку. На рис.2.10 а, б представлены векторные диаграммы токов и напряжений в точке КЗ при двухфазном КЗ.

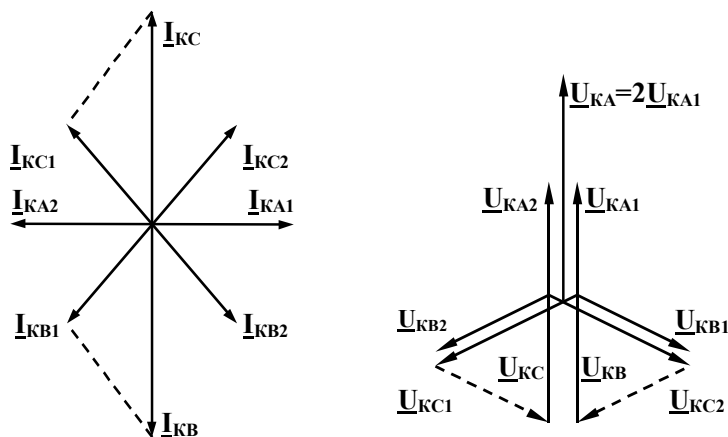


Рис.2.10

Пример 2.3. Определить аналитическим способом токи и напряжения двухфазного КЗ для схемы рис. 1.1.

Применительно к рассматриваемой схеме, составленной для сверхпереходного режима, при двухфазном КЗ в точке К₂ имеем результирующее сопротивление схем $X_{\Sigma 1}=0,085$, $X_{\Sigma 2}=0,082$ и результирующую ЭДС $E_{\Sigma 1}=1,09$.

Комплексные действующие значения основной гармоники симметричных составляющих, фазных токов и напряжений в о.е., рассчитанных по (2.14) – (2.19), будут равны:

$$\underline{I}_{KA1} = -\underline{I}_{KA2} = \frac{1,09}{j(0,085 + 0,082)} = -j6,52;$$

$$\begin{aligned}\underline{I}_{KB} &= -\underline{I}_{KC} = -j\sqrt{3}(-j6,52) = -11,29; \\ \underline{U}_{KA1} &= \underline{U}_{KA2} = j0,082(-j6,52) = 0,535; \\ \underline{U}_{KA} &= 2 \cdot j0,082(-j6,52) = 1,07; \\ \underline{U}_{KB} &= \underline{U}_{KC} = -j0,082(-j6,52) = -0,535.\end{aligned}$$

2.3.2. Однофазное короткое замыкание

При КЗ на землю фазы А (рис. 2.11) граничные условия в месте повреждения будут следующими: токи фаз В и С равны нулю, так как они не охвачены аварийным режимом; фазное напряжение фазы А равно нулю, так как она электрически соединена с землей, т.е.

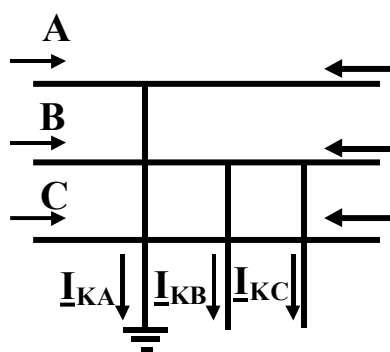


Рис. 2.11.

$$\underline{I}_{KB} = 0; \quad (2.20)$$

$$\underline{I}_{KC} = 0; \quad (2.21)$$

$$\underline{U}_{KA} = 0. \quad (2.22)$$

Решая совместно (2.1) - (2.3) и (2.20) - (2.22), находим составляющие фазных токов и напряжений:

$$\underline{I}_{KA1} = \underline{I}_{KA2} = \underline{I}_{K0} = \frac{1}{3} \underline{I}_{KA}; \quad (2.23)$$

$$\underline{I}_{KA1} = \frac{\underline{E}_{\Sigma 1}}{j(X_{\Sigma 1} + X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 0})}; \quad (2.24)$$

$$\underline{U}_{KA1} = j(X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 0}) \cdot \underline{I}_{KA1}; \quad (2.25)$$

$$\underline{U}_{KA2} = -jX_{\Sigma 2} \underline{I}_{KA1}; \quad (2.26)$$

$$\underline{U}_{K0} = -jX_{\Sigma 0} \underline{I}_{KA1}. \quad (2.27)$$

Ток в месте повреждения будет :

$$\underline{I}_{KA} = 3\underline{I}_{KA1}. \quad (2.28)$$

Фазные напряжения \underline{U}_{KB} и \underline{U}_{KC} в месте повреждения находим по (2.8) и (2.9):

$$\underline{U}_{KB} = j[(a^2 - a)X_{\Sigma 2} + (a^2 - 1)X_{\Sigma 0}] \underline{I}_{KA1}; \quad (2.29)$$

$$\underline{U}_{KC} = j[(a - a^2)X_{\Sigma 2} + (a - 1)X_{\Sigma 0}] \underline{I}_{KA1}. \quad (2.30)$$

На рис. 2.12 представлены векторные диаграммы токов и напряжений при однофазном КЗ. Векторная диаграмма токов строится на основании формулы (2.23), а напряжений – исходя из того, что $\underline{U}_{KA1} = -(\underline{U}_{KA2} + \underline{U}_{K0})$. Угол θ между векторами \underline{U}_{KB} и \underline{U}_{KC} изменяется от 60° до 180° .

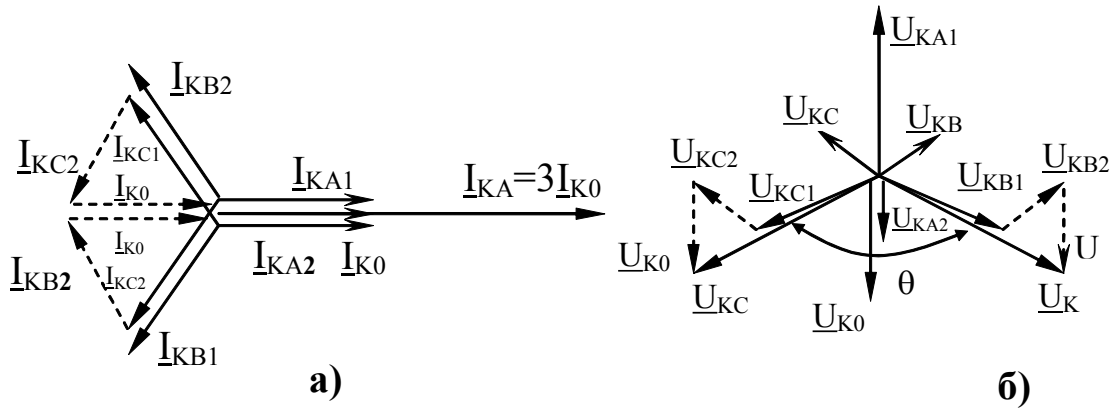


Рис. 2.12

Пример 2.4. Определить аналитическим способом токи и напряжения однофазного КЗ для схемы рис.1.1.

Для нашего примера при однофазном КЗ в точке K_2 ($X_{\Sigma I}=0,085$, $X_{\Sigma 2}=0,082$, $X_{\Sigma 0}=0,0742$, $E_{\Sigma I}=1,09$) будем иметь в соответствии с (2.23) – (2.30)

$$\underline{I}_{KA1} = \underline{I}_{KA2} = \underline{I}_{K0} = \frac{1,09}{j(0,085 + 0,082 + 0,0742)} = -j4,52;$$

$$\underline{I}_{KA} = 3(-j4,52) = -j13,56;$$

$$\underline{U}_{KA1} = j(0,082 + 0,0742)(-j4,52) = 0,706;$$

$$\underline{U}_{KA2} = -j0,082(-j4,52) = -0,371;$$

$$\underline{U}_{K0} = -j0,0742(-j4,52) = -0,335;$$

$$\underline{U}_{KB} = j[(-j\sqrt{3}) \cdot j0,082 + (-1,5 - j\frac{\sqrt{3}}{2}) \cdot j0,0742](-j4,52) = 0,502 - j0,93;$$

$$\underline{U}_{KC} = j[(j\sqrt{3}) \cdot j0,082 + (-1,5 + j\frac{\sqrt{3}}{2}) \cdot j0,0742](-j4,52) = -0,502 - j0,93.$$

2.3.3. Двухфазное короткое замыкание на землю.

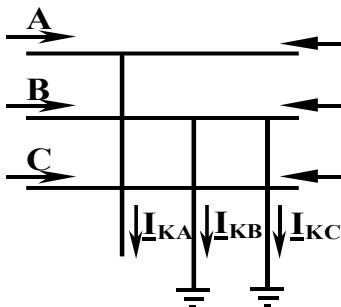


Рис. 2.13

Для этого вида КЗ (рис. 2.13) граничные условия в месте повреждения будут $\underline{I}_{KA}=0$; $\underline{U}_{KB}=0$; $\underline{U}_{KC}=0$. Симметричные составляющие токов и напряжений находятся аналогично, как и в предыдущих случаях:

$$\underline{U}_{KA1} = \underline{U}_{KA2} = \underline{U}_{K0} = \frac{1}{3}\underline{U}_{KA} = \underline{I}_{KA1} \frac{X_{\Sigma 0}X_{\Sigma 2}}{X_{\Sigma 0} + X_{\Sigma 2}}; \quad (2.31)$$

$$\underline{I}_{KA1} = \frac{E_{\Sigma 1}}{j(X_{\Sigma 1} + \frac{X_{\Sigma 2}X_{\Sigma 0}}{X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 0}})}; \quad (2.32)$$

$$\underline{I}_{KA2} = -\underline{I}_{KA1} \cdot \frac{X_{\Sigma 0}}{X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 0}}; \quad (2.33)$$

$$\underline{I}_{K0} = -\underline{I}_{KA1} \cdot \frac{X_{\Sigma 2}}{X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 0}}. \quad (2.34)$$

Токи поврежденных фаз в месте КЗ находим по (2.8) и (2.9):

$$\underline{I}_{KB} = \left(a^2 - \frac{X_{\Sigma 2} + aX_{\Sigma 0}}{X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 0}}\right)\underline{I}_{KA1}; \quad (2.35)$$

$$\underline{I}_{KC} = \left(a - \frac{X_{\Sigma 2} + a^2X_{\Sigma 0}}{X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 0}}\right)\underline{I}_{KA1}. \quad (2.36)$$

На рис.2.14 представлены векторные диаграммы токов и напряжений при двухфазном КЗ на землю.

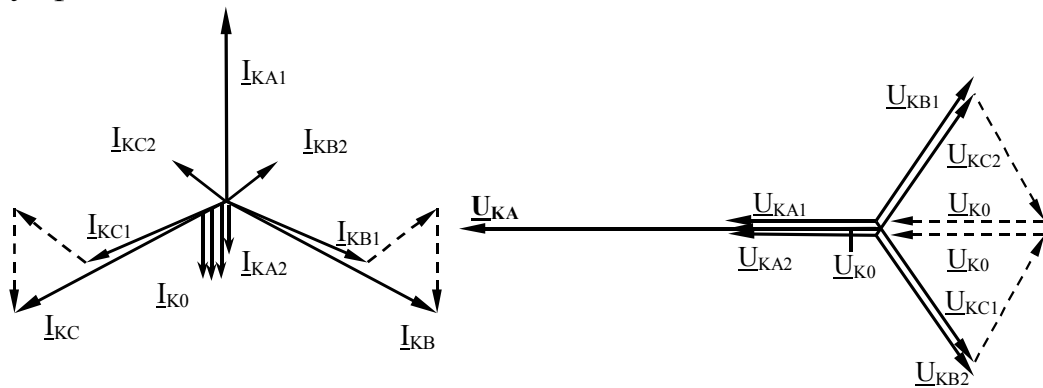


Рис. 2.14

Векторная диаграмма токов рис. 2.14 построена исходя из того, что ток $\underline{I}_{KA1} = -(\underline{I}_{KA2} + \underline{I}_{K0})$, а векторная диаграмма напряжений - согласно уравнению (2.31).

Пример 2.5. Определить аналитическим способом токи и напряжения двухфазного КЗ на землю для схемы рис.1.1.

Как и в предыдущих случаях, при двухфазном КЗ на землю в точке K_2 имеем: $X_{\Sigma 1} = 0,085$, $X_{\Sigma 2} = 0,082$, $X_{\Sigma 0} = 0,0742$, $E_{\Sigma 1} = 1,09$, тогда по (2.31)–(2.36) находим :

$$\begin{aligned} \underline{I}_{KA1} &= \frac{1,09}{j(0,085 + 0,082 // 0,0742)} = -j8,79; \\ \underline{I}_{KA2} &= j8,79 \frac{0,0742}{0,082 + 0,0742} = j4,16; \\ \underline{I}_{K0} &= j8,79 \frac{0,082}{0,082 + 0,0742} = j4,63; \\ \underline{I}_{KB} &= (-0,5 - j0,86 - \frac{0,082 + (-0,5 + j0,86) \cdot 0,0742}{0,082 + 0,0742})(-j8,79) = -11,14 + j6,93; \\ \underline{I}_{KC} &= (-0,5 + j0,86 - \frac{0,082 + (-0,5 - j0,86) \cdot 0,0742}{0,082 + 0,0742})(-j8,79) = 11,14 + j6,93; \\ \underline{U}_{KA1} &= \underline{U}_{KA2} = \underline{U}_{K0} = j0,082 // j0,0742(-j8,79) = 0,343; \end{aligned}$$

$$\underline{U}_{KA} = 3\underline{U}_{KA1} = 3 \cdot 0,343 = 1,029.$$

2.4. Правило эквивалентности прямой последовательности и его применение в расчетах

Анализ выражений для определения тока прямой последовательности при различных видах КЗ позволяет написать общее выражение для определения его величины в месте несимметричного повреждения:

$$\underline{I}_{K1}^{(n)} = \frac{\underline{E}_{\Sigma 1}}{j(X_{\Sigma 1} + X_{\Delta}^{(n)})}; \quad (2.37)$$

где $X_{\Delta}^{(n)}$ – дополнительная реактивность, вводимая в схему прямой последовательности, величина которой в зависимости от вида КЗ определяется только значениями $X_{\Sigma 2}$ и $X_{\Sigma 0}$.

Кроме того, поскольку фазные токи в месте КЗ также пропорциональны току прямой последовательности, то величину тока любого вида КЗ можно найти из общего выражения

$$\underline{I}_K^{(n)} = m^{(n)} \underline{I}_{K1}^{(n)}, \quad (2.38)$$

где $m^{(n)}$ – коэффициент пропорциональности, зависящий от вида КЗ.

Значения $X_{\Delta}^{(n)}$ и $m^{(n)}$ для различных видов КЗ приведены в табл.2.3.

Таблица 2.3

Вид короткого замыкания	$X_{\Delta}^{(n)}$	Коэффициент $m^{(n)}$
Трёхфазное КЗ (3)	0	1
Двухфазное КЗ (2)	$X_{\Sigma 2}$	$\sqrt{3}$
Однофазное КЗ (1)	$X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 0}$	3
Двухфазное КЗ на землю (1.1)	$\frac{X_{\Sigma 2} X_{\Sigma 0}}{X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 0}}$	$\sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{X_{\Sigma 2} X_{\Sigma 0}}{(X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 0})^2}}$

Обобщенная запись выражения (2.37) позволила Н.Н. Щедрину сформулировать следующее правило.

Ток прямой последовательности при любом несимметричном КЗ может быть определен как ток при трёхфазном КЗ в точке, удалённой от действительной точки КЗ на дополнительную реактивность $X_{\Delta}^{(n)}$, которая не зависит от параметров схемы прямой последовательности и для каждого вида КЗ определяется результирующими сопротивлениями обратной и нулевой последовательностей ($X_{\Sigma 2}$ и $X_{\Sigma 0}$) относительно рассматриваемой точки схемы и видом повреждения.

Это правило Н.Н. Щедрина (эквивалентности прямой последовательности) справедливо при условии, что рассматривается только основная гармоника тока несимметричного КЗ.

При любом несимметричном КЗ в точке K_2 схемы рис. 1.1 порядок расчета аварийного тока в месте повреждения с использованием правила эквивалентности прямой последовательности будет следующим.

Составляются схема замещения обратной и нулевой последовательностей относительно места повреждения, из которых получаются результирующие сопротивления $X_{\Sigma 2}$ и $X_{\Sigma 0}$.

По значениям $X_{\Sigma 2}$ и $X_{\Sigma 0}$ определяется для рассматриваемого вида КЗ величина шунта $X_{\Delta}^{(n)}$.

Составляется схемы замещения прямой последовательности относительно места повреждения.

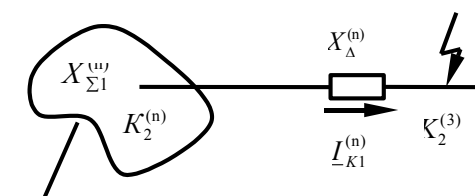


Схема замещения прямой последовательности

Рис. 2.15

Точка КЗ удаляется за сопротивление, равное величине шунта.

$$I_{*Kt}^{(2)} = \sqrt{3} I_{*K1t}^{(2)} ;$$

$$I_{*Kt}^{(1)} = 3 I_{*K1t}^{(1)} ;$$

$$I_{*Kt}^{(1,1)} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{X_{*\Sigma 2} X_{*\Sigma 0}}{(X_{*\Sigma 2} + X_{*\Sigma 0})^2}} \cdot I_{*K1t}^{(1,1)}$$

Определяется ток прямой последовательности

$$\underline{I}_1^{(n)} = \underline{I}_K^{(3)} . \quad (2.39)$$

Определяется полный ток в месте повреждения

$$\underline{I}_K^{(n)} = m^{(n)} \underline{I}_{K1}^{(n)} . \quad (2.40)$$

Напряжение прямой последовательности в месте повреждения при любом несимметричном КЗ (как видно из рис. 2.15) определяется по выражению

$$\underline{U}_{K1}^{(n)} = \underline{I}_{K1}^{(n)} X_{\Delta}^{(n)} . \quad (2.41)$$

Важно отметить, что величина тока прямой последовательности в месте КЗ, а также связанные с нею величины токов других последовательностей, зависят от сопротивлений всех последовательностей элементов рассматриваемой схемы. Так, например, если нейтраль трансформатора, на выводах которого имеется однофазное или двухфазное замыкание на землю, заземлить через какое-либо сопротивление, то это скажется на величинах токов всех последовательностей, хотя токи прямой и обратной последовательностей через это сопротивление и не протекают.

2.5. Расчет несимметричных КЗ по расчетным кривым

Расчетные кривые могут быть использованы для определения тока прямой последовательности в произвольный момент переходного процесса любого несимметричного КЗ. Для этого в соответствии с правилом эквивалентности прямой последовательности необходимо в схеме замещения прямой последовательности точку КЗ удалить за величину шунта $X_{\Delta}^{(n)}$ для данного вида КЗ и рассматривать его как симметричное. Расчет тока прямой, последовательности в месте повреждения можно производить как по общему изменению так и с учетом индивидуального изменения токов.

В общем случае при расчете с учетом индивидуального изменения токов расчетная реактивность выделяемой генерирующей ветви при любом несимметричном КЗ определяется как

$$X_{расч}^{(n)} = \frac{X_{\Sigma I} + X_{\Delta}^{(n)}}{C_M} \frac{S_{HM}}{S_6}, \quad (2.42)$$

где $X_{\Sigma I}$ и $X_{\Delta}^{(n)}$ - результирующая реактивность прямой последовательности (для начального момента) и дополнительная реактивность для данного вида КЗ;

S_{HM} - суммарная номинальная мощность генератора выделяемой ветви, МВ·А;

C_M - коэффициент распределения для той же ветви, определяемый в схеме прямой последовательности, т.е. тот же коэффициент распределения, что и при трехфазном КЗ в рассматриваемой точке.

При расчете по общему изменению, очевидно, $C=1$, а под S_{HM} следует понимать суммарную номинальную мощность всех генераторов схемы.

В силу приближенности данного метода расчета можно для упрощения

всегда принимать $X_{\Sigma 2}=X_{\Sigma 1}$, т.е. считать результирующую реактивность обратной последовательности равной результирующей реактивности, определяемой для трехфазного КЗ в той же точке. По найденной расчетной реактивности при данном виде КЗ, используя соответствующие расчетные кривые, находят для заданного момента времени t относительную величину тока прямой последовательности.

Величина периодической слагающей тока в месте КЗ при этом будет

$$I_{Kt}^{(n)} = m^{(n)} I_{*K1t}^{(n)} I_{H\Sigma}, \text{ кА} \quad (2.43)$$

или при расчете с учетом индивидуального изменения

$$I_{Kt}^{(n)} = m^{(n)} (I_{*K1t}^{(n)} I_{H1} + I_{*K1t}^{(n)} I_{H1} + \dots + I_{*K1t}^{(n)} I_{HM}), \text{ кА} \quad (2.44)$$

где $m^{(n)}$ - коэффициент пропорциональности, значения которого для каждого вида КЗ приведены ранее;

$I_{H\Sigma}$ - суммарный номинальный ток генераторов, приведенный к напряжению той ступени, где рассматривается КЗ;

$I_{H\text{I}}, I_{H\text{II}}, \dots, I_{H\text{M}}$ - номинальные токи тех же ветвей, приведенные к напряжению той ступени, где рассматривается КЗ;

$I_{*K1\text{I}}, I_{*K1\text{II}}, \dots, I_{*K1\text{M}}$ - относительные токи прямой последовательности, найденные по расчетным кривым для выделенных ветвей I, II, ..., M.

Источник бесконечной мощности при расчете несимметричных КЗ, следует учитывать так же, как и при расчете трехфазного КЗ. Его реактивность можно определить по выражению $X_{*C} = \frac{X_{\Sigma}^{(n)}}{C_C}$ считая в нем

$X_{\Sigma}^{(n)} = X_{\Sigma\text{I}} + X_{\Delta}^{(n)}$. Затем найденный по (1.30) ток прямой последовательности от этого источника следует прибавить к току той же последовательности других генераторов.

Пример 2.6. Определить установившийся и сверхпереходный токи для схемы рис. 1.1 при однофазном КЗ в точке K_2 . Расчет произвести по индивидуальному изменению тока.

Воспользуемся схемой замещенной, приведенной на рис. 1.19.

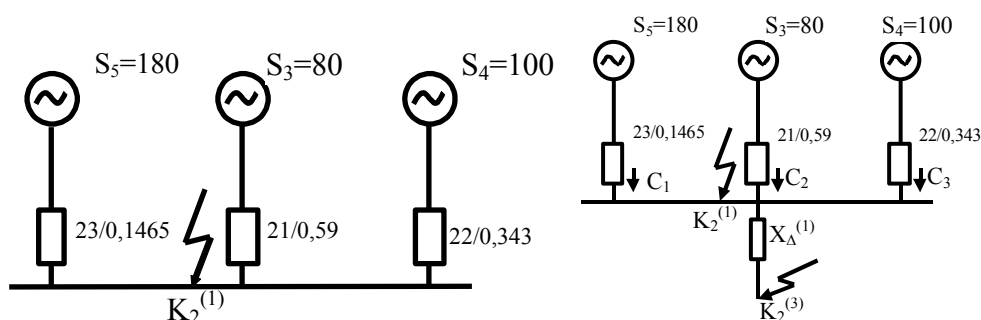


Рис. 2.16

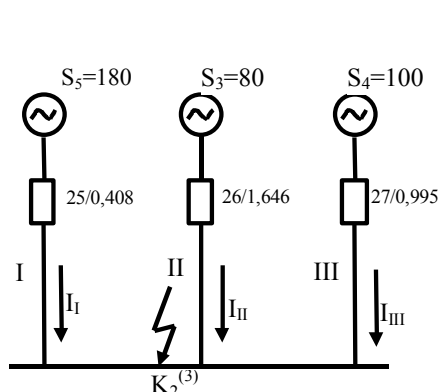


Рис. 2.17

Удалим место повреждения за величину шунта $X_{\Delta}^{(1)}$ (рис. 2.16, б).

Пользуясь способом токораспределения, приводим схему рис. 2.16, б к схеме рис. 2.17.

$$X_{\text{экв}} = X_{21} // X_{22} // X_{23} = 0,09;$$

$$X_{\text{рез}} = X_{\text{экв}} + X_{\Delta}^{(1)} = 0,09 + 0,1562 = 0,2462,$$

$$\text{где } X_{\Delta}^{(1)} = X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 0} = 0,082 + 0,0742 = 0,1562;$$

$$C_{\text{I}} = \frac{X_{\text{экв}}}{X_{23}} = \frac{0,09}{0,1465} = 0,61;$$

$$C_{\text{II}} = \frac{X_{\text{экв}}}{X_{21}} = \frac{0,09}{0,59} = 0,14;$$

$$C_{\text{III}} = \frac{X_{\text{экв}}}{X_{22}} = \frac{0,09}{0,343} = 0,25;$$

$$X_{25} = \frac{X_{pez}}{C_1} = \frac{0,2462}{0,61} = 0,408;$$

$$X_{26} = \frac{0,2462}{0,14} = 1,646;$$

$$X_{27} = \frac{0,2462}{0,25} = 0,955.$$

Определим расчетные значения сопротивлений каждого луча:

$$X_{Iрасч}^{(1)} = X_{25} \cdot \frac{S_5}{S_6} = 0,408 \frac{180}{100} = 0,7344;$$

$$X_{IIрасч}^{(1)} = X_{26} \cdot \frac{S_3}{S_6} = 1,646 \frac{80}{100} = 1,317;$$

$$X_{IIIрасч}^{(1)} = X_{27} \cdot \frac{S_4}{S_6} = 0,955 \frac{100}{100} = 0,955.$$

По расчетным кривым определяем токи прямой последовательности в ветвях:

$$I_{*1t=0I}^{(1)} = 1,37; I_{*1t=\infty I}^{(1)} = 1,45; I_{*1t=0II}^{(1)} = 0,72;$$

$$I_{*1t=\infty II}^{(1)} = 0,885; I_{*1t=0III}^{(1)} = 1,13; I_{*1t=\infty III}^{(1)} = 1,32.$$

Пользуясь выражением (2.44), определяем величину периодической слагающей тока в точке К₂:

$$I''^{(1)} = 3(1,37 \cdot 0,9037 + 0,72 \cdot 0,4016 + 1,13 \cdot 0,502) = 3,823 \text{ кА};$$

$$I_{\infty}^{(1)} = 3(1,45 \cdot 0,9037 + 0,885 \cdot 0,4016 + 1,32 \cdot 0,502) = 2,328 \text{ кА}.$$

Глава 3. Расчет токов короткого замыкания в электросетях 0,4-35 кВ

3.1. Особенности расчетов токов КЗ в распределительных сетях

Под распределительными сетями (р.с.) понимают воздушные и кабельные сети в городах и сельской местности напряжением 0,4-35 кВ, по которым электроэнергия передается потребителям от питающих центров - электростанций и подстанций энергосистем. В распределительную сеть входят линии 6-35 кВ от шин питающих центров, понизительные трансформаторы, воздушные и кабельные линии низшего напряжения 0,4 кВ до вводов в жилые дома и небольшие предприятия.

Основной особенностью р.с. является соотношение сопротивлений линий и трансформаторов питающей их энергосистемы с сопротивлениями линий и трансформаторов рассчитываемой сети, что позволяет значительно упростить расчеты.

Путем преобразования все генераторы и сети энергосистемы (рис. 3.1) можно привести к простейшей схеме замещения (рис. 3.1, б), в которой все генераторы заменяются одним эквивалентным генератором с ЭДС E_c , а сопротивления всех линий, трансформаторов и генераторов до шин подстанции, питающей р.с., заменяются сопротивлением энергосистемы Z_c . Сопротивления линий и трансформаторов р.с. от шин питающей подстанции до места КЗ суммируются и заменяются одним сопротивлением $Z_{p.c.}$. Таким образом, вся расчетная схема приводится к схеме на рис. 3.1, б. Для современных мощных энергосистем суммарное сопротивление $Z_k = Z_c + Z_{p.c.}$ оказывается очень велико, а ток КЗ мал. В результате короткое замыкание не сопровождается понижением напряжения генераторов и работой их регуляторов возбуждения, что позволяет не учитывать переходные процессы в генераторах. Последнее обстоятельство позволяет считать, что при КЗ за понижающим трансформатором напряжение на выводах его первичной обмотки практически остается неизменным и равным своему номинальному значению.

Поэтому ток трехфазного КЗ $I_k^{(3)}$ через сопротивление Z_k определяется по закону Ома $I_k^{(3)} = \frac{E_c}{Z_c + Z_{p.c.}}$. В практических расчетах фазовая ЭДС генераторов E_c пересчитывается и заменяется средненоминальным напряжением $U_{ср.н.}$

$$I_k^{(3)} = \frac{U_{ср.н.}}{\sqrt{3}(Z_c + Z_{k.c.})} \quad (3.1)$$

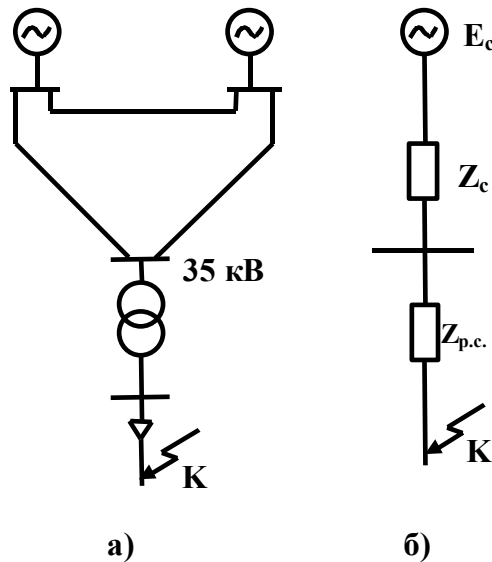


Рис. 3.1.

Величина Z_c определяется довольно сложным расчетом, который обычно выполняется с помощью ЭВМ или специальных расчетных моделей. В результате для всех подстанций и электростанций энергосистемы определяется ток КЗ на шинах $I_{ш}^{(3)}$, питающих р.с., а по нему определяется Z_c для расчетов токов КЗ в самой распределительной сети:

$$Z_c = \frac{U_{ср.н.}}{\sqrt{3}I_{ш}^{(3)}}. \quad (3.2)$$

Иногда вместо тока трехфазного КЗ задается мощность КЗ - $S_{КЗ}$. Это – условная величина, равная $S_{КЗ} = \sqrt{3}U_{ср.н.}I_{ш}^{(3)}$. Сопротивление энергосистемы в этом случае определяется по выражению

$$Z_c = \frac{U_{ср.н.}^2}{S_{КЗ}}. \quad (3.3)$$

Следовательно, исходными данными для расчетов токов КЗ в распределительных сетях являются величины $U_{ср.н.}$ и Z_c . Величина $Z_{р.с.}$ определяется для каждого конкретного случая по данным рассчитываемой сети.

В ряде случаев сопротивление Z_c по сравнению с $Z_{р.с.}$ настолько мало, что им можно пренебречь и принять $Z_c = 0$. В этом случае можно считать, что р.с. питается от системы бесконечной мощности, и ток трехфазного КЗ определяется по выражению

$$I_k^{(3)} = \frac{U_{ср.н.}}{\sqrt{3}Z_{р.с.}}. \quad (3.4)$$

Следующая особенность р.с. - это необходимость учета активных сопротивлений. В современных сетях с напряжением 110 кВ и выше активные сопротивления настолько малы по сравнению с индуктивными, что ими обычно пренебрегают и считают полное сопротивление цепи чисто индуктивным: $Z=X$. Такое допущение практически не сказывается на точности расчетов, но серьезно облегчает их, позволяя все преобразования схем и расчет сопротивлений выполнять арифметически, а не геометрически. Считается, что пренебрегать активным сопротивлением, можно, если $x/r > 3$. При этом определение тока КЗ, без учета активного сопротивления дает ошибку не более 5%.

В р.с. индуктивное сопротивление воздушных линий X составляет 0,3 Ом/км, активное сопротивление r для алюминиевых проводов сечением 16-70 мм² колеблется в пределах $2 \div 0,5$ Ом/км.; отношение x/r при этом значительно меньше 3 и колеблется в пределах $0,15 \div 0,6$. Индуктивное сопротивление кабелей с сечением 16-240 мм² для напряжений до 1000 В составляет 0,06 Ом/км, а для напряжений 6-10 кВ - 0,08 Ом/км, и отношение x/r еще меньше, чем у воздушных линий. Те же выводы можно сделать, рассмотрев x/r у трансформаторов. Поэтому одним из основных требований является обязательный учет активных сопротивлений сети. В этом случае расчетное уравнение (3.1) приводится к окончательному виду:

$$I_k^{(3)} = \frac{U_{ср.н.}}{\sqrt{3} \sqrt{(X_c + X_{р.с.})^2 + r_{р.с.}^2}}. \quad (3.5)$$

Важной особенностью р.с., является возможность не учитывать апериодическую составляющую тока КЗ, которая вследствие большего значения активного сопротивления затухает очень быстро, за сотые доли секунды.

В р.с. при КЗ активное сопротивление проводов увеличивается за счет нагрева их током КЗ, что вызывает уменьшение тока, которое условно называют тепловым спадом тока. Этот эффект особенно сильно проявляется на участке воздушной сети, выполненной стальными проводами. Поэтому расчетным условием для распределительных сетей является трехфазное КЗ, для которого и производятся все расчеты.

3.2. Расчет токов короткого замыкания в сетях напряжением до 1000 В.

Точность расчета токов КЗ в низковольтных сетях (0,23-0,69 кВ) зависит главным образом от того, насколько правильно и полно учтены все сопротивления короткозамкнутой цепи.

При составлении схем замещения в качестве основной ступени следует выбирать ступень напряжения, на которой находится точка замыкания. Поскольку сопротивления большинства элементов рассматриваемых сетей, задаются в именованных единицах, то весь расчет обычно ведут также в именованных единицах, при этом ввиду малости самих сопротивлений их выражают в миллиомах (мОм).

Если сопротивление системы до данного трансформатора известно, оно пересчитывается в миллиомы и прибавляется к сопротивлениям остальных элементов цепи. Так, например, если известна мощность КЗ на стороне первичной обмотки трансформатора, то сопротивление системы в мОм определяется $X_c = U_{ср.н.}^2 \cdot 10^3 / S_{КЗ}$,

где $U_{ср.н.}$ - средненоминальное напряжение ступени, на которой находится точка КЗ, кВ;

$S_{КЗ}$ - мощность КЗ, кВ·А.

Активное и индуктивное сопротивления понижающего трансформатора в миллиомах, приведенные к ступени низшего напряжения, определяются по следующим формулам:

$$r_T = \frac{P_k U_n^2}{S_n^2} 10^6; \quad (3.6)$$

$$X_T = \frac{U_n^2 \sqrt{U_k^2 - \left(\frac{P_k}{10S_n}\right)^2}}{S_n} 10^4, \quad (3.7)$$

где S_n - номинальная мощность трансформатора, кВ·А;

U_n - номинальное напряжение вторичной обмотки, кВ;

P_k - потери КЗ в трансформаторе, кВт;

U_k - напряжение КЗ трансформатора, %.

Все необходимые данные указываются в ГОСТах, каталогах и на щитах трансформаторов. Отметим, что сопротивления r_T и x_T можно принять по справочным данным, которые приведены в приложении П-10 [1].

Индуктивное сопротивление воздушных и кабельных линий длиной l подсчитывается по формулам

$$X_{ел} = X_{уд.в} \cdot l, \quad (3.8)$$

$$X_{кл} = X_{уд.к} \cdot l, \quad (3.9)$$

где $X_{уд.в}$ - удельное индуктивное сопротивление воздушных линий: $X_{уд.в} = 0,3 \text{ мОм/м}$;

$X_{уд.к}$ - то же кабельных линий: $X_{уд.к} = 0,06 \text{ мОм/м}$.

Активное сопротивление в мОм воздушных и кабельных линий вычисляют по известному выражению

$$r = \rho \frac{l}{S} 10^3, \quad (3.10)$$

где ρ - удельное сопротивление (для алюминия при расчете токов КЗ рекомендуется брать $\rho = 3 \cdot 10^{-2}$ Ом·мм²/м);

l - длина линии, м;

S - сечение проводов линии, мм².

Величины $X_{уд.в.}$, $X_{уд.к.}$ и r в зависимости от сечения проводника более точно можно определить по справочным данным [2].

При расчетах токов КЗ в сетях до 1000 В в ряде случаев приходится учитывать активные и индуктивные сопротивления шин, обмоток трансформаторов тока и реле автоматических выключателей, переходные сопротивления в контактах рубильников, выключателей, предохранителей. Точные данные для некоторых конструкций можно найти только в фирменных каталогах и подобных справочных материалах; для приближенных вычислений можно пользоваться средними значениями сопротивлений по приложению П-10 [1]. Следует отметить, что количество различных конструкций этих аппаратов очень велико, точные значения их сопротивлений найти трудно, а абсолютная величина их по сравнению с сопротивлениями силовых трансформаторов и линий мала, поэтому во многих случаях они не учитываются.

Преобразование схемы для определения токов КЗ в рассматриваемых сетях чаще всего сводится к сложению последовательно соединенных активных и индуктивных сопротивлений.

Величина ударного тока КЗ вычисляется аналогично, как и в высоковольтных сетях.

Асинхронные электродвигатели следует учитывать только в том случае, если они расположены в непосредственной близости от места КЗ. Влияние асинхронных двигателей на величину ударного тока учитывается так же, как и в высоковольтных установках, а именно путем прибавления к нему величины $i_m = 6,5I_n$, где I_n - номинальный ток электродвигателей, участвующих в питании точки КЗ, т.е.

$$i_y = \sqrt{2}K_y I_K^{(3)} + 6,5I_n, \quad (3.11)$$

Пример 3.1. Определить ток трехфазного КЗ - в точке K_1 для схемы рис. 5. Трансформатор мощностью 400 кВ·А питается от системы бесконечной мощности, которая соединена со сборкой 400 В алюминиевыми шинами (50 x 5) мм². Шины расположены в одной плоскости, расстояние между ними 240 мм. Общая длина шин от выводов трансформатора до автоматических выключателей отходящих линий - 15 м. На стороне 0,4 кВ трансформатора установлен рубильник Р на 1000 А, на отходящих линиях автоматические выключатели АВ на 200 А и трансформаторы тока 200/5. Воздушная линия длиной 200 м выполнена алюминиевыми проводами сечением (3 x 70 + 1 x 35) мм² и соединена со сборкой 0,4 кВ алюминиевым кабелем длиной 20 м, сечением (3 x 70 + 1 x 25) мм² - в алюминиевой оболочке.

Среднее геометрическое расстояние между шинами $1,26 \cdot 240 = 300$ мм. По приложению П-10 [I] активное сопротивление шин $r=0,142 \cdot 15=2,12$ мОм; индуктивное - $x=0,2 \cdot 15=3$ мОм.

Величины активных и индуктивных сопротивлений элементов короткозамкнутой цепи приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Элементы схемы	r , мОм	x , мОм
Трансформатор	5,7	17
Шины	2,12	3
Рубильник	0,08	-
Автомат	$0,36+0,6=0,96$	0,28
Трансформатор тока	0,19	0,17
Кабель	8,86	1,6
Воздушные линии	82,4	64
Результирующие сопротивления	100,31	86,05

Ток трехфазного КЗ в конце воздушной линии по (3.5)

$$I_K^{(3)} = \frac{400 \cdot 1000}{\sqrt{3} \sqrt{100,31^2 + 86,05^2}} = 1690 \text{ А.}$$

Если пренебречь сопротивлениями шин и аппаратуры, ток КЗ будет равен

$$I_K^{(3)} = \frac{400 \cdot 1000}{\sqrt{3} \sqrt{97,06^2 + 82,6^2}} = 1740 \text{ А.}$$

Разница результатов двух расчетов - около 3%. Поэтому во многих случаях при расчете токов КЗ на воздушных линиях 0,4 кВ сопротивлением шин и аппаратуры можно пренебречь. Для оценки возможности упрощения расчетов можно руководствоваться требованиями правил устройств электроустановок (ПУЭ) по чувствительности релейных защит.

В четырехпроводных сетях 400/230 В и 230/133 В с заземленным нулем, как правило, приходится выполнять расчет токов как трехфазного, так и однофазного КЗ. Вызвано это тем, что ток однофазного КЗ в таких сетях очень сильно зависит от схемы соединения обмоток питающего их трансформатора и конструкции нулевого заземляющего провода и обычно значительно меньше токов трехфазного КЗ.

Обычная защита от междуфазных КЗ в этом случае часто не обеспечивает необходимой чувствительности, вследствие чего приходится ставить специальную защиту от однофазных КЗ. Для выяснения возможного наименьшего тока при этом виде замыкания и рассчитывается ток однофазного КЗ по выражению

$$I_K^{(1)} = \frac{\sqrt{3}U_{cp.n.}}{\sqrt{(2r_{\Sigma 1} + r_{\Sigma 0})^2 + (2x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 0})^2}}, \quad (3.12)$$

где $r_{\Sigma 1}$ и $x_{\Sigma 1}$ - суммарные активные и индуктивные сопротивления прямой последовательности цепи до точки КЗ, мОм;

$r_{\Sigma 0}$ и $x_{\Sigma 0}$ - то же нулевой последовательности, мОм.

Сопротивления нулевой последовательности всех элементов входящих в схему нулевой последовательности определяют по данным справочной литературы.

Программа дисциплины
«Электромагнитные переходные процессы
в электроэнергетических системах»

РАЗДЕЛ 1 Введение. Понятие о переходных процессах.

Введение. Основные понятия и определения. Классификация электромагнитных переходных процессов. Причины возникновения и следствия. Назначение расчетов и требования, предъявляемые к ним. Допущения, принимаемые при исследовании и практических расчетах переходных процессов.

Система относительных единиц и ее применение при расчетах. Составление схемы замещения и выражение ее элементов в относительных и именованных единицах. Точный и приближенный учет коэффициентов трансформации. Методы преобразования схем замещения.

Литература [1], гл.1,2 с.12-57;
[3], гл.1,2 с.5-31.

Вопросы для самопроверки

1. Каковы причины возникновения и следствия переходных процессов?
2. От чего зависит точность результатов расчета режима КЗ?
3. Почему в случае применения системы относительных единиц конечный результат расчета режима КЗ не зависит от выбора базисных условий?
4. Что понимают под металлическим замыканием?
5. Перечислите основные виды коротких замыканий в электрических системах. Какова вероятность каждого из видов КЗ?
6. Какие основные допущения, принимаемые при расчетах токов КЗ?
7. На чем основано составление приближенной схемы замещения?
8. Какие методы преобразования схем замещения используются при расчетах КЗ?

РАЗДЕЛ 2 Электромагнитные переходные процессы
при сохранении симметрии трехфазной цепи

Переходный процесс в простейших трехфазных цепях

Переходный процесс при трехфазном коротком замыкании в неразветвленной цепи, питаемой источником синусоидального напряжения постоянной частоты и амплитуды. Изменение свободных составляющих токов и напряжений. Характер изменения тока и напряжения во времени. Ударный ток и ударный коэффициент. Действующие значения полных величин и их отдельных составляющих.

Переходный процесс в неподвижных магнитосвязанных цепях

Переходный процесс при включении воздушного трансформатора с замкнутым вторичным обмоткой. Влияние рассеяния и его учет. Внезапное короткое замыкание трансформатора. Переходный процесс при включении трансформатора на холостой ход.

Установившийся режим короткого замыкания

Основные характеристики и параметры синхронной машины при симметричном установившемся режиме. Влияние и учет нагрузки в установившемся режиме. Расчет установившегося тока при отсутствии автоматического регулирования возбуждения (АРВ). Влияние и учет АРВ. Критическая реактивность и критический ток. Практический расчет установившегося режима короткого замыкания.

Начальный момент внезапного нарушения режима

Переходные ЭДС и реактивности синхронной машины. Баланс магнитных потоков в синхронной машине без демпферных контуров при нормальном режиме и в момент внезапного изменения его. Сверхпереходные ЭДС и реактивности синхронной машины. Баланс магнитных потоков в синхронной машине с демпферными контурами при нормальном режиме и в момент внезапного нарушения его. Векторные диаграммы и схемы замещения синхронной машины для начального момента переходного процесса. Характеристики двигателей и обобщенной нагрузки в начальный момент переходного процесса. Практический расчет начальных значений переходного, сверхпереходного и ударного токов при трехфазных коротких замыканиях.

Внезапное короткое замыкание синхронной машины

Внезапное короткое замыкание синхронной машины без демпферных контуров. Составляющие токов статора и ротора. Свободные составляющие токов и постоянные времени их затухания. Влияние и приближенный учет демпферных обмоток. Переходный процесс в генераторе с демпферными обмотками при внезапном коротком замыкании. Постоянные времени затухания переходной и сверхпереходной составляющих токов. Влияние АРВ и его практический учет при внезапном коротком замыкании. Понятие о взаимном влиянии машин на характер изменения токов в них при переходном режиме.

Практические методы расчета переходного процесса трехфазного короткого замыкания в электрической системе

Расчет режима КЗ в цепи при достаточно большой мощности источника питания («системы»). Расчет начального и ударного токов. Практические приемы учета апериодической слагающей при определении ударного тока и наибольшего действующего значения тока КЗ.

Метод расчетных кривых и его применение для расчета режимов КЗ в сложных электрических системах. Расчет по общему и индивидуальному изменению. Приближенный учет «системы». Приближенный учет качаний генераторов в электрической системе при исследовании режимов КЗ. Метод спрямленных характеристик.

Литература [1], гл.3, 3-1, 3-2, 3-3; гл. 4, 5, 6, 7, 9, 10;
[3], гл.3, 4, 5. 6 с.42-112.

Вопросы для самопроверки

1. Почему в момент возникновения КЗ в электрической системе мгновенное значение тока в каждой фазе любой ветви, обладающей индуктивностью, остается неизменным, т.е. равным мгновенному значению тока предшествующего режима?
2. В какой момент времени после возникновения КЗ, в какой фазе и при каких условиях мгновенное значение тока оказывается наибольшим?
3. Что такое ударный ток КЗ?
4. В каких пределах лежит значение ударного коэффициента, и какими параметрами оно определяется?
5. Что называется критическим сопротивлением и критическим током?
6. Как определить величину внешнего сопротивления для генератора, работающего в сложной электрической системе?
7. Как проявляется действие АРВ в установившемся режиме КЗ, и какие режимы возможны у генератора с АРВ?
8. Какое влияние на режим КЗ оказывает нагрузка, питающаяся с генераторных шин, в случае номинального напряжения на этих шинах?
9. Как наиболее просто определить величину установившегося тока в генераторе при КЗ на его выводах?
10. Как зависит постоянная времени затухания свободного переходного процесса в цепи одиночного генератора от величины внешнего реактивного сопротивления и почему?
11. Какое практическое значение имеет скорость затухания апериодической слагающей тока КЗ?
12. Чему равно в любой момент времени суммарное значение апериодических слагающих тока для всех трех фаз при трехфазном КЗ?

13. Как произвести графически разложение на слагающие кривой тока КЗ, полученной в виде осциллограммы для цепи одиночного генератора без АРВ?

14. Почему свободный сверхпереходной процесс обнаруживается даже при отсутствии в машине специальных успокоительных обмоток?

15. Как должны быть введены в схему замещения генераторы и нагрузки для расчета начального сверхпереходного тока?

16. Напишите уравнение для полного тока при внезапном КЗ синхронной машины без демпферных обмоток.

17. Каково влияние оказывают демпферные обмотки?

18. Как рассчитывается ток КЗ от «системы»?

19. В чем сущность метода расчетных кривых?

20. Как по расчетным кривым для генераторов с АРВ определить время, по истечении которого при данной удаленности КЗ напряжение на выводах одиночного генератора достигнет номинального значения?

21. Почему при пользовании расчетными кривыми ветвь «системы» нельзя объединить с ветвями генераторов заданной суммарной мощности в один эквивалентный источник питания?

22. Почему коэффициенты распределения определяются по схеме, в которой ЭДС всех источников питания принимаются одинаковыми независимо, например, от момента времени, для которого определяется ток КЗ?

РАЗДЕЛ 3 Электромагнитные переходные процессы при нарушении симметрии трехфазной цепи

Особенности исследования несимметричных переходных процессов. Образование высших гармоник при нарушении симметрии трехфазной системы. Системы уравнений Кирхгофа при несимметрии. Метод симметричных составляющих как средство, облегчающее анализ несимметричных переходных процессов.

Расчет переходного процесса при однократной поперечной несимметрии. Граничные условия и соотношения между симметричными составляющими токов и напряжений для основных видов несимметричных коротких замыканий. Выражения для составляющих токов и напряжений в месте короткого замыкания. Векторные диаграммы токов и напряжений. Правило эквивалентности прямой последовательности. Комплексные схемы замещения.

Применение практических методов для расчета несимметричных коротких замыканий. Применение расчетных установок и моделей. Распределение и трансформация токов и напряжений отдельных последовательностей.

Схема замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей. Сопrotивление электрических машин, нагрузки, трансформаторов, автотрансформаторов, воздушных и кабельных линий для токов обратной и

нулевой последовательностей. Составление схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Сравнение различных видов коротких замыканий. Характер изменения тока и напряжения прямой последовательности генератора при различных коротких замыканиях в одной и той же точке. Сравнение токов различных видов коротких замыканий. Токи в земле при замыканиях одной и двух фаз на землю.

Расчет переходного процесса при однократной продольной несимметрии. Граничные условия и соотношения между симметричными составляющими для случаев обрыва одной и двух фаз. Выражения для составляющих токов и напряжений в месте продольной несимметрии. Определение напряжений. Построение векторных диаграмм токов и напряжений. Комплексные схемы замещения при обрыве одной и двух фаз. Правило эквивалентности прямой последовательности. Применение принципа наложения.

Литература [1], гл. 11, 12, 13, 14, 15;
[3], гл. 7, 8, 9 с.117-194.

Вопросы для самопроверки

1. Почему реактивное сопротивление воздушной линии для токов нулевой последовательности значительно больше, чем для токов прямой и обратной последовательностей?
2. Как влияет наличие заземленных тросов на сопротивление нулевой последовательности линии электропередачи?
3. В каком случае больше влияние взаимной индуктивности между параллельными цепями линии: при протекании токов нулевой последовательности или при протекании токов прямой и обратной последовательностей?
4. С помощью каких мероприятий можно снизить уровни тока однофазного КЗ?
5. В каком месте при несимметричном КЗ напряжения обратной и нулевой последовательностей обычно получаются наибольшими?
6. Почему сопротивление обратной последовательности синхронного генератора не зависит от времени?
7. Как изменится индуктивность линии провод-земля при изменении частоты тока?
9. Чему равно отношение между начальными сверхпереходными токами двухфазного и трехфазного замыканий?
10. Чем вызвано образование высших гармоник при несимметричных режимах синхронной машины?
11. Какое влияние оказывает заземление нейтралей трансформаторов на схему нулевой последовательности?

12. Как влияет конструктивное выполнение трансформатора на его величину сопротивления нулевой последовательности?

13. Как повернуться составляющие тока и напряжения при переходе через трансформатор Y/Δ - 9?

14. Чем отличаются схемы различных последовательностей при обрывах от схем при коротких замыканиях?

15. Сформулируйте правило эквивалентности прямой последовательности.

16. Почему нагрузка не учитывается в схеме замещения нулевой последовательности?

17. Как учитываются переходные сопротивления в месте КЗ при расчете несимметричных режимов?

РАЗДЕЛ 4 Электромагнитные переходные процессы при особых условиях

Сложные виды повреждений в системе. Характеристика сложных видов повреждений. Общий путь определения токов и напряжения с использованием граничных условий в точках несимметрии. Использование комплексных схем. Двойное замыкание на землю в сети с изолированной нейтралью. Однофазное короткое замыкание с одновременным обрывом той же фазы.

Замыкания в распределительных сетях и системах электроснабжения. Замыкание на землю в сети с незаземленной нейтралью. Векторные диаграммы напряжений и токов. Комплексная схема замещения. Учет изменения параметров проводников сети.

Расчет токов короткого замыкания в установках напряжением до 1000 В. Учет активных и индуктивных сопротивлений отдельных элементов таких установок. Учет сопротивлений контактных соединений.

Короткие замыкания в длинных линиях передачи переменного тока. Понятие о методах расчета короткого замыкания в длинных линиях.

Влияние качаний синхронных машин на протекание электромагнитного переходного процесса. Токи и напряжения при сдвиге векторов ЭДС по фазе.

Литература [1], гл.16, 17, 18, 19;
[3], гл.10 с.195-225.

Вопросы для самопроверки

1. К каким последствиям приводят однофазные замыкания на землю в сетях с незаземленной нейтралью?

2. Каково назначение дугогасящих катушек и когда они устанавливаются?

3. Что такое тепловой спад тока КЗ и в каких случаях его следует учитывать?

4. Каковы особенности расчета токов КЗ в установках напряжением до 1000 В?
5. Чему равен ударный коэффициент при коротком замыкании за трансформатор мощностью 250 кВА?
6. Какое влияние оказывает на переходные процессы в длинных линиях продольная компенсация?
7. Чем отличаются схемы различных последовательностей для сложных случаев несимметричного КЗ от тех же случаев несимметричного короткого замыкания в одном месте цепи?
8. Какими уравнениями записываются граничные условия для случая двухфазного КЗ на землю в одном месте цепи при одновременном отключении одной из поврежденных фаз в другом месте цепи?
9. Как и когда можно применять принцип наложения в случаях исследования режима сложного несимметричного КЗ?
10. Как приближенно учитываются качания генераторов в расчетах КЗ?

Перечень лабораторных работ

1. Распределение токов короткого замыкания и остаточных напряжений на расчетной модели при коротких замыканиях.
2. Переходный процесс в простейшей трехфазной цепи при внезапном коротком замыкании.
3. Определение сопротивления трансформаторов токам нулевой последовательности.
4. Составление схем замещения нулевой последовательности.
5. Исследование токов и напряжений в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью при замыканиях на землю.
6. Исследование несимметричных повреждений методом симметричных составляющих.

Перечень тем практических занятий

1. Составление схем замещения и приведение параметров схем к базисным условиям.
2. Аналитический расчет установившегося тока КЗ при симметричном КЗ.
3. Аналитический расчет начального тока КЗ при симметричном КЗ.
4. Расчет установившегося и начального тока КЗ при симметричном КЗ по расчетным кривым.
5. Составление схем замещения для токов обратной и нулевой последовательностей.
6. Аналитический расчет установившегося и начального токов КЗ при несимметричных КЗ.

7. Расчет установившегося и начального тока КЗ при несимметричных КЗ по расчетным кривым.
8. Расчет токов КЗ в электроустановках до 1000 В.
9. Построение векторных диаграмм токов и напряжений в месте несимметричных КЗ.

Литература

1. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. – М.: Энергия, 1970. – 520с.
2. Справочник по проектированию электроснабжения / Под ред. Ю.Г. Барыбина и др. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 576с.
3. Силюк С.М., Свита Л.Н. Электромагнитные переходные процессы. Учебное пособие для вузов. – Мн.: «Технопринт», 2000. –262с.

III. Контроль знаний

3.1. Экзаменационные вопросы к дисциплине

Экзаменационные вопросы
по дисциплине «Электромагнитные переходные процессы»
для специальности 1-43 01 01 «Электрические станции»
1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети»
1-43 01 03 «Электроснабжение»
1-43 01 09 «Релейная защита и автоматика»

1. Режимы работы энергосистемы. Виды коротких замыканий (КЗ). Причины возникновения и последствия КЗ.
2. Назначение расчетов токов КЗ. Основные допущения при расчете токов КЗ.
3. Система именованных единиц. Приведение электрической схемы замещения к одной ступени напряжения.
4. Система относительных единиц.
5. Составление и преобразование схем замещения.
6. Схема замещения 2-х обмоточного и 3-х обмоточных трансформаторов и автотрансформаторов.
7. Раскрытие замкнутых контуров. Трансфигурация трехлучевой звезды в треугольник и наоборот.
8. Трансфигурация многолучевой звезды в многоугольник.
9. Методы эквивалентных ЭДС.
10. Метод коэффициентов токораспределения.
11. Метод наложения (суперпозиции).
12. Метод рассеяния узла точки приложения ЭДС или точки КЗ.
13. Установившийся режим трехфазного КЗ. Основные характеристики синхронного генератора в установившемся режиме КЗ.
14. Аналитический расчет установившегося режима трехфазного КЗ. Генераторы без автоматического регулятора возбуждения (АРВ).
15. Аналитический расчет установившегося режима трехфазного КЗ. Генераторы с АРВ.
16. Порядок расчета установившегося режима КЗ в сложных схемах с несколькими генераторами с АРВ.
17. Влияние и учет нагрузки в установившемся режиме трехфазного КЗ.
18. Остаточное напряжение в узлах схемы при трехфазном КЗ в установившемся режиме.
19. Переходный процесс в простейшей трехфазной цепи при внезапном трехфазном КЗ.
20. Максимальное действующее значение тока трехфазного КЗ.
21. Внезапное трехфазное КЗ в цепи с трансформатором.

22. Переходный процесс при включении силового трансформатора на холостой ход.
23. Начальный момент внезапного нарушения режима синхронной машины без демпферных контуров. Теорема о постоянстве потокосцепления.
24. Начальный момент внезапного нарушения режима синхронной машины с демпферными контурами на роторе.
25. Переходный процесс в синхронной машине без успокоительных контуров на роторе.
26. Переходный процесс в синхронной машине с демпферными контурами на роторе.
27. Параметры синхронной машины при внезапном трехфазном КЗ на выводах.
28. Упрощенная векторная диаграмма синхронной машины в сверхпереходном, переходном и установившемся режиме трехфазного КЗ.
29. Влияние и учет нагрузки в начальный момент трехфазного КЗ.
30. Управление синхронной явнополюсной машины в осях d и q , жестко связанных с ротором (уравнения Парка-Горева).
31. Учет системы конечной и бесконечной мощности при расчете токов КЗ.
32. Порядок расчета токов КЗ по расчетным кривым. Расчет по общему затуханию.
33. Порядок расчета переходного процесса по расчетным кривым. Расчет по индивидуальному изменению.
34. Расчет токов КЗ по типовым кривым.
35. Расчет токов КЗ по типовым кривым и наличии системы большой мощности.
36. Расчеты переходных процессов при несимметричных КЗ. Метод симметричных составляющих.
37. Особенности переходного процесса при несимметричных КЗ.
38. Образование высших гармоник при несимметричных КЗ.
39. Сопротивления отдельных элементов системы для токов обратной последовательности.
40. Сопротивления отдельных элементов системы для токов нулевой последовательности.
41. Сопротивления токам нулевой последовательности 2-ух обмоточных трансформаторов.
42. Сопротивления токам нулевой последовательности 3-ех обмоточных трансформаторов и автотрансформаторов.
43. Влияние конструкции трансформаторов на величину сопротивления токам нулевой последовательности.
44. Двухфазное короткое замыкание.
45. Однофазное короткое замыкание.
46. Двухфазное короткое замыкание на землю.
47. Соотношение между токами трехфазного КЗ и токами несимметричных КЗ.

48. Учет влияния переходных сопротивлений в месте повреждения при несимметричных КЗ.
49. Право эквивалентности прямой последовательности и его применение в расчетах.
50. Аналитический расчет токов и напряжений при несимметричных КЗ.
51. Расчет несимметричных КЗ по расчетным кривым.
52. Распределение и трансформация токов и напряжений при несимметричных КЗ.
53. Комплексная схема замещения при расчете несимметричных КЗ.
54. Расчет переходных процессов при продольной несимметрии в 3-х фазной системе.
55. Разрыв в одной фазе 3-х фазной системы.
56. Разрыв в двух фазах 3-х фазной системы.
57. Общий порядок расчета сложных видов повреждений.
58. Простое замыкание на землю в сети с изолированной нейтралью.
59. Расчет токов КЗ в электроустановках напряжением до 1000 В.
60. Расчет переходного процесса с учетом качаний синхронной машины.
61. Способы ограничения мощностей и токов КЗ в электроэнергетической системе.

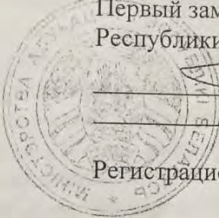
IV. Вспомогательный раздел

4.1. Типовая учебная программа дисциплины

3660

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Учебно-методическое объединение по образованию в области
энергетики и энергетического оборудования

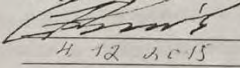
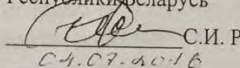

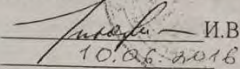
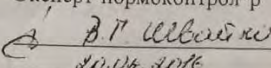
УТВЕРЖДАЮ
Первый заместитель Министра образования
Республики Беларусь


В.А. Богуш
04.07.2016
Регистрационный № ТД- I.1368/min

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Типовая учебная программа
по учебной дисциплине для специальностей:

1-43 01 01 «Электрические станции»;
1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети»;
1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)»;
1-43 01 09 «Релейная защита и автоматика»

<p>СОГЛАСОВАНО Председатель Учебно-методического объединения по образованию в области энергетики и энергетического оборудования</p> <p> Ф.А. Романюк 04.12.2015</p>	<p>СОГЛАСОВАНО Начальник Управления высшего образования Министерства образования Республики Беларусь</p> <p> С.И. Романюк 04.07.2016</p>
<p> Подписано: <u>Романюк Ф.А.</u> Завярко, Заг.аддзела кадраў</p>	<p>СОГЛАСОВАНО Проректор по научно-методической работе Государственного учреждения образования «Республиканский институт высшей школы»</p> <p> И.В. Титович 10.06.2016</p> <p>Эксперт-нормоконтролер  В.П. Ульвайко 20.04.2016</p>

Минск 2016

Информация об изменениях размещается на сайтах:
<http://www.nihe.bsu.by>
<http://www.edubelarus.info>

СОСТАВИТЕЛЬ:

С.М. Силюк, профессор кафедры «Электрические станции» Белорусского национального технического университета, кандидат технических наук, доцент.

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

Кафедра «Электроснабжение» учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет»
(протокол № 3 от 20.10.2015 г.);

Д.А.Герасимович, главный инженер проекта частного производственного строительства унитарного предприятия «Электроситстрой», кандидат технических наук.

РЕКОМЕНДОВАНА В КАЧЕСТВЕ ТИПОВОЙ:

Кафедрой «Электрические станции» Белорусского национального технического университета
(протокол № 3 от 20.10. 2016 г.);

Научно-методическим советом Белорусского национального технического университета
(протокол № 8 от 11.11. 2015 г.);

Научно-методическим советом в области энергетики и энергетического оборудования Учебно-методического объединения по образованию в области энергетики и энергетического образования
(протокол № 22 от 4.12 2015 г.).

Ответственный за редакцию:
Ответственный за выпуск:

С.М. Силюк

Пояснительная записка

Типовая учебная программа по учебной дисциплине «Электромагнитные переходные процессы» разработана для учреждений высшего образования Республики Беларусь в соответствии с требованиями образовательных стандартов высшего образования по специальностям:

- 1-43 01 01 «Электрические станции»;
- 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети»;
- 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)»;
- 1-43 01 09 «Релейная защита и автоматика».

Целью преподавания учебной дисциплины является формирование у студентов систематических знаний в области электромагнитных переходных процессов в электроэнергетических системах.

Задачами изучения учебной дисциплины являются:

- ознакомить студентов с основами электромагнитных переходных процессов в синхронных и асинхронных электрических машинах, трансформаторах, линиях электропередачи и электроэнергетической системе в целом;

- дать студентам знания по методам расчета токов и напряжений при простых и сложных видах повреждений в электроэнергетических системах.

Учебная дисциплина базируется на знаниях, полученных при изучении учебных дисциплин «Математика», «Физика», «Теоретические основы электротехники», «Информатика», «Электрические машины». Знания и умения, полученные студентами при изучении данной учебной дисциплины необходимы для освоения последующих специальных дисциплин, связанных с проектированием и расчетом режимов работы электроэнергетических систем, систем электроснабжения, выбором электрического оборудования и электрических аппаратов, схем электрических соединений, устройств релейной защиты и автоматики.

В результате освоения учебной дисциплины «Электромагнитные переходные процессы» студент должен:

знать:

- теорию электромагнитных переходных процессов в электроэнергетических системах;
- методы расчета токов коротких замыканий в электроэнергетических системах;
- методы управления уровнем токов короткого замыкания;
- терминологию по электромагнитным переходным процессам в электроэнергетических системах;
- методику оценки токов короткого замыкания;
- влияние токов короткого замыкания на электрооборудование;
- переходный и установившийся режимы работы синхронной машины, ее схемы замещения и векторные диаграммы для этих режимов;
- теорию метода симметричных составляющих функции;

- математическую модель для несимметричного режима работы при различных видах короткого замыкания;
- особенности построения схемы замещения энергосистемы для различных номинальных напряжений;
- алгоритмы расчета режима короткого замыкания, которое используется в компьютерных программах;

уметь:

- составлять схемы замещения электрической сети для расчета переходных процессов;
- рассчитывать параметры электромагнитных переходных процессов при различных видах коротких замыканий;
- выбирать решения по ограничению токов короткого замыкания;
- рассчитывать токи короткого замыкания в относительных единицах;
- рассчитывать токи короткого замыкания в именованных единицах;
- рассчитывать токи короткого замыкания от источника неограниченной мощности;
- рассчитывать токи короткого замыкания по расчетным кривым;
- рассчитывать токи короткого замыкания в низковольтных установках;
- выполнять расчет токов короткого замыкания для сверхпереходного и установившегося режима работы синхронной машины;
- рассчитывать токи несимметричных коротких замыканий;

владеть:

- методикой выбора шин распределительных устройств и изоляторов;
- методикой выбора кабелей, методикой выбора высоковольтных аппаратов;
- принципами конструирования токоограничивающих устройств;
- методами анализа эффективности использования токоограничивающих устройств;
- практическими методами расчета переходных режимов при симметричных и несимметричных коротких замыканиях;
- навыками использования прикладных компьютерных программ для расчета короткого замыкания.

Учебная дисциплина является одной из основных, в которых закладывается и формируется фундамент профессиональной подготовки инженеров-энергетиков.

Типовая учебная программа разработана на основе компетентного подхода, требований к формированию компетенций, сформированных в образовательных стандартах по специальностям:

- 1-43 01 01 «Электрические станции»;
- 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети»;
- 1-43 01 03 «Электроснабжение» (по отраслям);
- 1-43 01 09 «Релейная защита и автоматика».

Освоение данной дисциплины должно обеспечить формирование следующих компетенций;

АК-1 Уметь применять базовые научно-теоретические знания для решения теоретических и практических задач;

АК-2 Владеть системным и сравнительным анализом;

АК-3 Владеть исследовательскими навыками;

АК-4 Уметь работать самостоятельно;

АК-5 Быть способным порождать новые идеи (обладать креативностью);

АК-6 Владеть междисциплинарным подходом при решении проблем;

АК-7 Иметь навыки, связанные с использованием технических устройств, управлением информацией и работой с компьютером;

АК-8 Обладать навыками устной и письменной коммуникации;

АК-9 Уметь учиться, повышать свою квалификацию в течение всей жизни;

СЛК-1 Владеть качествами гражданственности;

СЛК-2 Быть способным к социальному взаимодействию;

СЛК-3 Обладать способностью к межличностным коммуникациям;

СЛК-4 Владеть навыками здоровьесбережения;

СЛК-5 Быть способным к критике и самокритике;

СЛК-6 Уметь работать в коллективе;

СЛК-7 Самостоятельно приобретать и использовать новые знания и умения, в том числе в области знаний, не связанных со сферой деятельности.

Профессиональные компетенции у студентов формируются в зависимости от специальности, на которой они обучаются:

Специальность 1-43 01 01 «Электрические станции»

ПК-1 Осуществлять оперативный контроль технологического режима и состояния электрооборудования электрической станции и подстанции и электроэнергетической системы;

ПК-3 Оптимизировать режимы работы электростанции и подстанции;

ПК-5 Разрабатывать техническую документацию и технологию проведения ремонта электрооборудования, осуществлять руководство ремонтом и приемку оборудования после ремонта в эксплуатацию;

ПК-7 Применять современные устройства диагностики и испытания оборудования для определения его состояния;

ПК-14 Выполнять расчет и анализ режимов работы электростанций, подстанций и электрических систем;

ПК-22 Осуществлять патентно-информационный поиск, систематизацию и анализ информации по перспективам развития отрасли, предприятия, инновационным технологиям, проектам и решениям;

ПК-23 Оценивать патентоспособность и патентную чистоту технических решений;

ПК-24 Выполнять оценку инновационного потенциала нового электрооборудования;

Специальность 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети»

ПК-22 Содействовать на практике применению микропроцессорных систем защиты и автоматики элементов электроэнергетических систем и сетей;

ПК-27 Обоснованно организовывать функционирование и наладку релейной защиты и автоматики электрических сетей, синхронных генераторов, силовых трансформаторов, шин электростанций и подстанций и другого силового электрооборудования;

ПК-30 Выявлять причины повреждений элементов электрических сетей, вести их учет, разрабатывать предложения по их предупреждению;

ПК-34 Подбирать соответствующее оборудование, аппаратуру, приборы и инструменты и использовать их при проведении наладочных работ электротехнических устройств, аппаратов и аппаратуры объекта электрической сети;

Специальность 1-43 01 03 «Электроснабжение» (по отраслям)

ПК-1 Используя показатели технологического процесса производства, передачи, распределения потребления электроэнергии, создавать условия для соответствия режимов действующим стандартам, правилам и нормам;

ПК-10 Выявлять причины повреждений электрооборудования и элементов электрических сетей, вести их учет, разрабатывать предложения по их предупреждению;

ПК-15 Разрабатывать перспективный план развития системы электроснабжения, выполнять технико-экономическое обоснование вариантов сооружения или реконструкции электрооборудования и системы электроснабжения, в составе группы специалистов по проектированию электрооборудования и систем электроснабжения или самостоятельно;

ПК-19 Осуществлять светотехнические и электрические расчеты систем искусственного освещения;

Специальность 1-43 01 09 «Релейная защита и автоматика»

ПК-1 Проектировать устройства релейной защиты для элементов электроэнергетической системы и увязывать работу релейной защиты с работой противоаварийной и режимной автоматики энергосистемы;

ПК-2 Согласовывать проектные показатели релейной защиты и автоматики с оптимальным режимом работы силовых элементов энергосистемы;

ПК-3 С помощью прикладных компьютерных программ проводить вычислительный эксперимент для математического моделирования переходных процессов в силовых и вторичных цепях;

ПК-5 Самостоятельно или в составе группы специалистов разрабатывать проектно-конструкторские варианты новых устройств релейной защиты;

ПК-14 Обеспечивать помехоустойчивость релейной защиты и автоматики;

ПК-15 Выполнять расчет нормальных и аварийных режимов электроэнергетической системы;

ПК-16 По результатам срабатывания релейной защиты, показаниях контрольно-измерительной аппаратуры и аварийных осциллографов выявлять причины неправильной работы устройств релейной защиты и автоматики.

В соответствии с образовательными стандартами учебная программа рассчитана максимально на 144 часа, соответственно:

для специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение» (по отраслям) 96 аудиторных часов, из них лекций – 48 ч., практические занятия – 32 ч., лабораторные занятия – 16 ч.;

для специальностей 1-43 01 01 «Электрические станции», 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети» и 1-43 01 09 «Релейная защита и автоматика» 84 аудиторных часа, из них лекций – 42 ч., практические занятия – 28 ч., лабораторные занятия – 14 ч.

Рекомендуемая форма итогового контроля – экзамен.

ПРИМЕРНЫЙ ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН

Наименование темы	Количество аудиторных часов			
	Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия	Всего
Тема 1. Введение	2	-	-	2
Тема 2. Общие положения к расчету электромагнитных переходных процессов	3-4	2	-	5-6
Тема 3. Переходный процесс в простейшей цепи и неподвижных магнитосвязанных цепях	4	2	2	8
Тема 4. Электромагнитный переходный процесс в подвижных магнитосвязанных цепях	8-10	8	2-4	18-22
Тема 5. Практические методы расчета короткого замыкания. Применения ЭВМ для расчета токов короткого замыкания	4	4	2	10
Тема 6. Особенности расчета переходных процессов при нарушении симметрии трехфазной цепи. Параметры элементов системы для токов различных последовательностей	5-6	4	4	13-14
Тема 7. Однократная поперечная несимметрия	6-8	4-6	2	12-16
Тема 8. Однократная продольная несимметрия	2	2	-	4
Тема 9. Сложные виды повреждений	2	-	-	2
Тема 10. Переходные процессы в сетях с изолированной нейтралью	2	-	2	4

Тема 11. Электромагнитные переходные процессы в распределительных сетях и в особых условиях	2	2-4	-	4-6
Тема 12. Уровни мощностей и токов короткого замыкания. Методы и средства ограничения токов короткого замыкания	2	-	-	2
ВСЕГО	42-48	28-32	14-16	84-96

СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

Тема 1. Введение

Цели и задачи дисциплины. Причины возникновения данной дисциплины и краткие исторические сведения о ее развитии. Роль дисциплины в формировании научного мировоззрения инженера-энергетика. Ведущие ученые и их вклад в создание современных методов исследований и расчетов переходных процессов.

Тема 2. Общие положения к расчету электромагнитных переходных процессов

Основные понятия и определения. Виды повреждений в трехфазных системах. Причины возникновения и последствия переходных процессов. Назначение расчетов и требования к ним. Основные допущения, принимаемые при расчетах. Система относительных единиц. Составление схем замещения. Приведение параметров элементов схем к одной ступени напряжения. Методы преобразования схем замещения.

Тема 3. Переходный процесс в простейшей цепи и неподвижных магнитосвязанных цепях

Трехфазное короткое замыкание в цепи с сосредоточенными параметрами, питающиеся от источника синусоидального напряжения. Изменение времени тока и его составляющих. Ударный ток короткого замыкания и условия его возникновения. Действующие значения тока короткого замыкания и его отдельных составляющих.

Внезапное короткое замыкание в трехфазной цепи за силовым трансформатором. Переходный процесс при включении силового трансформатора на холостой ход.

Тема 4. Электромагнитный переходный процесс в подвижных магнитосвязанных цепях

Дифференциальные уравнения переходного процесса синхронной машины в фазных координатах. Индуктивности обмоток синхронной машины. Обобщенный вектор трехфазной системы, уравнения Парка-Горева.

Сверхпереходная ЭДС и сверхпереходное сопротивление. Переходная ЭДС и переходное сопротивление. Схемы замещения синхронной машины в продольной и поперечной осях.

Расчет установившегося тока трехфазного короткого замыкания. Влияние и учет действия автоматического регулятора возбуждения. Понятие о критическом режиме. Расчет установившегося тока короткого замыкания в схеме с несколькими генераторами. Влияние нагрузки и ее приближенный учет.

Начальный момент переходного процесса в синхронной машине без демпферных обмоток. Переходный процесс в синхронной машине с демпферными обмотками. Постоянные времени затухания свободных составляющих токов. Влияние и учет нагрузки в начальный момент переходного процесса.

Тема 5. Практические методы расчета короткого замыкания.

Применение ЭВМ для расчета токов короткого замыкания

Учет системы бесконечной мощности при расчете переходных процессов. Сущность метода расчетных кривых. Порядок расчета переходных процессов по расчетным кривым. Определение тока короткого замыкания в произвольный момент по типовым кривым.

Алгоритм решения на ЭВМ дифференциальных уравнений переходного процесса в синхронной и асинхронной машинах. Порядок составления программы расчета переходного процесса на ЭВМ.

Тема 6. Особенности расчета переходных процессов при нарушении симметрии трехфазной цепи. Параметры элементов системы для токов различных последовательностей

Расчетные условия и допущения. Образование высших гармоник при нарушении симметрии трехфазной системы. Метод симметричных составляющих. Основные соотношения между симметричными составляющими токов и напряжений. Составление схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей. Параметры электрических машин, обобщенной нагрузки, трансформаторов и автотрансформаторов, воздушных и кабельных линий, реакторов для токов различных последовательностей. Распределение и трансформация токов и напряжения отдельных последовательностей.

Тема 7. Однократная поперечная несимметрия

Граничные условия и основные соотношения между симметричными составляющими токов и напряжений для симметричных коротких замыканий различных видов. Расчетные выражения для составляющих отдельных последовательностей токов и напряжений в местах несимметричных коротких замыканий. Векторные диаграммы токов и напряжений. Правило эквивалентности прямой последовательности. Комплексные схемы замещения при различных видах несимметричных коротких замыканий. Учет переходного сопротивления в месте короткого замыкания. Сравнение токов при различных видах несимметричного короткого замыкания. Порядок расчета несимметричных коротких замыканий. Применение практических

методов для расчета несимметричных коротких замыканий. Способы ограничения токов короткого замыкания на землю.

Тема 8. Однократная продольная несимметрия

Граничные условия и соотношения между симметричными составляющими для случаев обрыва одной или двух фаз. Определение составляющих и полных значений токов падений напряжений в месте продольной несимметрии. Векторные диаграммы токов и падений напряжений. Комплексные схемы замещения для анализа переходного процесса при обрыве одной и двух фаз. Включение в фазы не одинаковых сопротивлений.

Тема 9. Сложные виды повреждений

Общие сведения о сложных видах повреждений. Характеристика сложных видов повреждений. Общий путь определения токов и напряжений с использованием граничных условий в токах несимметрии. Использование комплексных схем замещения. Двойное замыкание на землю. Однофазное короткое замыкание с одновременным обрывом фазы.

Тема 10. Переходные процессы в сетях с изолированной нейтралью

Основные понятия и определения. Сети с незаземленной нейтралью. Установившийся режим однофазного замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью. Способы ограничения токов замыкания на землю.

Тема 11. Электромагнитные переходные процессы в распределительных сетях и в особых условиях

Расчет токов короткого замыкания в распределительных сетях. Расчет токов короткого замыкания в электроустановках напряжением до 1000 В. Учет изменения активного сопротивления проводников при коротком замыкании. Учет батарей статических конденсаторов. Учет устройств регулирования напряжения трансформаторов и автотрансформаторов. Учет углового сдвига векторов ЭДС генераторов. Учет качаний синхронных машин при коротких замыканиях. Учет местных источников питания и нагрузки. Учет насыщения магнитопроводов синхронных генераторов и силовых трансформаторов. Короткие замыкания в линиях электропередачи переменного тока напряжением 330 кВ и выше.

Тема 12. Уровни мощностей и токов короткого замыкания.

Методы и средства ограничения токов короткого замыкания

Качество электромагнитных переходных процессов. Способы ограничения токов короткого замыкания. Применение технических средств для ограничения токов короткого замыкания. Оптимизация и координация токов короткого замыкания в электроэнергетических системах.

ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Список литературы

Основная литература

1. Переходные процессы в электроэнергетических системах: учебник для вузов / И.П. Крючков [и др.]; под общ.ред. И.П.Крючкова.- М.:Изд. дом МЭИ, 2008. – 416 с.
2. Переходные процессы в системах электроснабжения: учебник для вузов / Г.Г.Пивняк[и др.]; под общ.ред. Г.Г.Пивняка.- 3-е изд.- Днепропетровск: Национальный горный университет, 2003.-548 с.
3. Ульянов, С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах учебник для вузов / С.А.Ульянов.- М.: энергия, 1970.- 519 с.
4. Куликов, Ю.А. Переходные процессы в электроэнергетических системах: учеб.пособие для вузов / Ю.А.Куликов.- М.: ООО «Издательство АСТ», 2003. – 283 с.
5. Щедрин, В.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: учеб.пособие для вузов / В.А. Щедрин. - Чебоксары: изд. Чувашского университета, 2007.- 422с.

Дополнительная литература

1. Силюк, С.М. Электромагнитные переходные процессы: учеб.пособие для вузов/ С.М.Силюк, Л.Н.Свита.- Минск: Технопринт, 2000.- 255 с.
2. Ульянов, С.А. Сборник задач по электромагнитным переходным процессам в электрических системах / С.А.Ульянов.- М.: Энергия,1968.-226с.
3. Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования: учеб. пособие для вузов / И.П. Крючков [и др.]; под общ. ред. И.П. Крючкова и В.А. Старшинова.- М.: Изд. Центр «Академия», 2006.-416с.
4. Евминов, Л.И. Электромагнитные переходные процессы: учеб.пособие для вузов/ Л.И. Евминов, Г.И.Селиверстов. – Гомель: ГГТУ им. П.О.Сухого, 2008. - 350с.

Методические рекомендации по организации и выполнению самостоятельной работы студентов

При изучении учебной дисциплины рекомендуется использовать следующие формы самостоятельной работы:

- контролируемая самостоятельная работа в виде решения индивидуальных задач в аудитории во время проведения практических и лабораторных занятий под контролем преподавателя в соответствии с расписанием;
- управляемая самостоятельная работа, в том числе в виде выполнения индивидуальных расчетных заданий с консультациями преподавателя;
- подготовка курсовых работ по индивидуальным заданиям.

Рекомендуемые средства диагностики

Для оценки учебных достижений студента рекомендуется использовать следующий диагностический инструментарий:

- устный и письменный опрос во время практических занятий;
- проведение текущих контрольных опросов по отдельным темам;
- защита выполненных на практических и лабораторных занятиях индивидуальных заданий;
- выступление студента на конференции по подготовленному реферату;
- защита курсовой работы;
- сдача экзамена по учебной дисциплине.

Примерный перечень тем практических занятий

1. Составление схем замещения. Система относительных единиц.
2. Определение периодической составляющей установившегося тока КЗ. Учет нагрузки. Расчет установившегося режима КЗ при наличии в схеме генераторов с АРВ.
3. Расчет начального и ударного токов КЗ.
4. Расчет тока трехфазного КЗ с использованием методов расчетных и типовых кривых.
5. Составление схем замещения нулевой последовательности.
6. Расчет переходного процесса при несимметричном КЗ (поперечная несимметрия).
7. Расчет переходного процесса при продольной несимметрии.
8. Расчет переходных процессов при КЗ в распределительных сетях и сетях до 1000 В.
9. Короткие замыкания в линиях электропередачи напряжением 330 кВ и выше.

Примерный перечень лабораторных занятий

1. Исследование распределения токов короткого замыкания и остаточных напряжений при КЗ на расчетной модели.
2. Переходный процесс в простейшей цепи при внезапном КЗ.
3. Электромагнитные переходные процессы в силовом трансформаторе при КЗ.
4. Простое замыкание на землю в сети с изолированной нейтралью.
5. Составление схем замещения нулевой последовательности.
6. Исследование несимметричных коротких замыканий.
7. Расчет токов короткого замыкания в электрической сети на ЭВМ.
8. Комплексные схемы замещения для исследования переходных процессов при нарушении симметрии.

Примерное содержание курсовой работы

Тема работы: Расчет токов короткого замыкания в энергосистеме.

Курсовая работа выполняется в соответствии с индивидуальным заданием по расчету токов короткого замыкания в энергосистеме объемом 15-20 страниц.

Примерное содержание работы:

- расчеты токов при трехфазном и двухфазном коротких замыканиях, а также при однофазном и двухфазном замыканиях на землю в сложных электрической системе для различных моментов времени аналитическими и практическими методами расчета;
- расчет токов одного из видов КЗ на ЭВМ;
- аналитический расчет токов КЗ в аварийной цепи 0,4 кВ при различных видах повреждения;
- анализ электромагнитных переходных процессов в электрической системе, оценка полученных результатов расчета токов КЗ, предложения по их снижению;
- векторные диаграммы токов и напряжений в месте повреждения, а также в других точках исследуемой электрической системы.

Методы (технологии) обучения

Основными методами обучения, отвечающими целями изучения учебной дисциплины, являются:

- элементы проблемного обучения (проблемное изложение), реализуемое на лекционных занятиях;
- элементы учебно-исследовательской деятельности, реализуемые на практических и лабораторных занятиях, а также при самостоятельной работе;
- коммуникативные технологии (дискуссии, учебные дебаты), реализуемые на практических занятиях и конференциях;
- проектные технологии, используемые при выполнении курсовой работы и на практических занятиях.

Примерный перечень контрольных вопросов и заданий для самостоятельной работы

1. Влияние уровней токов короткого замыкания в электроэнергетической системе на характеристики электрооборудования.
2. Допущения, принимаемые при расчете токов КЗ и их влияние на точность расчетов.
3. Точный расчет токов КЗ синхронной машины на основе полной системы дифференциальных уравнений.
4. Влияние конструктивных параметров синхронной машины на ее характеристики.
5. Системы возбуждения синхронной машины и их влияние на переходный процесс.
6. Гашение поля синхронного генератора.

7. Переходный процесс в синхронном генераторе при форсировке возбуждения, неуспешном автоматическом повтором включения.

8. Образование высших гармоник при нарушении симметрии трехфазной системы.

9. Влияние конструктивных особенностей трансформаторов на его параметры при несимметричных переходных процессах.

10. Сложные виды повреждений в электроэнергетической системе.

11. Учет особых условий при расчете токов КЗ.

12. Оптимизация и координация уровней токов КЗ в электроэнергетической системе.

Компьютерные программы, электронные учебно-методические пособия

При проведении практических и лабораторных занятий и выполнении курсовой работы используется комплекс учебных и производственных компьютерных программ для расчета токов короткого замыкания: ТКЗ – 3000, ТКЗ.