

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Гомельский государственный технический университет
имени П. О. Сухого»
Кафедра «Электроснабжение»

Л. И. Евминов, Н. В. Токочакова

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ
ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМАХ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
ПРАКТИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

по одноименному курсу
для студентов дневного и заочного отделений
специальности Т.01.01.00 «Электроэнергетика»

Гомель 2002

УДК 621.3.018.782.3: 621.311
Е19

Авторы-составители: **Евминов Л. И.,**
Токочакова Н. В.

Е 19 Электромагнитные переходные процессы в системах электроснабжения: Практическое пособие по одноименному курсу для студентов дневного и заочного отделений специальности Т.01.01.00 «Электроэнергетика». – Гомель: Учреждение образования «ГГТУ им. П.О. Сухого», 2002. – 207 с.

Для студентов специальности Т.01.01.00 «Электроэнергетика» Гомельского государственного технического университета имени П.О. Сухого.

Рецензент: доцент кафедры «Электроснабжение», к.т.н. Селиверстов Г. И.

ISBN 985-420-105-8

© Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», 2002

1. УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТОВ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

1.1. Общие сведения об электромагнитных переходных процессах

Режим работы электроэнергетической системы (ЭЭС) может быть установившимся и переходным (неустановившимся). Переходные режимы работы (переходные процессы) возникают в ЭЭС при изменении условий ее работы, которые происходят как при нормальной эксплуатации (включение и отключение отдельных генераторов, нагрузок, ЛЭП и т. д.), так и в аварийных ситуациях (короткое замыкание, обрывы проводов, замыкание фазных проводов на землю и др.).

Любой переходный процесс сопровождается нарушением первоначального электромагнитного состояния элементов ЭЭС и частоты вращения электрических машин, т. е. процесс характеризуется взаимосвязанными между собой электромагнитными и механическими изменениями. Однако при определенных условиях допустимо рассматривать переходный процесс с учетом только электромагнитных изменений. Так, например, при коротких замыканиях в точках, имеющих значительную электрическую удаленность от генераторов, переходный процесс можно рассматривать только как электромагнитный.

Необходимость количественной оценки электрических величин во время электромагнитного переходного процесса возникает в связи с требованиями обеспечения надежной работы отдельных элементов и ЭЭС в целом. Короткие замыкания в ЭЭС являются наиболее распространенной причиной возникновения переходных процессов и в то же время наиболее опасными видами повреждений, которые могут вызывать:

1. Значительное снижение напряжения на шинах потребителей и нарушение их нормальной работы.
2. Разрушение поврежденного элемента электрической дугой.
3. Разрушение оборудования в результате теплового и электродинамического действия тока короткого замыкания.
4. Нарушение синхронной работы генераторов в системе.

Коротким замыканием (КЗ) называется всякое не предусмотренное нормальными условиями работы замыкание между фазами, а в системах с заземленными нейтралью (или четырехпроводных) – кроме того, замыкание одной или нескольких фаз на землю (или на нулевой провод).

Учитывая опасные последствия коротких замыканий при проектировании и эксплуатации возникает необходимость в выполнении расчетов процесса КЗ. Практически такие расчеты сводятся к определению величин

ны тока в месте КЗ, а также к вычислению токов и напряжений в отдельных ветвях и точках системы.

Результаты расчетов необходимы для решения ряда инженерных задач:

1. Выбор схемы электрических соединений как отдельных установок (станций, подстанций), так и всей ЭЭС в целом;
2. Выявление условий работы потребителей при аварийных режимах.
3. Проверка аппаратов и проводников по условиям работы при КЗ.
4. Проектирование и настройка устройств релейной защиты.
5. Определение числа заземленных нейтралей в ЭЭС.
6. Выбор числа и мощности компенсирующих дугогасящих устройств.
7. Определение влияния ЛЭП на коммуникации.
8. Проектирование и проверка защитных заземлений.
9. Выбор аппаратов для защиты от перенапряжений.

1.2. Основные допущения, принимаемые при расчетах

Расчет электромагнитного переходного процесса в современной ЭЭС с учетом всех имеющихся условий и факторов чрезвычайно сложен. Поэтому чтобы упростить задачу и сделать ее решение практически возможным, вводят ряд допущений. Допущения зависят от характера и постановки самой задачи. Те допущения, которые вполне приемлемы для решения одной задачи, могут быть совершенно неприемлемы при решении другой.

Основные допущения следующие:

1. Сохранение симметрии питающих трехфазных источников.
2. Линейность всех элементов схемы.
3. Пренебрежение токами намагничивания трансформаторов.
4. Пренебрежение распределенной емкостью линии, за исключением линий напряжением выше 220 кВ.
5. Приближенный учет нагрузок.
6. Отсутствие качаний генераторов.

Для расчета переходных процессов КЗ применяются аналитические и графоаналитические методы, методы расчетных и типовых кривых, а также метод спрямленных характеристик, специальные расчетные модели, физическое моделирование с использованием персональных ЭВМ.

1.3. Выбор расчетных условий

В соответствии с целевым назначением расчета электромагнитного переходного процесса устанавливают исходные расчетные условия, которые весьма разнообразны при решении различных задач и могут быть даже противоречивыми. К расчетным относятся выбор режима работы питающей системы, выбор расчетной схемы, вида КЗ и момента времени от начала КЗ, для которых вычисляются токи и напряжения.

В таблице 1.1 приведены рекомендации для некоторых встречающихся случаев.

Таблица 1.1

Назначение расчета	Вид КЗ	Момент времени от начала КЗ
1. Выбор и проверка коммутационных аппаратов (выключателей, разъединителей и др.), реакторов, трансформаторов тока, шин, силовых кабелей: а) на термическую устойчивость б) на динамическую устойчивость в) выключателей на допустимый отключающий ток или мощность	$K^{(3)}$ $K^{(3)}$ $K^{(3)}$	∞ 0 0
2. Выбор и проверка аппаратов для защиты от перенапряжений	$K^{(1)}$	$t = t_{\text{ЗАЩ}} + t_{\text{ВЫКЛ}}$

Выбор места КЗ и режима ЭЭС в зависимости от назначения расчета производится из следующих основных соображений:

1. Ток КЗ должен проходить по ветвям, для которых выбирается или проверяется аппаратура.

2. Для определения наибольшего значения тока КЗ при данном режиме место КЗ выбирается у места установки аппарата, релейной защиты (в начале линии, до реактора, до трансформатора и т. д., считая от источника питания). Для определения наименьшего значения тока КЗ место КЗ выбирается в конце участка.

Режим работы ЭЭС, предшествующий КЗ, весьма сильно влияет на величину токов КЗ. Поэтому правильный учет режима является важным элементом выбора расчетных условий.

Так, если расчет выполняется для выбора или проверки аппаратуры, то расчетный режим должен быть таким, при котором ток КЗ имеет наибольшее значение. Для этого необходимо учитывать не только полную мощность ЭЭС, но и перспективу ее развития.

Таким образом, для определения максимального и минимального значений тока КЗ режим работы принимается, соответственно, максимальным и минимальным.

Максимальный режим характеризуется следующими условиями:

1. Включены все источники питания (генераторы, трансформаторы, линии), питающие сеть или распределительное устройство, в котором рассматривается КЗ.

2. При расчете КЗ на землю включены все трансформаторы и автотрансформаторы, нормально работающие заземленной нейтралью.

3. Схема участка сети, непосредственно примыкающая к месту КЗ такова, что по элементу проходит максимальный ток КЗ.

Минимальный режим характеризуется условиями, противоположными максимальному режиму при отключенной практически возможной части источников питания (генераторов, трансформаторов, линий), а схема соединений принимается такой, при которой по защищаемому элементу проходит минимальный ток КЗ.

1.4. Расчетная схема и ее элементы

Расчет тока КЗ начинают с составления для исходной расчетной схемы ее схемы замещения, которая представляется в однолинейном изображении (для одной фазы) и содержит все элементы расчетной схемы (генераторы, трансформаторы, линии и т. п.), их связи между собой и точкой КЗ.

Элементы вводят в схему своими эквивалентными сопротивлениями, а источники питания эквивалентными ЭДС. Сопротивления и ЭДС целесообразно обозначать номерами и указывать их величины в виде дроби, числитель которой указывает порядковый номер элемента, а знаменатель его величину в относительных или именованных единицах.

Генераторы и нагрузки вводят в схему замещения параметрами, соответствующими моменту времени, для которого рассчитывается ток КЗ.

Параметры элементов расчетной схемы устанавливаются в соответствии с их паспортными данными. При этом некоторые из них указываются в именованных единицах (Вольт, Ампер, Ом), а другие – в относительных единицах. Например, для воздушных и кабельных линий электропередач задаются: длина линии и ее удельное сопротивление в Ом/км.

Для генераторов, трансформаторов, токоограничивающих реакторов, двигателей обобщенной нагрузки сопротивления задаются в относительных единицах. Как известно, под относительным значением какой-либо величины понимают ее отношение к другой одноименной физической величине, выбранной за единицу измерения. В данном случае относительные сопротивления указанных элементов задаются при номинальных условиях.

Сопротивление элементов СЭС в именованных и относительных единицах определяется по формулам, приведенным в таблице 1.2.

1.5. Составление схемы замещения по расчетной схеме

Расчетная схема в однолинейном изображении должна включать участвующие в питании КЗ генераторы и все элементы их связей как с местом КЗ, так и между собой. Дополнительные источники – синхронные компенсаторы, крупные двигатели, мелкие станции следует вводить в схему только в тех случаях, когда они сравнительно близко расположены к месту КЗ.

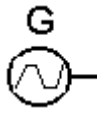
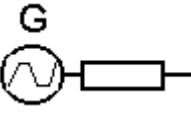


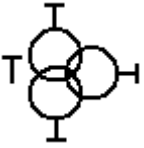
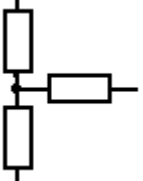
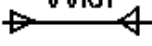
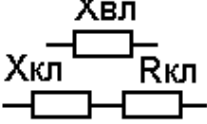

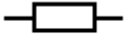
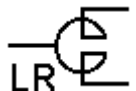
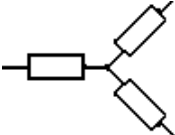

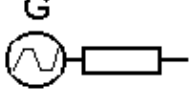
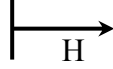
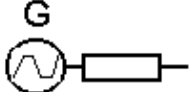
Очень крупные источники (смежные системы и др.) часто можно заменять источниками неограниченной мощности, т. е. считать, что напряжения в точках их присоединения к схеме остаются неизменными в течение всего процесса КЗ.

При учете нагрузок их можно объединять в крупные группы, как: нагрузка района сети, подстанции и т. д.

Пример расчетной схемы и ее схемы замещения приведены на рис. 1.1.

Таблица 1.2

Формулы для определения сопротивлений элементов СЭС

Наименование	Обозначение на расчетных схемах	Схема замещения	Реактивности элементов	
			Именованные единицы, Ом	Относительные базовые единицы
Синхронный генератор (двигатель, компенсатор)			$X_d'' \cdot \frac{U_H^2}{S_H}$	$X_d \cdot \frac{S_B}{S_H}$
Двухобмоточный трансформатор			$\frac{U_K \%}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_H}$	$\frac{U_K \%}{100} \cdot \frac{S_B}{S_H}$
Трёхобмоточный трансформатор			$X_B = 0,5 \cdot (X_{BH} + X_{BC} - X_{CH}); X_{BH} = \frac{U_{KBH}}{100}$ $X_C = 0,5 \cdot (X_{BC} + X_{CH} - X_{BH}); X_{CH} = \frac{U_{KCH}}{100}$ $X_H = 0,5 \cdot (X_{BH} + X_{CH} - X_{BC}); X_{BC} = \frac{U_{KBC}}{100}$	
ЛЭП: воздушная кабельная	$\frac{W_{Вл}}{W_{Кл}}$ 		$X_0 \cdot l$	$X_0 \cdot l \cdot \frac{S_B}{U_{ЛЭП}^2}$
Токоограничивающий реактор			$\frac{X_P \%}{100} \cdot \frac{U_H}{\sqrt{3} \cdot I_H}$	$\frac{X_P \%}{100} \cdot \frac{I_B}{I_H} \cdot \frac{U_H}{U_B}$
Сдвоенный реактор			$\frac{X_P \%}{100} \cdot \frac{U_H}{\sqrt{3} \cdot I_H}$	$\frac{X_P \%}{100} \cdot \frac{I_B}{I_H} \cdot \frac{U_H}{U_B}$
Асинхронный двигатель			$\frac{1}{K_{П}} \cdot \frac{U_H}{\sqrt{3} \cdot I_H}$	$\frac{1}{K_{П}} \cdot \frac{S_B \cdot \eta \cdot \cos \varphi}{P_H}$
Обобщённая нагрузка			$0,35 \cdot \frac{U_H^2}{S_H}$	$0,35 \cdot \frac{S_B}{S_H}$

Примечание. U_H – номинальное напряжение элемента (для трансформатора – напряжение высшей или низшей стороны); $K_{П}$ – относительный пусковой ток асинхронного двигателя (коэффициент кратности пуска).

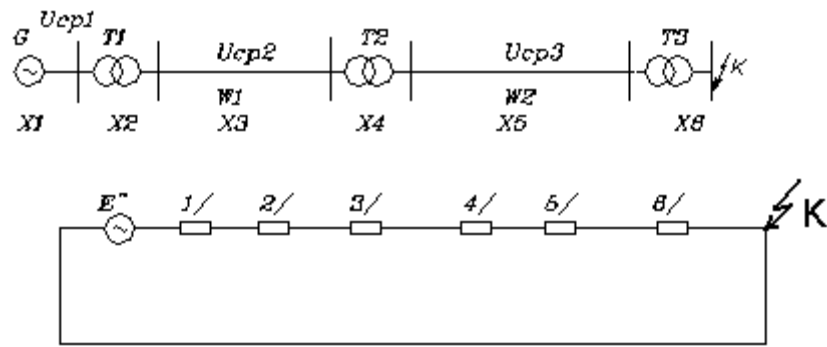


Рис. 1.1. Расчетная схема и схема замещения

2. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ

2.1. Основные расчетные приемы

Если схема замещения не содержит замкнутых контуров и в ней имеется один или несколько источников ЭДС, то ее необходимо привести к простейшему виду путем элементарных преобразований как в обычных расчетах линейных электрических цепей. К ним относятся, например: замена нескольких генерирующих ветвей, присоединенных к общему узлу, одной эквивалентной; преобразования треугольника в звезду и обратно и т. д.

Эквивалентные преобразования схем замещения приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Эквивалентные преобразования схем замещения

Преобразование	Схема до преобразования	Схема после преобразования	Условное обозначение преобразования	Формулы для определения параметров схемы после преобразования
Последовательное соединение			+	$x_{эк} = x_1 + x_2 + \dots + x_n$
Параллельное соединение				$x_{эк} = \frac{1}{y_{эк}} = \frac{1}{y_1 + y_2 + \dots + y_n} = \frac{1}{\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} + \dots + \frac{1}{x_n}}$ При двух ветвях $x_{эк} = \frac{x_1 x_2}{x_1 + x_2}$
Преобразование треугольника в эквивалентную звезду			Δ/Y	$x_L = \frac{x_{LN} x_{ML}}{x_{LN} + x_{NM} + x_{ML}}$ $x_N = \frac{x_{LN} x_{NM}}{x_{LM} + x_{NM} + x_{ML}}$ $x_M = \frac{x_{NM} x_{ML}}{x_{LN} + x_{NM} + x_{ML}}$
Преобразование звезды в эквивалентный треугольник			Y/Δ	$x_{LN} = x_L + x_N + \frac{x_L x_N}{x_M}$ $x_{NM} = x_N + x_M + \frac{x_N x_M}{x_L}$ $x_{ML} = x_M + x_L + \frac{x_M x_L}{x_N}$

Преобразование	Схема до преобразования	Схема после преобразования	Условное обозначение преобразования	Формулы для определения параметров схемы после преобразования
Преобразование многолучевой звезды в многоугольник с диагоналями			+ / ☒	$x_{LM} = x_L x_M \sum y$ $x_{MN} = x_M x_N \sum y$ $\vdots \vdots \vdots \vdots \vdots \vdots \vdots \vdots \vdots \vdots$ <p>где $\sum y = \frac{1}{x_L} + \frac{1}{x_M} + \frac{1}{x_N} + \frac{1}{x_P}$</p>
Замена нескольких источников эквивалентным				$E_{экв} = \frac{1}{y_{экв}} \sum_{k=1}^n y_k E_k$ <p>y_1, y_2, \dots, y_n; $y_{экв}$ — см. параллельное соединение элементов При двух ветвях</p> $E_{экв} = \frac{E_1 x_2 + E_2 x_1}{x_1 + x_2}$

Эквивалентная замена генераторных ветвей одним эквивалентным генератором возможна, если:

1. Генераторы, питающие точку КЗ, однотипные (турбогенераторы или гидрогенераторы).
2. Генераторы, питающие точку КЗ, соизмеримой мощности и имеют соизмеримую удаленность от точки КЗ.

Определение взаимных сопротивлений, например, между источником и точкой КЗ при преобразовании схемы к радиальному (лучевому) виду (рис. 2.1).

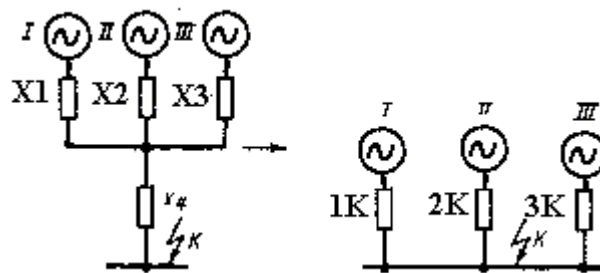


Рис. 2.1. Преобразование схемы

Порядок преобразования схемы следующий:

$$X_{экв} = X_1 || X_2 || X_3,$$

$$X_{сум} = X_{экв} + X_4,$$

$$C_1 = X_{\text{экв}}/X_1, C_2 = X_{\text{экв}}/X_2, C_3 = X_{\text{экв}}/X_3 \cdot$$

Проверка:

$$C_1 + C_2 + C_3 = 1.$$

$$X_{1К} = X_{\text{сум}}/C_1, X_{2К} = X_{\text{сум}}/C_2, X_{3К} = X_{\text{сум}}/C_3 \cdot$$

При преобразованиях схем в ходе выполнения расчетов нужно учитывать некоторые специфические особенности:

1. Первоочередной задачей расчета тока КЗ является определение тока непосредственно в аварийной ветви или в месте КЗ. Поэтому преобразование схемы нужно вести так, чтобы аварийная ветвь, по возможности, была сохранена до конца преобразования или, в крайнем случае, участвовала в нем на последнем этапе.

С этой целью, в частности, концы нагрузочных ветвей, ЭДС которых принимаются равными нулю, следует соединять с точкой КЗ (рис. 2.2).

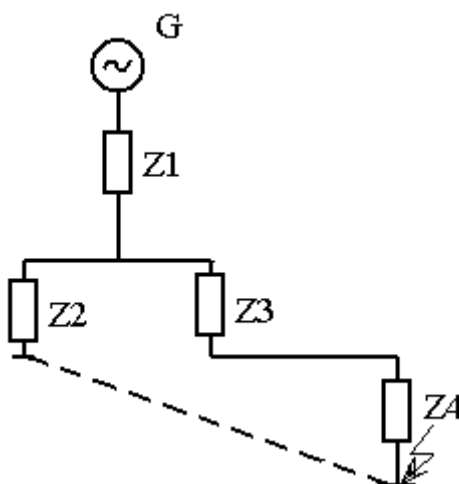


Рис. 2.2. Преобразование схемы

2. Когда КЗ находится в узле с несколькими сходящимися в нем ветвями, этот узел можно разрезать, сохранив на конце каждой образовавшейся ветви такое же КЗ. Далее полученную схему нетрудно преобразовать относительно любой из точек КЗ, учитывая другие ветви с КЗ как нагрузочные ветви с ЭДС, равными нулю (рис. 2.3).

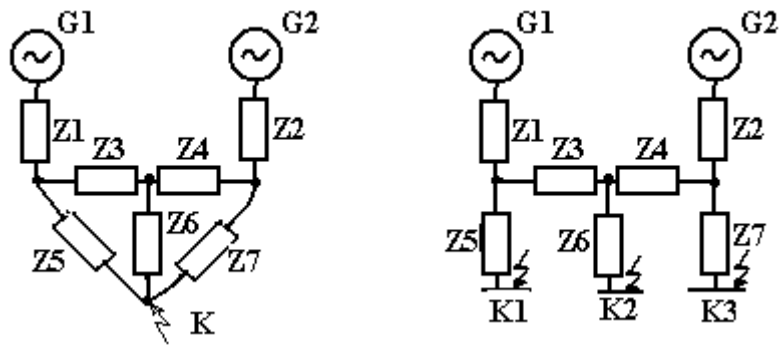


Рис. 2.3. Преобразование схемы

Такой прием эффективен, когда нужно найти ток в одной из ветвей, присоединенных к узлу КЗ.

Определенные трудности в упрощении схем возникают, когда точка КЗ находится в одном из узлов многоугольника, к другим узлам которого присоединены генерирующие ветви (рис. 2.4).

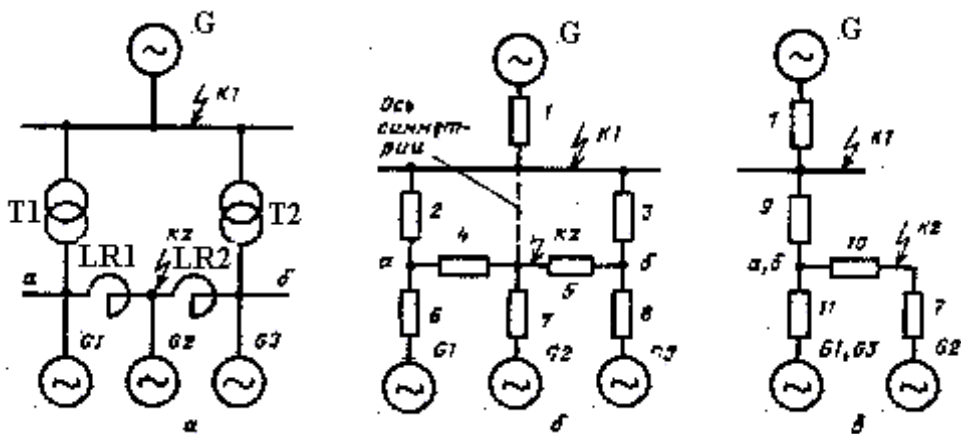


Рис. 2.4. Преобразование схемы

Если точка КЗ делит схему на две симметричные части, например, точки K_1 , K_2 , то при одинаковых характеристиках генераторов G_1 , G_3 и трансформаторов узлы а и б схемы будут иметь одинаковые потенциалы, вследствие чего их можно совместить: ветви генераторов G_1 и G_3 объединяют, представляя их эквивалентной машиной с $S = 2S_{\text{ном}}$. В результате получится схема «в». В этой схеме $\tilde{O}_9 = \tilde{O}_2 \parallel \tilde{O}_3$, $\tilde{O}_{10} = \tilde{O}_4 \parallel \tilde{O}_5$, $\tilde{O}_{11} = \tilde{O}_6$.

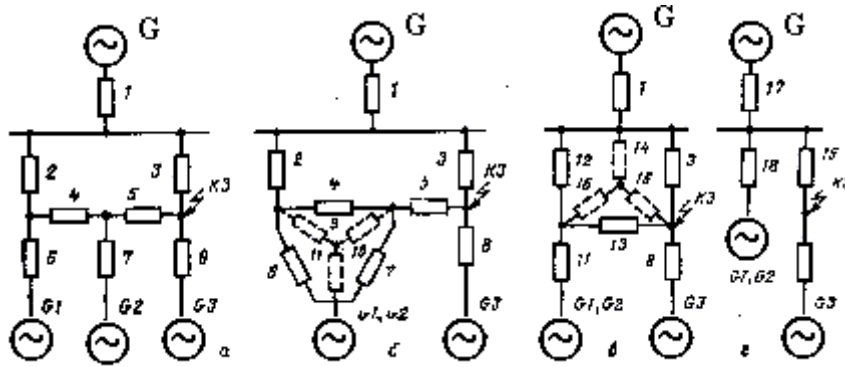


Рис. 2.5. Преобразование схемы

Преобразуем схему, приведенную на рис. 2.5. Если генераторы G_1 и G_2 имеют одинаковые ЭДС, то их можно объединить в эквивалентный генератор с мощностью $S = 2S_{\text{ном}}$. При таком объединении образуется треугольник сопротивлений X_4, X_6, X_7 (рис. 2.5 б), который преобразуется в звезду X_9, X_{10}, X_{11} . Далее преобразовывая, получим: $\tilde{O}_{12} = \tilde{O}_2 + \tilde{O}_9$, $\tilde{O}_{13} = \tilde{O}_5 + \tilde{O}_{10}$. Полученный треугольник X_3, X_{12}, X_{13} преобразуется в звезду X_{14}, X_{15}, X_{16} (рис. 2.5 в). Последовательно сложив сопротивления $\tilde{O}_{17} = \tilde{O}_1 + \tilde{O}_{14}$ и $\tilde{O}_{18} = \tilde{O}_{11} + \tilde{O}_{16}$, получим схему рис. 2.5 г.

Если схема имеет одинаковые ЭДС, то в некоторых случаях упрощение схемы достигается объединением источников. Например, если схема на рис. 2.7 а имеет одинаковые ЭДС E_2 и E_3 , то объединяя эти ЭДС и преобразуя полученный треугольник 2-3-6 в эквивалентную звезду, получим схему (рис. 2.6 б).

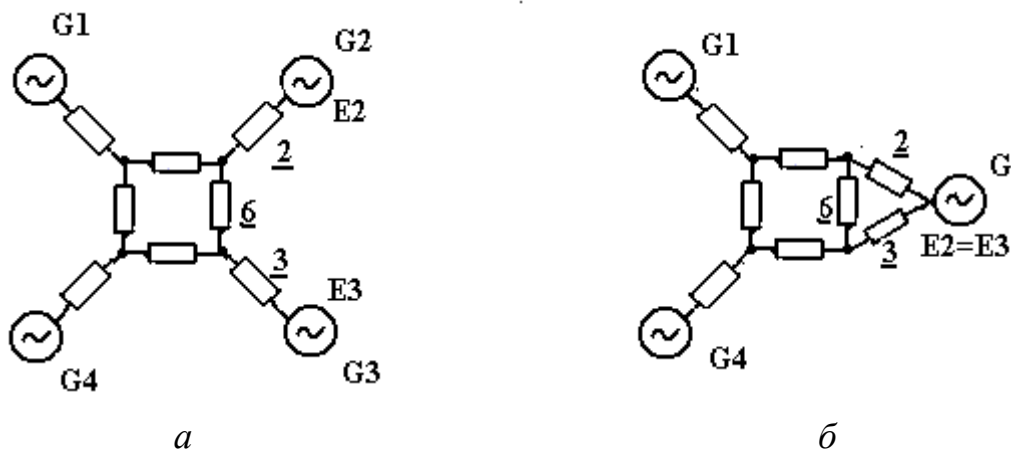


Рис. 2.6. Преобразование схемы

Следует отметить, что трудность преобразования схем замещения в значительной степени определяется выбранным порядком выполнения операций по упрощению схемы. Поэтому при преобразовании схем следу-

ет придерживаться такого порядка расчётов и записи результатов, который обеспечивает проверку полученных результатов. После получения простейшей схемы, содержащей точку КЗ и эквивалентную ЭДС, за эквивалентным сопротивлением приступают к расчёту тока КЗ. Токи и напряжения в других ветвях схемы (если в этом есть необходимость) определяют, совершая обратный переход от простейшей схемы к всё более сложным, вплоть до исходной.

Пример 2.1

На рис. 2.7 представлена исходная схема и схема замещения с указанием параметров. Необходимо выполнить преобразование схемы замещения и определить её параметры при КЗ в точках K_1 и K_2 .

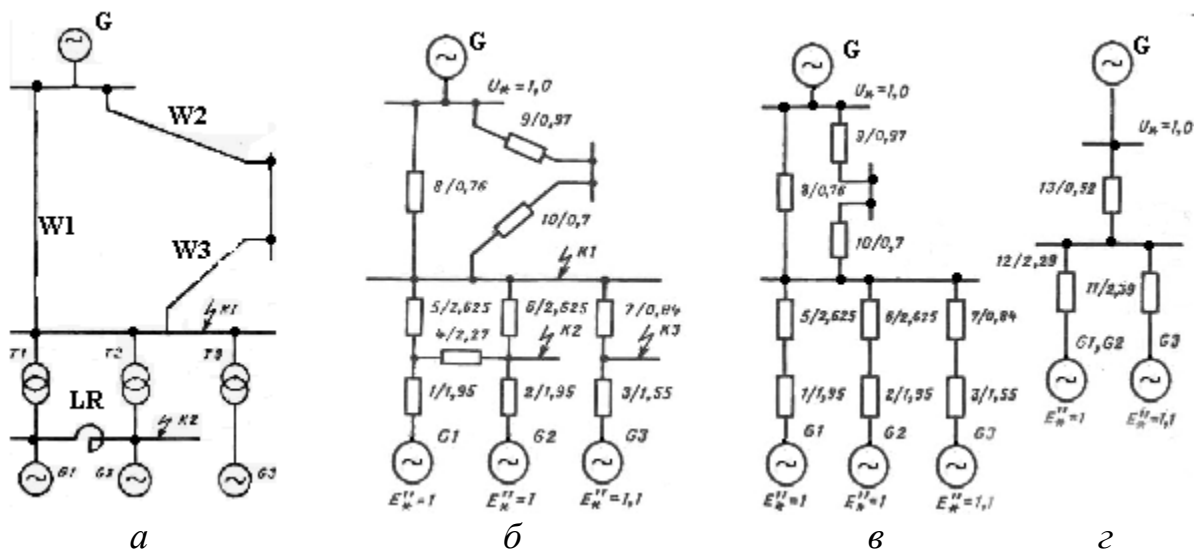


Рис. 2.7: а – исходная схема; б – схема замещения; в – схема замещения без учёта реактора; з – упрощённая схема

Решение

КЗ в точке K_1 .

Ветви генераторов G_1 и G_2 симметричны относительно точки КЗ K_1 , поэтому сопротивление реактора X_4 можно исключить из схемы замещения, т. к. оно включено между узлами одинакового потенциала и не влияет на ток КЗ. С учётом этого, схема замещения при КЗ в точке K_1 будет иметь вид, показанный на рис. 2.8 в. Упростим схему:

– результирующее сопротивление цепи генератора G_3

$$\tilde{O}_{11} = \tilde{O}_3 + \tilde{O}_7 = 1,55 + 0,84 = 2,39;$$

– результирующее сопротивление цепи однотипных генераторов G_1 и G_2

$$\tilde{O}_{12} = (\tilde{O}_1 + \tilde{O}_5) \parallel (\tilde{O}_2 + \tilde{O}_6) = \frac{1,95 + 2,625}{2} = 2,29;$$

– результирующее сопротивление ветви G (шин неизменного напряжения)

$$\tilde{O}_{13} = (\tilde{O}_9 + \tilde{O}_{10}) \parallel \tilde{O}_8 = \frac{(0,97 + 0,7) \cdot 0,76}{0,97 + 0,7 + 0,76} = 0,52.$$

Упрощённая схема замещения с указанием параметров представлена на рис. 2.7 г.

КЗ в точке K₂ (на выводах генератора G₂).

Генератор G₃ находится на значительной электрической удалённости от места КЗ, и поэтому для упрощения расчётов его целесообразно включить в состав ветви системы, определив её сопротивление:

$$\tilde{O}_{14} = \tilde{O}_{13} \parallel \tilde{O}_{11} = \frac{0,52 \cdot 2,39}{0,52 + 2,39} = 0,427.$$

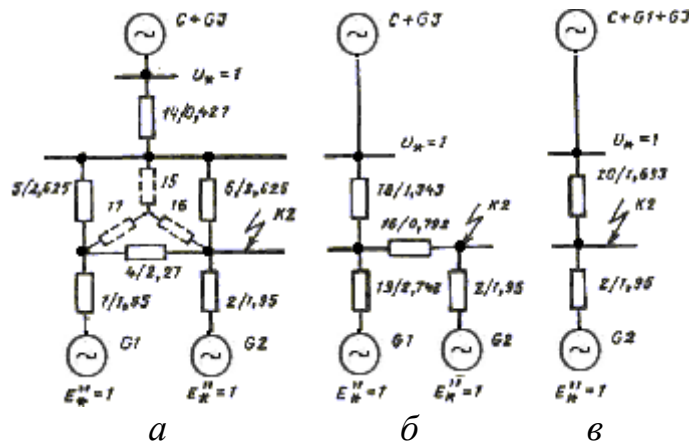


Рис. 2.8. Схемы замещения для КЗ в точке K₂

Ток КЗ в точке K₂ от энергосистемы G, генераторов G₁ и G₃ легче определить, объединив эти источники в единую эквивалентную ветвь. Ветви G и G₃ объединены и представлены общим сопротивлением X₁₄.

Преобразуем треугольник сопротивлений X₄, X₅, X₆ в эквивалентную звезду X₁₅, X₁₆, X₁₇:

$$\tilde{O}_{15} = \frac{\tilde{O}_5 \cdot \tilde{O}_6}{\tilde{O}_4 + \tilde{O}_5 + \tilde{O}_6} = \frac{2,625 \cdot 2,625}{2,27 + 2,625 + 2,625} = 0,916,$$

$$\tilde{O}_{16} = \frac{\tilde{O}_4 \cdot \tilde{O}_6}{\tilde{O}_4 + \tilde{O}_5 + \tilde{O}_6} = \frac{2,27 \cdot 2,625}{2,27 + 2,625 + 2,625} = 0,792.$$

Схема замещения (рис. 2.8 б) преобразуется к виду (рис. 2.8 в), где:

$$\tilde{O}_{18} = (\tilde{O}_{14} + \tilde{O}_{15}) = 0,427 + 0,916 = 1,343,$$

$$\tilde{O}_{19} = (\tilde{O}_1 + \tilde{O}_{17}) = 1,95 + 0,792 = 2,742.$$

Конечная схема замещения для расчётов тока КЗ в точке К₂ будет иметь вид, представленный на рис. 2.8 г. Сопротивление эквивалентной ветви:

$$\tilde{O}_{20} = X_{16} + X_{18} \parallel \tilde{O}_{19} = 0,792 + \frac{1,343 \cdot 2,742}{1,343 + 2,742} = 1,693.$$

Пример 2.2

Для схемы, представленной на рис. 2.9, составить схему замещения и преобразовать её в звезду относительно точки КЗ при следующих данных в относительных единицах: X₁(G) = 0,2; X₂(W1) = 0,15; X₃(T) = 0,26; X₄(LR) = 0,3; X₅(W2) = 0,04; X₆(G1) = 0,25; X₇(H) = 0,4.

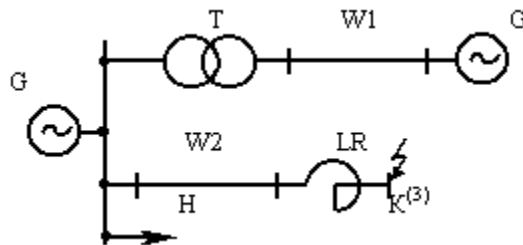


Рис. 2.9. Исходная схема к примеру 2.2

Решение

Схема замещения с величинами сопротивлений приведена на рис. 2.10.

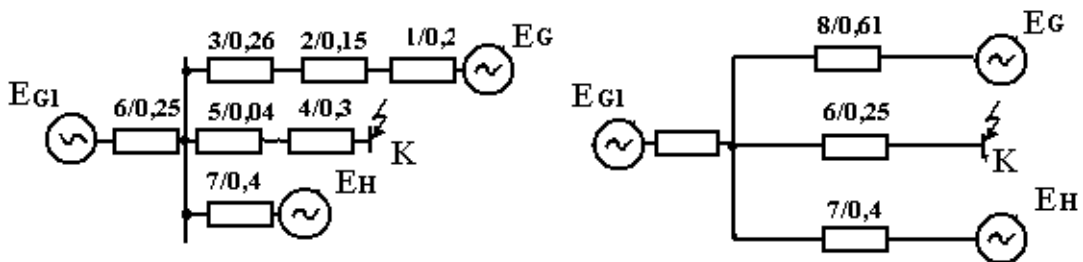


Рис. 2.10. Схема замещения к примеру 2.2

Преобразуем схему замещения в лучевую звезду относительно точки КЗ:

$$\tilde{O}_8 = \tilde{O}_1 + \tilde{O}_2 + \tilde{O}_3 = 0,2 + 0,15 + 0,26 = 0,61;$$

$$\tilde{O}_6 = 0,25;$$

$$\tilde{O}_7 = 0,4;$$

$$\tilde{O}_9 = 0,34;$$

$$\begin{aligned}\tilde{O}_{\hat{Y}\hat{E}\hat{A}} &= 0,61 // 0,25 // 0,4 = \frac{0,61 \cdot 0,25 \cdot 0,4}{0,61 \cdot 0,25 + 0,61 \cdot 0,4 + 0,4 \cdot 0,25} = \\ &= \frac{0,061}{0,153 + 0,244 + 0,1} = \frac{0,061}{0,497} = 0,123;\end{aligned}$$

$$\tilde{N}_1 = \frac{0,123}{0,61} = 0,2; \quad \tilde{N}_2 = \frac{0,123}{0,25} = 0,49;$$

$$\tilde{N}_3 = \frac{0,123}{0,4} = 0,31.$$

$$\checkmark : C_1 + C_2 + C_3 = 1;$$

$$0,2 + 0,49 + 0,31 = 1;$$

$$\tilde{O}_{D\hat{A}\hat{C}} = \tilde{O}_{\hat{Y}\hat{E}\hat{A}} + \tilde{O}_{\hat{A}} = 0,123 + 0,34 = 0,463;$$

$$X'_{10} = \frac{0,463}{0,2} = 2,32; \quad X'_{11} = \frac{0,463}{0,49} = 0,95; \quad X'_{12} = \frac{0,463}{0,31} = 1,49.$$

После преобразования схема будет иметь вид, представленный на рис. 2.11.

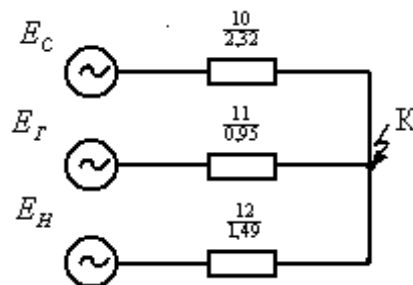


Рис. 2.11. Преобразованная схема

Домашнее задание № 1

Для заданной схемы составить схему замещения и преобразовать ее в звезду относительно точки КЗ (номер варианта соответствует последнему номеру студенческого билета).

Схема 1

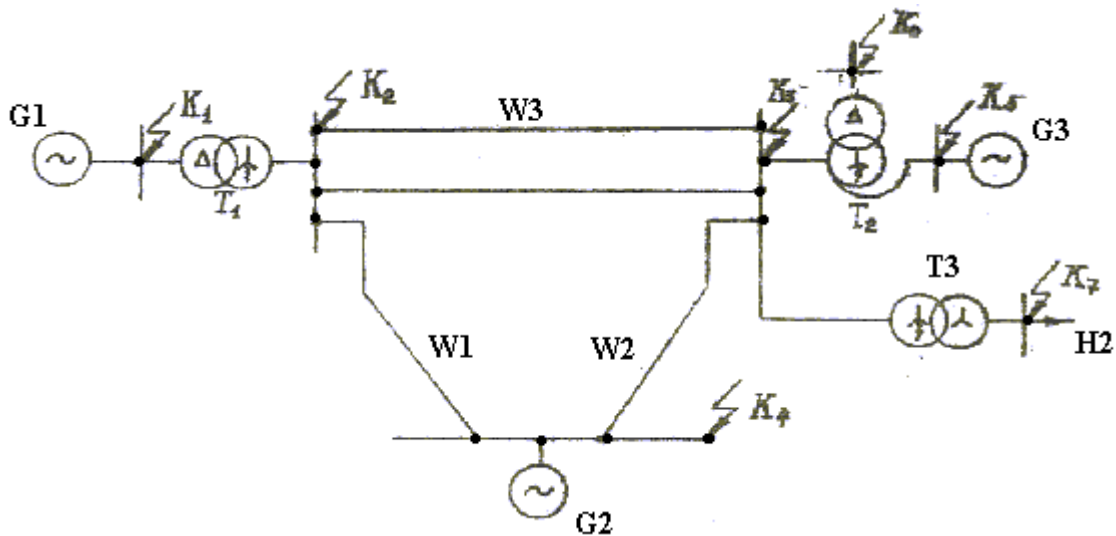


Рис. 2.12. Схема для домашнего задания

Исходные данные для схемы, представленной на рис. 2.12, приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3

Исходные данные

№ вар.	Точка КЗ	X_1 (w1)	X_2 (w2)	X_3 (w3)	X_4 (G1)	X_5 (T1)	X_6 (G2)	X_7 (T3)	X_8 (G3)	X_9 (H1)	X_{10} (H2)	X_{11} (T2)		
												B	C	H
1	K1	0,26	0,29	0,26	0,25	0,22	0,1	0,21	0,2	0,1	—	0,2	0	0,1
2	K2	0,31	0,36	0,29	0,38	0,35	0,08	0,41	0,18	0,15	0,4	0,3	0	0,2
3	K3	0,21	0,32	0,16	0,27	0,36	0,07	0,34	0,16	—	0,35	0,4	0	0,1
4	K4	0,31	0,61	0,27	0,29	0,26	0,08	0,35	0,14	0,22	—	0,5	0	0,2
5	K5	0,54	0,16	0,26	0,34	0,31	0,15	0,25	0,12	0,25	0,25	0,1	0	0,1
6	K5	0,25	0,29	0,37	0,41	0,29	0,14	0,35	0,1	0,28	0,20	0,2	0	0,2
7	K7	0,32	0,41	0,36	0,29	0,31	0,13	0,16	0,1	0,30	0,15	0,3	0	0,1
8	K3	0,29	0,26	0,19	0,34	0,19	0,12	0,38	0,09	—	0,10	0,4	0	0,2
9	K2	0,34	0,36	0,41	0,56	0,37	0,11	0,29	0,1	0,4	0,20	0,5	0	0,1
0	K4	0,37	0,31	0,29	0,44	0,28	0,1	0,30	0,09	0,5	0,30	0,1	0	0,2

Схема 2

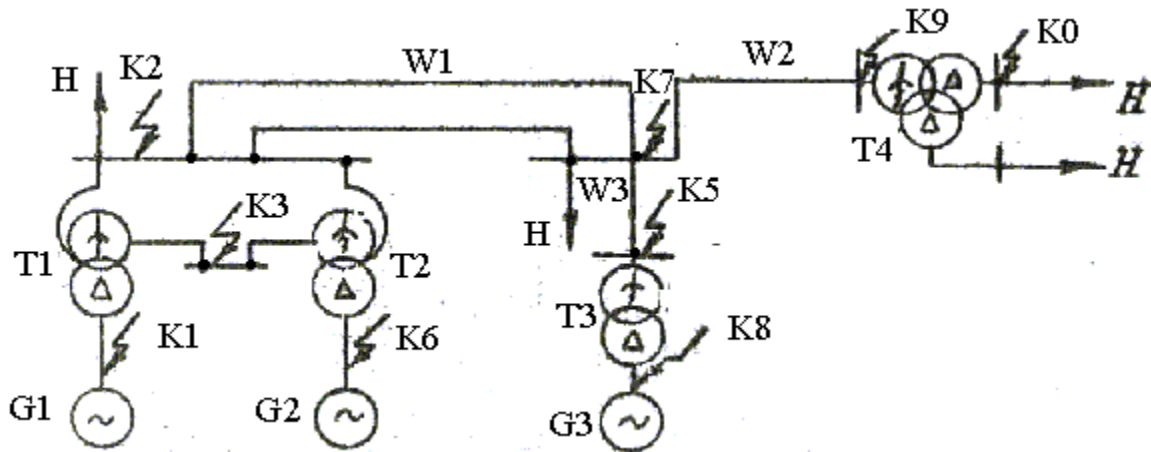


Рис. 2.13. Схема для домашнего задания

Исходные данные для схемы, представленной на рис. 2.13, приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4

Исходные данные

№ вар.	Точка КЗ	X_1 (W1)	X_2 (W2)	X_3 (W3)	X_4, X_5 (G1, G2)	X_6 (G3)	X_7, X_8 (T1, T2)	X_9 (T3)	X_{10} (T4)	X_{11} (T2)	X_{12}, X_{13} (H)
1	K ₁	0,1	0,32	0,26	0,25	0,17	0,22	0,29	0,21	0,26	0,2
2	K ₂	0,08	0,35	0,29	0,38	0,14	0,35	0,36	0,41	0,31	0,18
3	K ₃	0,07	0,25	0,16	0,27	0,51	0,36	0,32	0,34	0,21	0,16
4	K ₄	0,08	0,26	0,27	0,29	0,63	0,26	0,61	0,35	0,31	0,14
5	K ₅	0,15	0,34	0,26	0,34	0,55	0,31	0,16	0,25	0,54	0,12
6	K ₆	0,14	0,55	0,37	0,41	0,24	0,29	0,29	0,35	0,25	0,1
7	K ₇	0,13	0,33	0,36	0,29	0,36	0,31	0,41	0,16	0,32	0,1
8	K ₈	0,12	0,51	0,19	0,34	0,54	0,19	0,26	0,38	0,29	0,09
9	K ₉	0,11	0,57	0,41	0,56	0,36	0,37	0,36	0,29	0,34	0,1
0	K ₀	0,1	0,44	0,29	0,44	0,41	0,28	0,31	0,30	0,37	0,09

Схема 3

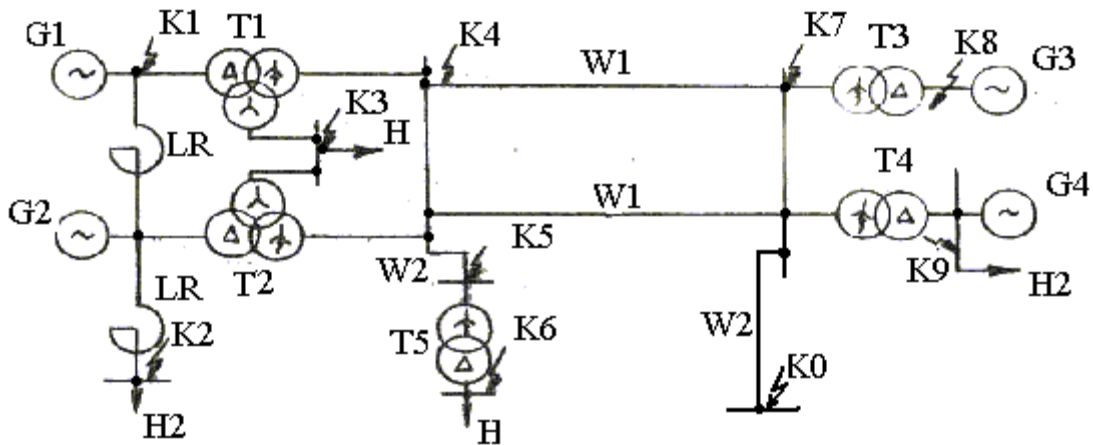


Рис. 2.14. Схема для домашнего задания

Исходные данные для схемы, представленной на рис. 2.14, приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5

Исходные данные

№ вар.	Точка КЗ	X ₁ (W1)	X ₂ (W2)	X ₃ (G1) X ₄ (G2)	X ₅ (G3) X ₆ (G4)	X7;X8 (T1,T2)			X9;X10 (T3,T4)			X ₁₁ (T5)	X ₁₂ (H1)	X ₁₃ (H2)	X ₁₄ (LR)
						С	В	Н	С	В	Н				
1	K ₁	0,2	0,21	0,26	0,25	0	0,29	0,1	0	0,21	0,1	0,22	0,17	0,26	0,32
2	K ₂	0,18	0,41	0,29	0,38	0	0,36	0,2	0	0,33	0,15	0,35	0,14	0,31	0,35
3	K ₃	0,16	0,34	0,16	0,27	0	0,32	0,3	0	0,62	0,3	0,36	0,51	0,21	0,25
4	K ₄	0,14	0,35	0,27	0,29	0	0,61	0,4	0	0,52	0,25	0,26	0,63	0,31	0,26
5	K ₅	0,12	0,25	0,26	0,34	0	0,16	0,1	0	0,24	0,12	0,31	0,55	0,54	0,34
6	K ₆	0,1	0,35	0,37	0,41	0	0,29	0,2	0	0,45	0,2	0,29	0,24	0,25	0,55
7	K ₇	0,1	0,16	0,36	0,29	0	0,41	0,3	0	0,44	0,2	0,31	0,36	0,32	0,33
8	K ₈	0,09	0,38	0,19	0,34	0	0,26	0,4	0	0,17	0,1	0,19	0,54	0,29	0,51
9	K ₉	0,1	0,29	0,41	0,56	0	0,36	0,1	0	0,56	0,3	0,37	0,36	0,34	0,57
0	K ₀	0,09	0,30	0,29	0,44	0	0,31	0,2	0	0,36	0,18	0,28	0,41	0,37	0,44

3. ТОЧНОЕ ПРИВЕДЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ В ИМЕНОВАННЫХ ЕДИНИЦАХ

3.1. Общие положения

Часто расчетная схема системы содержит трансформаторы. Поэтому для составления схем замещения магнитосвязанные цепи должны быть заменены эквивалентной электрической связанной цепью.

Составление такой схемы замещения сводится к приведению сопротивлений и ЭДС элементов, находящихся в различных схемах трансформации заданной схемы к какой-либо одной ступени, принимаемой за основную.

В общем случае, выражения для определения приведенных к основной ступени значений ЭДС (напряжения), токов и сопротивлений имеют вид:

$$\dot{A}_{i\bar{N}i} = (\hat{E}_1 \cdot \hat{E}_2 \dots \hat{E}_i) \cdot \dot{A};$$

$$I_{i\bar{N}i} = \frac{1}{K_1 \cdot K_2 \dots K_i} \cdot I;$$

$$Z_{i\bar{N}i} = (K_1 \cdot K_2 \dots K_i)^2 \cdot Z,$$

где $\hat{E}_1, \hat{E}_2 \dots \hat{E}_i$ – коэффициенты трансформации ряда последовательно включенных в схеме трансформаторов, определяемые как отношение их линейных напряжений в направлении от выбранной основной ступени напряжения к той ступени, элементы которой подлежат приведению.

Приведение сопротивлений и ЭДС к одной ступени напряжения может быть выполнено точно с учетом действительных коэффициентов трансформации, указанных в паспортных данных.

Пример 3.1

В схеме рис. 3.1 в точке К произошло трёхфазное КЗ.

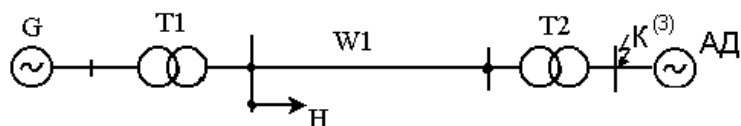


Рис. 3.1. Расчетная схема к примеру 3.1

Данные элементов расчётной схемы следующие:

Генератор G: в предшествующем режиме работал с полной нагрузкой при $\cos \varphi = 0,8$; $S_f = 38,5 \text{ МВА}$; $U_f = 10,5 \text{ кВ}$; $X_{d*}'' = 0,2$. Сверхпереходная ЭДС генератора составила $E_A'' = 11,76 \text{ кВ}$.

Трансформатор Т1: $S_f = 40 \text{ МВА}$; $10,5/121 \text{ кВ}$; $U_{\hat{E}} = 10,5 \%$.

Трансформатор Т2: $S_f = 6,3 \text{ МВА}$; $110/6,6 \text{ кВ}$; $U_{\hat{E}} = 10,5 \%$.

Линия W1: воздушная, длиной 50 км ; $X_0 = 0,4 \text{ Ом / км}$.

Нагрузка Н: обобщённая (комплексная) $S_f = 30 \text{ МВА}$; $X_{f*}'' = 0,35$;
сверхпереходная ЭДС нагрузки $\dot{A}_{f*}'' = 0,85$.

Асинхронный двигатель АД: $P_f = 2000 \text{ кВт}$; $U_f = 6 \text{ кВ}$; $\cos\varphi = 0,83$;
 $\eta = 92\%$; $I_{\dot{I}0\hat{N}\hat{E}*} = 5,2$; $E_{\hat{A}\hat{A}*}'' = 0,9$.

Эквивалентная схема замещения с указанием порядковых номеров её элементов приведена на рисунке 3.1. В данной схеме три ступени напряжения. Примем в качестве основной ступень, где находится точка КЗ, т. е. $U_{\hat{I}\hat{N}\hat{I}} = 6,6 \text{ кВ}$, тогда действительные коэффициенты трансформации в направлении от основной ступени будут: $\hat{E}_1 = 6,6/110$; $\hat{E}_2 = 121/10,5$.

Рассчитаем сопротивления элементов схемы замещения:

$$G: X_D = X_{d*}'' \cdot \frac{U_H^2}{S_H} \cdot K_1^2 \cdot K_2^2 = 0,2 \cdot \frac{10,5^2}{38,5} \cdot \left(\frac{6,6}{110}\right)^2 \cdot \left(\frac{121}{10,5}\right)^2 = 0,274 \text{ Ом};$$

$$T1: X_{T1} = \frac{U_K \%}{100} \cdot \frac{U_{\hat{A}\hat{I}}^2}{S_f} \cdot \hat{E}_1^2 = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{121^2}{40} \cdot \left(\frac{6,6}{110}\right)^2 = 0,138 \text{ Ом};$$

$$H: X_H = X_{H*}'' \cdot \frac{U_H^2}{S_H} \cdot K_1^2 = 0,35 \cdot \frac{121^2}{30} \cdot \left(\frac{6,6}{110}\right)^2 = 0,614 \text{ Ом};$$

$$W1: X_{\hat{E}} = X_0 \cdot l \cdot K_1^2 = 0,4 \cdot 50 \cdot \left(\frac{6,6}{110}\right)^2 = 0,072 \text{ Ом};$$

$$T2: X_{T2} = \frac{U_K \%}{100} \cdot \frac{U_{\hat{H}}^2}{S_f} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{6,6^2}{6,3} = 0,726 \text{ Ом};$$

$$\text{АД: } X_{\hat{A}\hat{A}} = \frac{1}{I_{\dot{I}0\hat{N}\hat{E}*}} \cdot \frac{U_H^2 \cdot \cos\varphi \cdot \eta}{P_H} = \frac{1}{5,2} \cdot \frac{6^2 \cdot 0,83 \cdot 0,92}{2} = 2,64 \text{ Ом}.$$

Сверхпереходные ЭДС:

$$E_{\hat{A}}'' = \dot{A}_{\hat{A}\hat{I}\hat{I}\hat{I}}'' \cdot \hat{E}_1 \cdot \hat{E}_2 = 11,76 \cdot \left(\frac{6,6}{110}\right) \cdot \left(\frac{121}{10,5}\right) = 8,13 \text{ кВ};$$

$$E_H'' = \dot{A}_{\hat{I}*}\hat{I}\hat{I}\hat{I}'' \cdot \hat{E}_1 \cdot U_f = 0,85 \cdot \left(\frac{6,6}{110}\right) \cdot 121 = 6,171 \text{ кВ};$$

$$\dot{A}_{\hat{A}\hat{A}}'' = \dot{A}_{\hat{A}\hat{A}*}'' \cdot U_f = 0,9 \cdot 6 = 5,4 \text{ кВ}.$$

Преобразуем схему замещения:

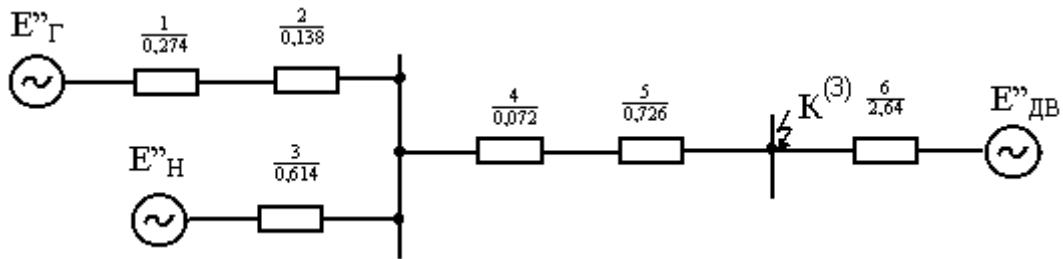


Рис. 3.2. Схема замещения к примеру 3.1

$$X_7 = X_1 + X_2 = 0,412 \text{ Ом}; \quad \tilde{N}_1 = \frac{0,247}{0,412} = 0,6;$$

$$X_8 = X_4 + X_5 = 0,072 + 0,726 = 0,798 \text{ Ом}; \quad \tilde{N}_2 = \frac{0,247}{0,614} = 0,4;$$

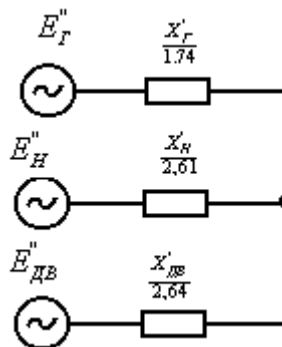
$$X_{7\parallel X_3} = \frac{0,412 \cdot 0,614}{0,412 + 0,614} = \frac{0,252}{1,026} = 0,247 \text{ Ом};$$

$$X_{D\dot{A}C} = X_{II} + X_8 = 0,247 + 0,798 = 1,044 \text{ Ом};$$

$$X'_A = \frac{X_{D\dot{A}C}}{C_1} = \frac{1,044}{0,6} = 1,74 \text{ Ом};$$

$$X'_H = \frac{X_{D\dot{A}C}}{C_2} = \frac{1,044}{0,4} = 2,61 \text{ Ом}.$$

Найдём ток от каждой ветви:



$$I'_A = \frac{E''_A}{\sqrt{3} \cdot X'_A} = \frac{8,13}{\sqrt{3} \cdot 1,74} = 2,7 \text{ кА};$$

$$I'_H = \frac{E''_H}{\sqrt{3} \cdot X'_H} = \frac{6,171}{\sqrt{3} \cdot 2,61} = 1,367 \text{ кА};$$

$$I'_{\hat{A}\hat{A}} = \frac{E''_{\hat{A}\hat{A}}}{\sqrt{3} \cdot X'_{\hat{A}\hat{A}}} = \frac{5,4}{\sqrt{3} \cdot 2,64} = 1,182 \text{ кА.}$$

Пример 3.2

Составить схему замещения (рис. 3.3) и определить начальные значения периодической составляющей токов на отдельных участках схемы при трехфазном КЗ в точке K_1 при точном приведении в именованных единицах. При решении пренебречь активными сопротивлениями элементов и нагрузками.

Данные элементов расчётной схемы следующие:

Система G_c : $X_c = 16,2$ Ом; напряжение $U_c = 220$ кВ.

Автотрансформаторы АТ1 и АТ2: $S = 63$ МВА, $220/121 \pm 12\% / 38,5$ кВ.

$U_{ВН} = 18,9\%$ $U_{СН} = 14,4/12,6/11,5\%$, $U_{СН} = 19,3/13,1/9,5\%$.

Гидрогенератор G_1 : $S = 57$ МВА, $6,3$ кВ, $X'_d = 0,282$.

Трансформатор T_1 : $S = 63$ МВА, $115/6,3$ кВ, $U_K = 10,5\%$.

ЛЭП: W_1 длиной 100 км; W_2 длиной 62 км, $X_0 = 0,4$ Ом/км.

Составляем схему замещения (рис. 3.3), где в качестве основной принимаем ступень 220 кВ. Ход расчета показан для условия работы автотрансформаторов с минимальным регулируемым напряжением со стороны среднего напряжения.

Определяем реактивные сопротивления по схеме замещения на рис. 3.3. АТ1 и АТ2 с учетом положения РПН при минимальном регулируемом напряжении со стороны среднего напряжения ($U = 106,5$ кВ):

$$X_A^* = 0,5 \cdot \frac{(14,4 + 18,9 - 19,3)}{100} = 0,07; \quad X_C^* = 0,5 \cdot \frac{(14,4 + 19,3 - 18,9)}{100} = 0,074;$$

$$X_i^* = 0,5 \cdot \frac{(18,9 + 19,3 - 14,4)}{100} = 0,119.$$

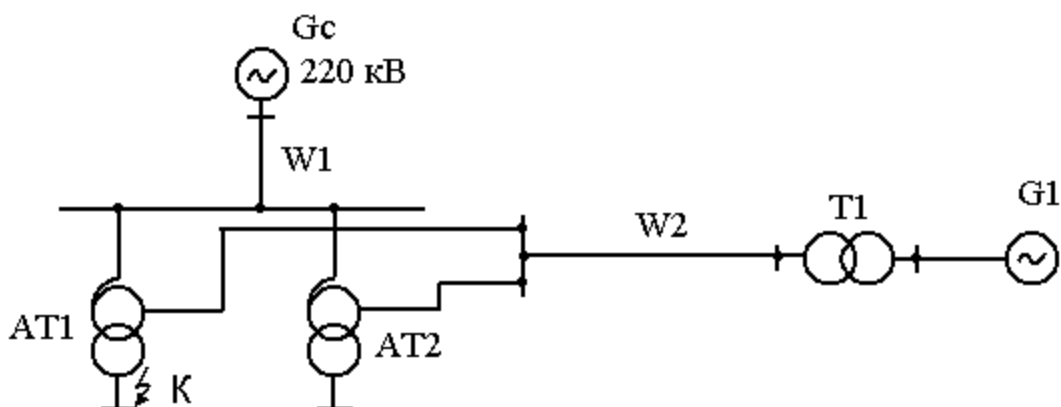


Рис. 3.3. Расчетная схема к примеру 3.2

Реактивные сопротивления АТ1 и АТ2:

$$X_3 = X_6 = X_A^* \cdot \frac{U_A^2}{S_f} = 0,07 \cdot \frac{220^2}{63} = 53,7 \text{ Ом}; \quad X_4 = X_7 = 0,074 \cdot \frac{220^2}{63} = 56,9 \text{ Ом};$$

$$X_5 = X_8 = 0,119 \cdot \frac{220^2}{63} = 91,3 \text{ Ом}.$$

Реактивное сопротивление и фазное напряжение системы:

$$X_c = 16,2 \text{ Ом}; \quad U_{\tilde{n}\hat{o}} = 220/\sqrt{3}, \text{ кВ}.$$

Реактивные сопротивления: линия W1 – $X_2 = 0,4 \cdot 100 = 40 \text{ Ом}$;

$$\text{линия W2 – } X_9 = 0,4 \cdot 62 \cdot \frac{220^2}{106,5^2} = 105,83 \text{ Ом}.$$

$$\text{Трансформатора T1: } \tilde{O}_{10} = 0,105 \cdot \frac{115^2 \cdot 220^2}{63 \cdot 106,5^2} = 93,8 \text{ Ом}.$$

$$\text{Генератора G1: } X_{11} = 0,282 \frac{6,3^2 \cdot 115^2 \cdot 220^2}{57 \cdot 6,3^2 \cdot 106,5^2} = 282 \text{ Ом}.$$

Фазная ЭДС генератора, приведенная к ступени напряжения 220 кВ:

$$E_{\tilde{n}\hat{o}} = \frac{6,3 \cdot 115 \cdot 220}{\sqrt{3} \cdot 6,3 \cdot 106,5} = \frac{237}{\sqrt{3}} \text{ кВ}. \quad E_{\tilde{N}\hat{O}} = \frac{220}{\sqrt{3}}.$$

Упрощаем схему (рис. 3.4):

$$\tilde{O}_{12} = \tilde{O}_1 + \tilde{O}_2 = 16,2 + 40 = 56,2 \text{ Ом};$$

$$\tilde{O}_{13} = \tilde{O}_9 = \tilde{O}_{10} = \tilde{O}_{11} = 105,5 + 93,8 + 282 = 481,3 \text{ Ом};$$

$$\tilde{O}_{14} = \tilde{O}_6 + \tilde{O}_7 = 53,7 + 56,9 = 110,6 \text{ Ом}.$$

Преобразуем треугольник с элементами X3, X4, X14 в эквивалентную звезду (рис. 3.4):

$$\tilde{O}_{15} = \frac{\tilde{O}_3 \cdot \tilde{O}_{14}}{\tilde{O}_3 + \tilde{O}_4 + \tilde{O}_{14}} = \frac{53,7 \cdot 110,6}{53,7 + 56,9 + 110,6} = 26,9 \text{ Ом};$$

$$\tilde{O}_{16} = \frac{\tilde{O}_4 \cdot \tilde{O}_{14}}{\tilde{O}_3 + \tilde{O}_4 + \tilde{O}_{14}} = \frac{56,9 \cdot 110,6}{53,7 + 56,9 + 110,6} = 28,4 \text{ Ом};$$

$$\tilde{O}_{17} = \frac{\tilde{O}_3 \cdot \tilde{O}_4}{\tilde{O}_3 + \tilde{O}_4 + \tilde{O}_{14}} = \frac{53,7 \cdot 56,9}{53,7 + 56,9 + 110,6} = 13,8 \text{ Ом}.$$

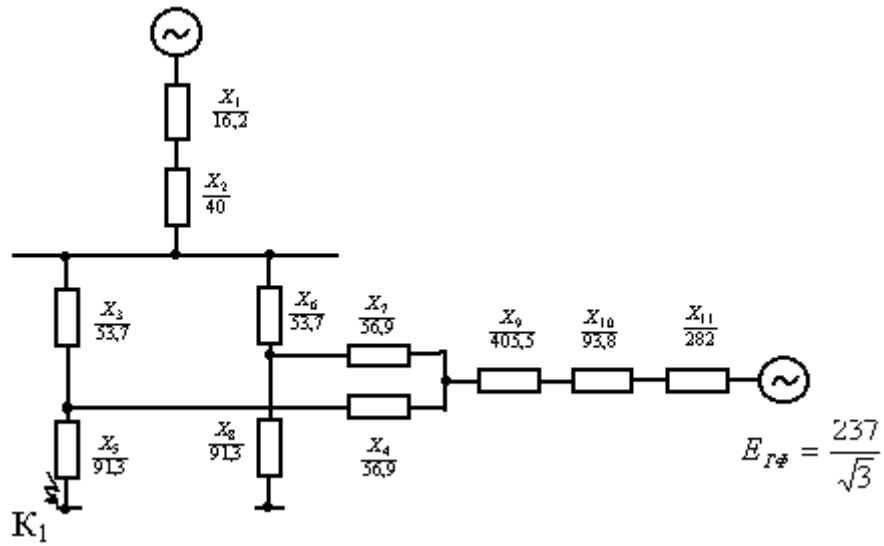


Рис. 3.3. Схема замещения к примеру 3.2

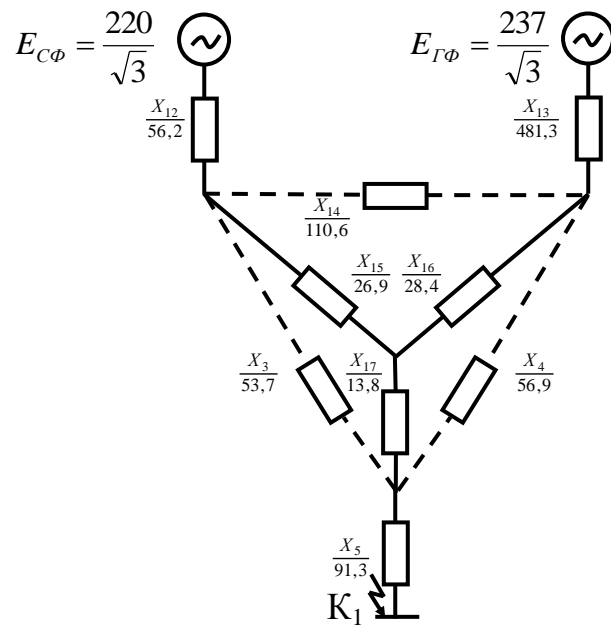
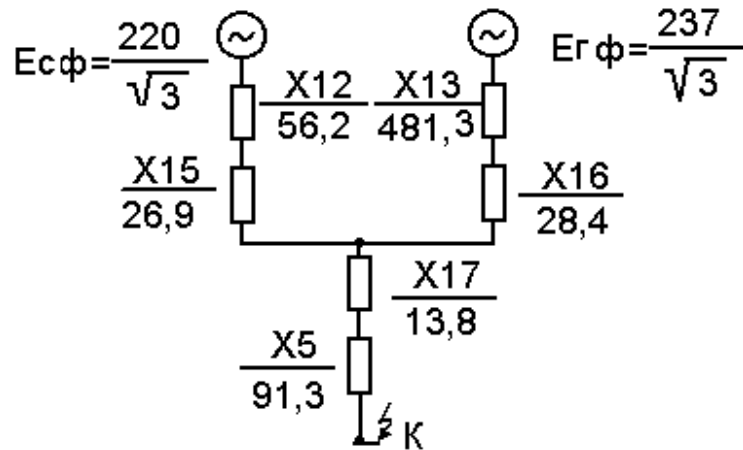
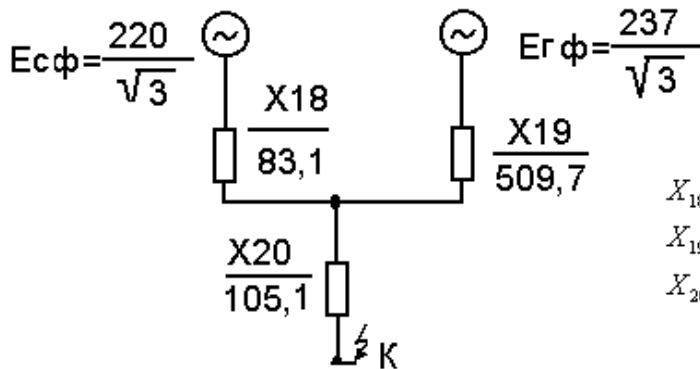


Рис. 3.4. Схема замещения к примеру 3.2



Упрощаем схему

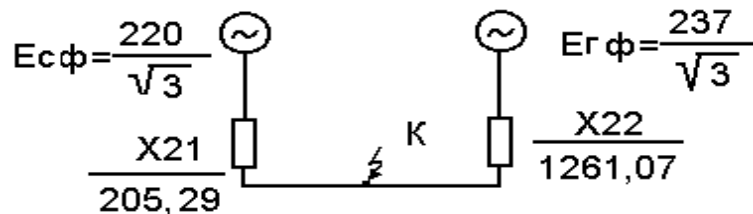


$$X_{18} = X_{12} + X_{15} = 56,2 + 26,9 = 83,1 \text{ Ом};$$

$$X_{19} = X_{13} + X_{16} = 481,3 + 28,4 = 509,7 \text{ Ом};$$

$$X_{20} = X_5 + X_{17} = 91,3 + 13,8 = 105,1 \text{ Ом}.$$

Используя коэффициенты распределения, получим схему:



$$X_{\hat{Y}\hat{E}\hat{A}} = X_{18} // X_{19} = \frac{83,1 \cdot 509,7}{83,1 + 509,7} = \frac{4235607}{592,8} = 71,45 \text{ Ом};$$

$$X_{D\hat{A}C} = X_{\hat{Y}\hat{E}\hat{A}} + X_{20} = 71,45 + 105,1 = 176,55 \text{ Ом};$$

$$C_1 = \frac{X_{\hat{Y}\hat{E}\hat{A}}}{X_{18}} = \frac{71,45}{83,1} = 0,86, \quad C_2 = \frac{X_{\hat{Y}\hat{E}\hat{A}}}{X_{19}} = 0,14;$$

$$C_1 + C_2 = 1;$$

$$X_{21} = \frac{X_{\hat{Y}\hat{E}\hat{A}}}{C_1} = \frac{176,55}{0,86} = 205,29 \text{ Ом}; \quad X_{22} = \frac{X_{\hat{Y}\hat{E}\hat{A}}}{C_2} = 1261,07 \text{ Ом}.$$

Определим токи КЗ:

$$\text{– от системы } I_C = \frac{U_{\hat{O}\bar{N}}}{X_{21}} = \frac{220}{\sqrt{3} \cdot 205,29} = 0,619 \text{ кА};$$

$$\text{– от генератора } I_{\bar{A}} = \frac{U_{\hat{O}\bar{A}}}{X_{22}} = \frac{237}{\sqrt{3} \cdot 1261,07} = 0,109 \text{ кА}.$$

При КЗ в точке К1 ток в месте КЗ, приведенный к ступени 220 кВ, будет:

$$I_{\hat{E}} = I_C + I_{\bar{A}} = 0,619 + 0,109 = 0,728 \text{ кВ}.$$

Токи в схеме показаны на рис. 3.5 и находятся при учете действительных коэффициентов трансформации следующим образом:

– ток в месте КЗ

$$I_{\hat{E}}(38,5) = 0,728 \cdot \frac{220}{38,5} = 4,16 \text{ кА};$$

– ток, посылаемый к месту КЗ генератором на сторонах 110 и 6,3 кВ

$$I_{\bar{A}}(110) = 0,109 \cdot \frac{220}{106,5} = 0,225 \text{ кА};$$

$$I_{\bar{A}}(6,3) = 0,109 \cdot \frac{220}{6,3} = 3,81 \text{ кА}.$$

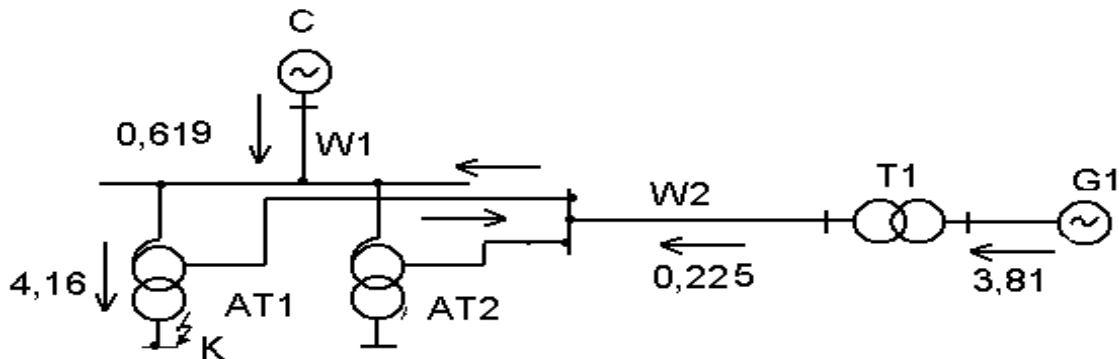


Рис. 3.5. Токораспределение в схеме

Домашнее задание № 2

Для следующих схем составить схему замещения и рассчитать параметры в именованных и относительных единицах (для точного и приближенного приведения).

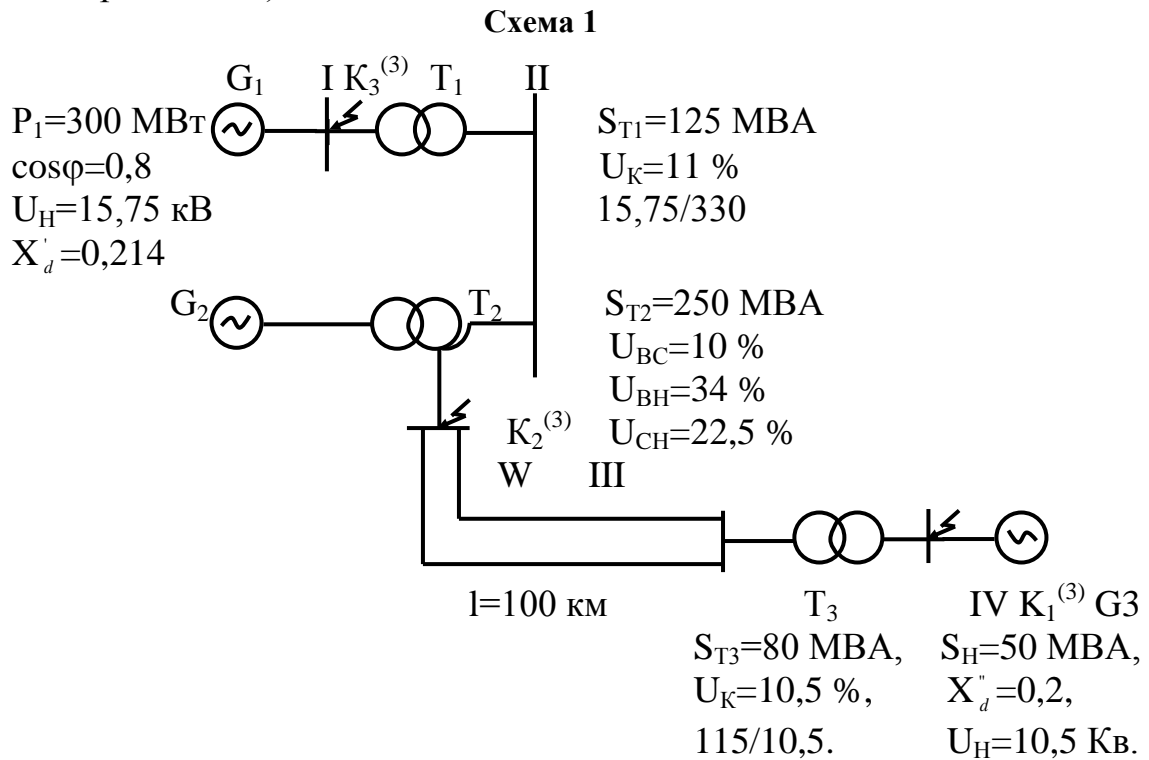


Таблица 2.2

Исходные данные для схемы 1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Точка КЗ	К1	К1	К1	К2	К2	К2	К3	К3	К3	К3
Основная ступень	IV	II	I	III	IV	I	IV	III	I	III

Схема 2

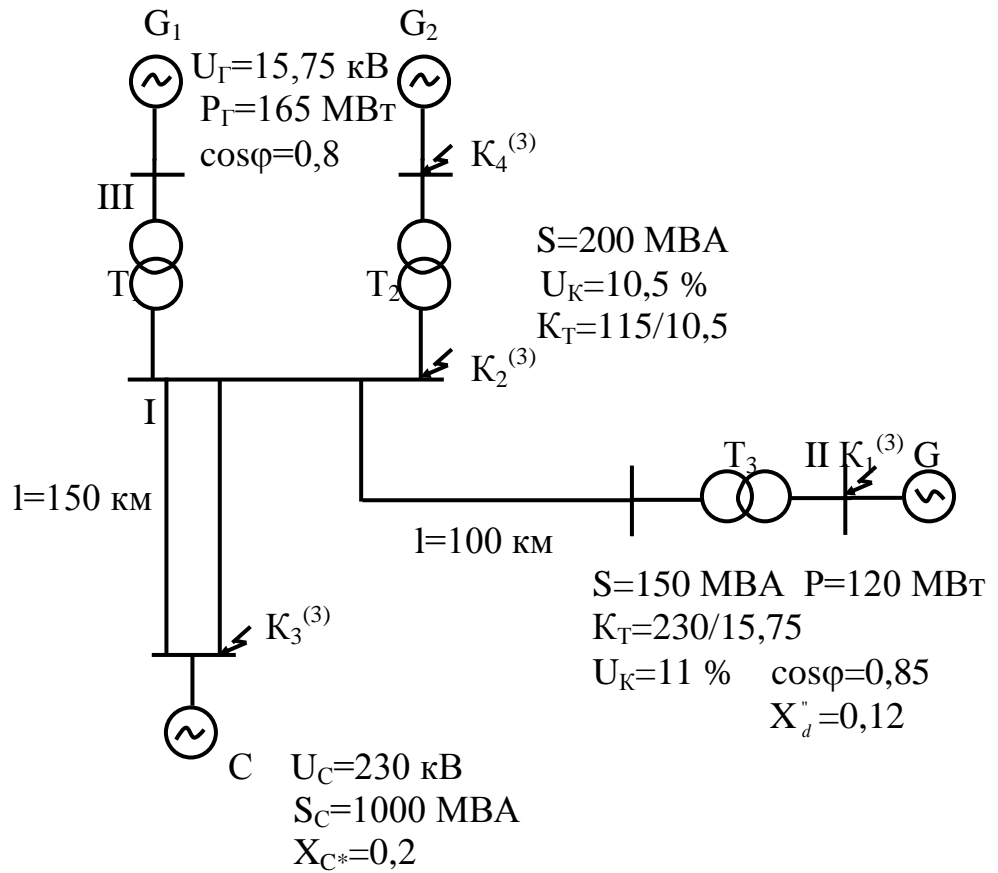


Таблица 2.3

Исходные данные для схемы 2

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Точка КЗ	K1	K1	K1	K2	K2	K2	K3	K4	K4	K3
Основная ступень	II	I	III	I	II	III	I	I	III	I

4. ПРИБЛИЖЕННОЕ ПРИВЕДЕНИЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ В ИМЕНОВАННЫХ ЕДИНИЦАХ

4.1. Общие положения

Приведение сопротивлений и ЭДС к одной ступени напряжения может быть выполнено точно с учетом действительных коэффициентов трансформации, указанных в паспортных данных, или приближенно с учетом коэффициентов трансформации, найденных как отношение средних номинальных напряжений $U_{\text{ср.н}}$ соответствующих ступеней трансформации. Шкала средних номинальных напряжений следующая: 340; 230; 115; 37; 24; 20; 18; 15,75; 13,8; 10,5; 6,3; 0,69; 0,525; 0,4; 0,23 кВ.

При приближенном приведении выражения для пересчета упрощаются:

$$\overset{0}{E} = \frac{U_{\text{ср.осн}}}{U_{\text{ср}}} \cdot E; \overset{0}{Z} = \left(\frac{U_{\text{ср.осн}}}{U_{\text{ср}}} \right)^2 \cdot Z, \overset{0}{I} = \frac{U_{\text{ср.н}}}{U_{\text{ср}}} \cdot I,$$

где $U_{\text{ср}}$ – среднее напряжение ступени, с которой производится пересчет; $U_{\text{ср.осн}}$ – то же, выбранной основной ступени.

Пример 4.1

Составить схему замещения для исходной схемы, приведенной на рис. 4.1, и определить начальные значения периодической составляющей токов на отдельных участках схемы при трехфазном КЗ в точке К1 при приближенном приведении в именованных единицах. При решении пренебречь активными сопротивлениями элементов и нагрузками.

Элементы схемы характеризуются следующими данными:

Система Гс $X_c = 16,2$ Ом; напряжение $U_c = 220$ кВ.

Автотрансформаторы АТ2 и АТ1: $S = 63$ МВ·А, 220/121±12 %/38,5 кВ,

$U_{\hat{a}\hat{n}} = 14,4/12,6/11,5$ %, $U_{\hat{c}\hat{i}} = 19,3/13,1/9,5$ %, $U_{\hat{a}\hat{i}} = 18,9$ %.

Гидрогенератор G1: $S = 57$ МВ·А, 6,3 кВ, $X''d = 0,282$.

Трансформатор Т1: $S = 63$ МВ·А, 115/6,3 кВ, $U_k = 10,5$ %.

ЛЭП: W1 длиной 100 км, W2 длиной 62 км, $X_0 = 0,4$ Ом/км.

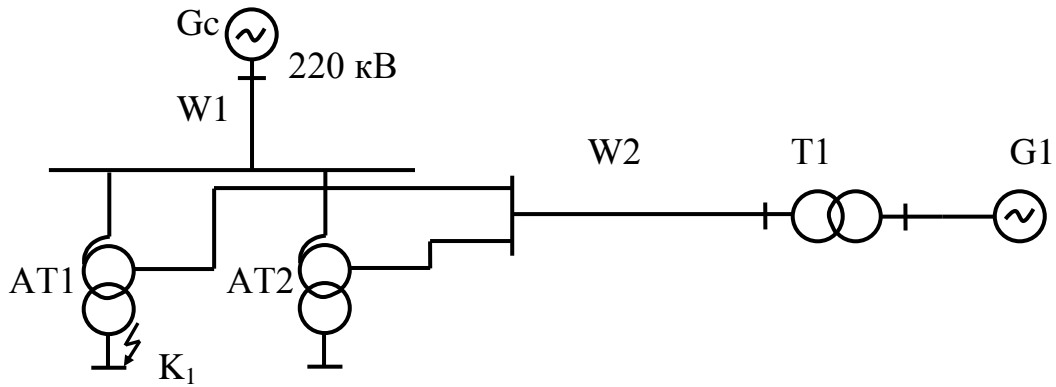


Рис. 4.1. Расчетная схема к примеру 4.1

Приближенное приведение в именованных единицах.
 Реактивные сопротивления AT1 и AT2:

$$\tilde{O}_3 = \tilde{O}_6 = 0,07 \cdot \frac{230^2}{63} = 58,78 \text{ Ом};$$

$$\tilde{O}_4 = \tilde{O}_7 = 0,074 \cdot \frac{230^2}{63} = 63,14 \text{ Ом};$$

$$\tilde{O}_5 = \tilde{O}_8 = 0,119 \cdot \frac{230^2}{63} = 99,92 \text{ Ом}.$$

Для системы 230 кВ: $X_1 = 16,2 \text{ Ом}; E_{c\phi} = \frac{230}{\sqrt{3}} \text{ кВ}.$

Реактивные сопротивления:

– линия W1 – $X_2 = 0,4 \cdot 100 = 40 \text{ Ом};$

– линия W2 – $X_9 = 0,4 \cdot 62 \cdot \frac{230^2}{115^2} = 99,2 \text{ Ом}.$

Трансформатора T1: $X_{10} = 0,105 \cdot \frac{115^2 \cdot 230^2}{63 \cdot 115^2} = 88,17 \text{ Ом}.$

Генератора G1: $X_{11} = 0,282 \cdot \frac{6,3^2 \cdot 115^2 \cdot 230^2}{57 \cdot 6,3^2 \cdot 115^2} = 261,72 \text{ Ом}.$

Фазная ЭДС генератора: $\dot{A}_{\tilde{A}\phi} = \frac{6,3 \cdot 115 \cdot 230}{\sqrt{3} \cdot 6,3 \cdot 115} = \frac{230}{\sqrt{3}} \text{ кВ}.$

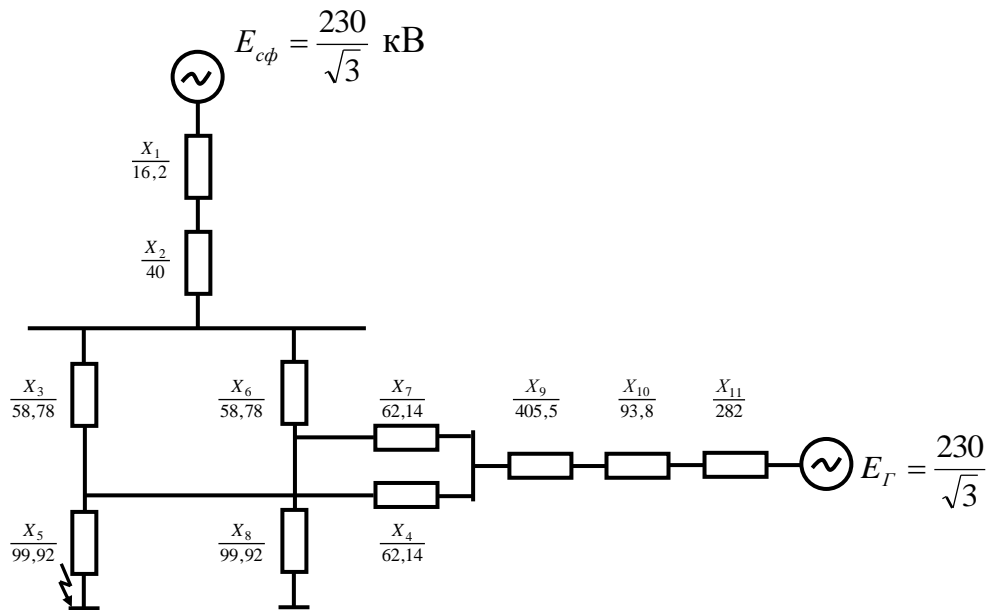


Рис. 4.2. Схема замещения (приближенное приведение)

Последовательным соединением сопротивлений схем получим:

$$X_{12} = X_1 + X_2 = 16,2 + 40 \text{ Ом};$$

$$X_{13} = X_9 + X_{10} + X_{11} = 99,2 + 88,17 + 261,72 = 449,09 \text{ Ом};$$

$$X_{14} = X_6 + X_7 = 58,78 + 62,14 = 120,92 \text{ Ом}.$$

Преобразуем треугольник с элементами X_3 , X_4 , X_{14} в эквивалентную звезду.

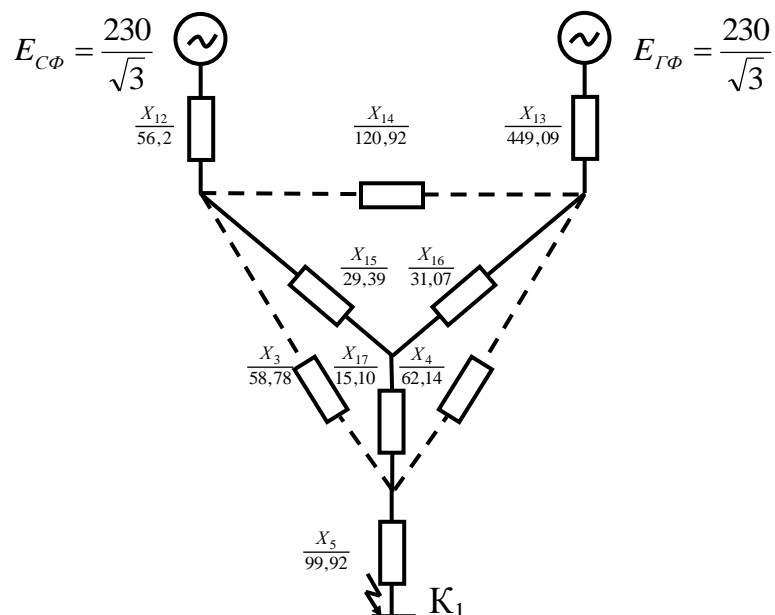


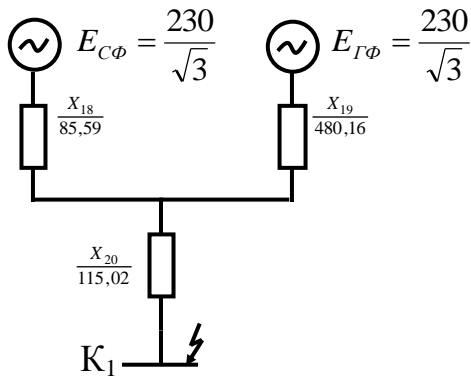
Рис. 4.3. Схема в результате преобразования

$$\tilde{O}_{15} = \frac{\tilde{O}_3 \cdot \tilde{O}_{14}}{\tilde{O}_3 + \tilde{O}_4 + \tilde{O}_{14}} = \frac{58,78 \cdot 120,92}{58,78 + 62,14 + 120,92} = 29,39 \text{ Ом};$$

$$\tilde{O}_{16} = \frac{\tilde{O}_4 \cdot \tilde{O}_{14}}{\tilde{O}_3 + \tilde{O}_4 + \tilde{O}_{14}} = \frac{62,14 \cdot 120,92}{58,78 + 62,14 + 120,92} = 31,07 \text{ Ом};$$

$$\tilde{O}_{17} = \frac{\tilde{O}_3 \cdot \tilde{O}_4}{\tilde{O}_3 + \tilde{O}_4 + \tilde{O}_{14}} = \frac{58,78 \cdot 62,14}{58,78 + 62,14 + 120,92} = 15,10 \text{ Ом}.$$

Упрощаем схему:

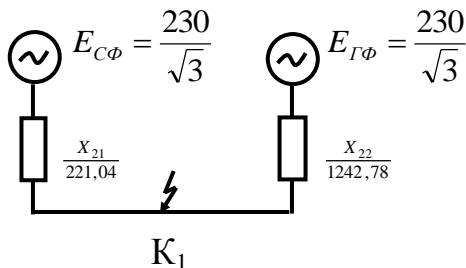


$$X_{18} = X_{12} + X_{15} = 56,2 + 29,39 = 85,59 \text{ Ом};$$

$$X_{19} = X_{13} + X_{16} = 449,16 + 31,07 = 480,16 \text{ Ом};$$

$$X_{20} = X_5 + X_{17} = 99,92 + 15,1 = 115,02 \text{ Ом}.$$

Используя коэффициенты распределения, получим схему:



$$X_{\text{экв}} = X_{18} \parallel X_{19} = \frac{85,59 \cdot 480,16}{85,59 + 480,16} = 72,64 \text{ Ом};$$

$$X_{PE3} = X_{\text{ЭКВ}} + X_{20} = 72,64 + 115,02 = 187,66 \text{ Ом};$$

$$C_1 = \frac{X_{\dot{Y}\dot{E}\dot{A}}}{X_{18}} = \frac{72,64}{85,59} = 0,849; \quad \tilde{N}_2 = \frac{X_{\dot{Y}\dot{E}\dot{A}}}{X_{19}} = \frac{72,64}{480,16} = 0,151;$$

$$X_{21} = \frac{X_{D\dot{A}C}}{C_1} = \frac{187,66}{0,849} = 221,04 \text{ Ом}; \quad X_{22} = \frac{X_{D\dot{A}C}}{C_2} = \frac{187,66}{0,151} = 1242,78 \text{ Ом}.$$

Токи КЗ:

$$\text{— от системы G}_C: I_C = \frac{U_{\dot{O}\dot{A}}}{X_{21}} = \frac{230}{\sqrt{3} \cdot 221,04} = 0,601 \text{ кА};$$

$$\text{— от генератора G}_1: I_{\dot{A}} = \frac{U_{\dot{O}\dot{A}}}{X_{22}} = \frac{230}{\sqrt{3} \cdot 1242,78} = 0,107 \text{ кА}.$$

При КЗ в точке K_1 ток в месте КЗ, приведенный к ступени 230 кВ и 6,3 кВ:

$$I_{\dot{E}} = I_C + I_{\dot{A}} = 0,601 + 0,107 = 0,708 \text{ кА}.$$

Ток в месте КЗ:

$$I_{K(37)} = 0,708 \cdot \frac{230}{37} = 4,4 \text{ кА.}$$

Ток, посылаемый к месту КЗ генератором на стороне 115 кВ и 6,3 кВ:

$$I_{Г(115)} = 0,107 \cdot \frac{230}{115} = 0,214 \text{ кА;}$$

$$I_{Г(6,3)} = 0,107 \cdot \frac{230}{6,3} = 3,907 \text{ кА.}$$

Домашнее задание № 3

Для схемы домашнего задания 2 определить ток КЗ при точном и приближенном приведении в именованных единицах.

5. СИСТЕМА ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЕДИНИЦ. ТОЧНОЕ И ПРИБЛИЖЕННОЕ ПРИВЕДЕНИЕ В ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЕДИНИЦАХ

5.1. Общие положения

ЭДС и сопротивления элементов схемы замещения могут быть выражены не только в именованных единицах, но и в относительных единицах. Для этого на основной ступени напряжения произвольно устанавливают так называемые базисные единицы (или условия), т. е. те величины, которые должны служить соответствующими единицами измерения. Обычно задаются базисной мощностью S_B (которая на всех ступенях трансформации одинакова) и напряжением $U_{B.осн}$. Две другие базисные величины определяют из выражений:

$$I_{A.ин} = \frac{S_A}{\sqrt{3} \cdot U_A}; \quad Z_B = \frac{U_B}{\sqrt{3} \cdot I_B} = \frac{U_B^2}{S_B}.$$

Базисные единицы измерения на других ступенях напряжения связаны с базисными единицами основной ступени через коэффициенты трансформации.

$$\dot{U}_B = U_{B.осн} \cdot \frac{1}{K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_H}; \quad \dot{I}_B = I_{B.осн} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_H,$$

или

$$\dot{I}_A = \frac{S_A}{\sqrt{3} \cdot U_A}.$$

Любые величины, входящие в расчет и заданные в именованных единицах, переводятся в относительные базисные единицы следующим образом:

$$E_{*(A)} = \frac{E}{U_A}; \quad I_{*(B)} = \frac{I}{I_B}; \quad S_{*(B)} = \frac{S}{S_B};$$

$$Z_{*(B)} = \frac{Z}{Z_B} = Z \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot I_B}{U_B} = Z \cdot \frac{S_B}{U_B^2},$$

где U, I, Z, S – значение величины в именованных единицах (кВ, кА, Ом, МВА) на расчетной ступени напряжения; U_B, I_B, Z_B, S_B – базисные единицы на той же ступени напряжения.

Здесь звездочка (*) указывает, что величина выражена в относительных единицах, а индекс (Б) – что эта величина отнесена к базисным единицам измерений.

Если величины заданы в относительных единицах при номинальных условиях, то их пересчет к базисным условиям производится по следующим соотношениям:

$$E_{*(Б)} = E_{*(Н)} \cdot \frac{U_H}{U_B};$$

$$Z_{*(Б)} = Z_{*(Н)} \cdot \frac{I_B}{I_H} \cdot \frac{U_H}{U_B}$$

или

$$Z_{*(Б)} = Z_{*(Н)} \cdot \frac{S_B}{S_H} \cdot \frac{U_H^2}{U_B^2}.$$

В приближенных расчетах полагают, что номинальное напряжение всех элементов одной ступени напряжения одинаково и равно среднему номинальному напряжению, в соответствии с приведенной шкалой, и принимают $U_B = U_{ср.н.}$ Тогда расчетные выражения имеют более простой вид:

$$E_{*(Б)} = E_{*(Н)};$$

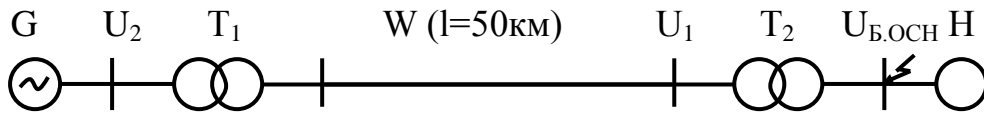
$$Z_{*(Б)} = Z_{*(Н)} \cdot \frac{S_B}{S_H} \cdot \frac{U_H^2}{U_B^2}.$$

Следует подчеркнуть, что в каждой приведенной выше формуле под U_B , I_B всегда понимают базисные напряжения и ток той ступени трансформации, где находятся элементы, параметры которых определяются в относительных базисных единицах. После выполнения расчетов в относительных базисных единицах действующие значения напряжений, токов, мощностей в именованных единицах находят по формулам обратного пересчета:

$$U = U_{*(Б)} \cdot U_B; I = I_{*(Б)} \cdot I_B; S = S_{*(Б)} \cdot S_B.$$

Точность расчета не зависит от того, в какой системе единиц выражают величины.

Задача 5.1



$S_G = 38,5 \text{ МВ} \cdot \text{А}$	$S_H = 40 \text{ МВ} \cdot \text{А}$	$S_H = 6,3 \text{ МВ} \cdot \text{А}$	$S_H = 5 \text{ МВ} \cdot \text{А}$
$U_H = 10,5 \text{ кВ}$	$10,5/121 \text{ кВ}$	$110/6,6 \text{ кВ}$	$X_H''_* = 0,35$
$X_d''_* = 0,2$	$U_K = 10,5 \%$	$U_K = 10,5 \%$	$E_H''_* = 0,85$
$\cos \varphi_0 = 0,8$			
$E_G'' = 11,8 \text{ кВ}$			

1. Решение в относительных единицах, приближенное приведение

При приближенном приведении базисное напряжение на основной ступени принимают равным среднему напряжению в соответствии с рекомендуемой шкалой, и автоматически получают базисные напряжения на других ступенях, которые равны средним напряжениям.

$U_{\text{Б.ОСН}} = 6,3 \text{ кВ}$, $U_{\text{Б.I}} = 115 \text{ кВ}$, $U_{\text{Б.II}} = 10,5 \text{ кВ}$, $S_{\text{Б}} = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, получаем базисные токи:

$$I_{\text{А.III}} = \frac{S_{\text{А}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{А.III}}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 9,175 \text{ кА};$$

$$I_{\text{А.I}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,503 \text{ кА};$$

$$I_{\text{А.II}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 5,605 \text{ кА}.$$

Сопротивление элементов схемы:

$$G: X_{\tilde{A}^*(\text{А})} = X_d''_* \cdot \frac{S_{\text{А}}}{S_f} = 0,2 \cdot \frac{100}{38,5} = 0,519;$$

$$\dot{O}: X_{\dot{O}^*(\text{А})} = \frac{U_{\dot{E}} \%}{100} \cdot \frac{S_{\text{А}}}{S_f} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{40} = 0,263;$$

$$W: X_{\ddot{E}^*(\text{А})} = X_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\text{А}}}{U_{\text{А.I}}^2} = 0,4 \cdot 50 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,151;$$

$$\dot{O}2: X_{\dot{O}2(A)} = \frac{U_{\dot{E}} \% \cdot S_A}{100 \cdot S_f} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{6,3} = 1,66;$$

$$\dot{I} : X_{\dot{I}*(A)} = X_{\dot{I}''*(A)} \cdot \frac{S_A}{S_f} = 0,35 \cdot \frac{100}{5} = 7;$$

$$\dot{Y}\ddot{A}\ddot{N} : \dot{A}_{\ddot{A}''*(A)} = \frac{\dot{A}_{\ddot{A}''}}{U_{\ddot{A}}} = \frac{11,8}{10,5} = 1,12;$$

$$\dot{A}_{\dot{I}''*(A)} = 0,85;$$

$$I_{\ddot{A}''*} = \frac{\dot{A}_{\ddot{A}''*(A)}}{X_{\ddot{A}''*(A)}} = \frac{1,12}{2,593} = 0,432 = 3,96 \hat{A};$$

$$I_{\dot{I}''*} = \frac{\dot{A}_{\dot{I}''*(A)}}{X_{\dot{I}''*(A)}} = \frac{0,85}{7} = 0,12 = 1,1 \hat{A};$$

$$I_c'' = (0,432 + 0,12) \cdot I_{\dot{A}\dot{I}\ddot{N}} = 5,06 \hat{A}.$$

2. Решение в относительных единицах. Приведение точное

$$U_{B.OCH} = 6,3 \text{ кВ}, S_B = 100 \text{ МВА};$$

$$I_{\dot{A}\dot{I}\ddot{N}} = \frac{S_A}{\sqrt{3} \cdot U_{\dot{A}\dot{I}\ddot{N}}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 9,175 \hat{A}.$$

Тогда базисные единицы измерения на II и I ступенях напряжениях будут:

$$U_{\dot{A}.I} = U_{\dot{A}\dot{I}\ddot{N}} \cdot \frac{1}{\dot{E}_{\dot{O}}} = 6,3 \cdot \frac{1}{6,6} = 6,3 \cdot \frac{110}{6,6} = 105 \hat{A};$$

$$I_{\dot{A}.I} = \frac{S_A}{\sqrt{3} \cdot U_{\dot{A}.I}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 105} = 0,55 \hat{A};$$

$$U_{\dot{A}.II} = U_{\dot{A}\dot{I}\ddot{N}} \cdot \frac{1}{\hat{E}_1 \cdot K_2} = 6,3 \cdot \frac{110}{6,6} \cdot \frac{10,5}{121} = 9,11 \hat{A};$$

$$I_{\dot{A}.II} = \frac{S_A}{\sqrt{3} \cdot U_{\dot{A}.II}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 9,11} = 6,34 \hat{A}.$$

Сопротивление элементов схемы замещения:

$$G : X_{\tilde{A}^*} = X_{d''} \cdot \frac{S_{\tilde{A}}}{S_I} \cdot \frac{U_I^2}{U_{\tilde{A}.II}^2} = 0,2 \cdot \frac{100}{38,5} \cdot \frac{10,5^2}{9,11^2} = 0,69;$$

$$\dot{O}1 : X_{\dot{O}1^*} = \frac{U_{\tilde{E}} \%}{100} \cdot \frac{S_{\tilde{A}}}{S_I} \cdot \frac{U_{i\hat{a}}^2}{U_{\tilde{A}.I}^2} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{40} \cdot \frac{121^2}{105^2} = 0,349;$$

$$W : X_{\tilde{E}^*} = X_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\tilde{A}}}{U_{\tilde{A}.I}^2} = 0,4 \cdot 50 \cdot \frac{100}{105^2} = 0,181;$$

$$\dot{O}2 : X_{\dot{O}2^*} = \frac{U_{\tilde{E}} \%}{100} \cdot \frac{S_{\tilde{A}}}{S_I} \cdot \frac{U_{i\hat{u}}^2}{U_{\tilde{A}.I\tilde{N}I}^2} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{6,3} \cdot \frac{6,6^2}{6,3^2} = 1,829;$$

$$\dot{I} : X_{\dot{I}^*} = X_{i''}^{*(\tilde{A})} \cdot \frac{S_{\tilde{A}}}{S_I} \cdot \frac{U_{i\hat{u}}^2}{U_{\tilde{A}.I\tilde{N}I}^2} = 0,35 \cdot \frac{100}{5} \cdot \frac{6,6^2}{6,3^2} = 7,68;$$

$$\dot{Y}\tilde{A}\tilde{N} : \tilde{A} : \tilde{A}_{\tilde{A}^*}^{*(\tilde{A})} = E_{*(\dot{I})}'' \cdot \frac{U_I}{U_{\tilde{A}.II}} = 1,12 \cdot \frac{10,5}{9,11} = 1,29;$$

$$\dot{I} : \tilde{A}_{\tilde{A}^*}^{*(\tilde{A})} = \tilde{A}_{\tilde{A}^*}'' \cdot \frac{U_{\tilde{N}\tilde{D}.I\tilde{N}I}}{U_{\tilde{A}.I}} = 0,85 \cdot \frac{6,6}{6,3} = 0,85.$$

Однородные коэффициенты :

$$I_{\tilde{A}^*}'' = \frac{\tilde{A}_{\tilde{A}^*}''}{X_{\tilde{A}^*}} = \frac{1,29}{3,049} = 0,423; \quad I_{\tilde{A}}'' = 0,423 \cdot 9,175 = 3,88 \text{ \u00c2A}.$$

Однородные коэффициенты :

$$I_{\dot{I}^*}'' = \frac{\tilde{A}_{\dot{I}^*}''}{X_{\dot{I}^*}} = \frac{0,85}{7,68} = 0,11;$$

$$I_{\dot{I}}'' = 0,11 \cdot 9,175 = 1,02 \text{ \u00c2A}.$$

Домашнее задание № 4

Для схемы домашнего задания 1 определить ток КЗ при точном и приближенном приведении в относительных единицах. Результаты расчетов по домашним заданиям 3 и 4 свести в таблицу и сравнить результаты расчетов.

6. НАЧАЛЬНЫЙ МОМЕНТ ТРЁХФАЗНОГО КЗ. РАСЧЁТ СВЕРХПЕРЕХОДНОГО И УДАРНОГО ТОКА. ВЛИЯНИЕ И УЧЁТ НАГРУЗКИ ПРИ КЗ

6.1. Общие положения

Для начального момента времени синхронный генератор характеризуется сверхпереходным сопротивлением по продольной оси $\tilde{O}d''_*$ и сверхпереходной ЭДС $\hat{A}d''$. На рис. 6.1 приведена упрощенная схема замещения и векторная диаграмма синхронного генератора.

$$Xd'' = \frac{Xd''_{H*} \cdot U_H^2}{S_H}, \text{ Ом.}$$

Величина ЭДС $\hat{A}''d$ зависит от предшествующего режима (от нагрузки генератора и напряжения на зажимах).

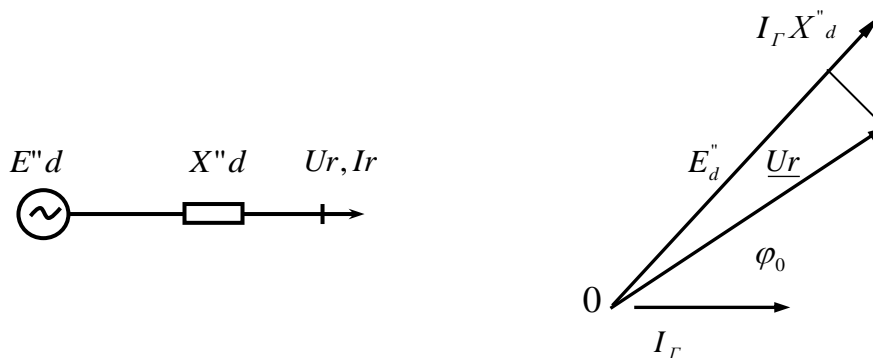


Рис. 6.1. Упрощенная схема замещения и векторная диаграмма синхронного генератора

Пусть генератор имеет до момента КЗ напряжение \underline{U}_r и нагрузку \underline{I}_r , представленные на векторной диаграмме (рис. 5.1). Тогда ЭДС генератора в начальный момент КЗ:

$$E''d = \sqrt{(U_r \cdot \cos \varphi_{\hat{A}})^2 + (U_r \cdot \sin \varphi_{\hat{A}} + \sqrt{3} \cdot I_r \cdot X''d)^2}.$$

Так как $\hat{I}\hat{A} \approx U_r$, то в относительных единицах

$$Ed''_* \approx U_{r*} + I_{r*} \cdot Xd''_* \cdot \sin \varphi_{\hat{A}},$$

в именованных единицах

$$Ed'' \approx U_i + \sqrt{3} \cdot I_r \cdot \sin \varphi_{\hat{A}}.$$

Если предшествующий режим неизвестен, то значение ЭДС можно определить при номинальных условиях, т. е.

$$E_d'' = \sqrt{(U_i \cdot \cos \varphi_i)^2 + (U_i \cdot \sin \varphi_H + \sqrt{3} \cdot I_i \cdot X_d'')^2} \approx \\ \approx U_i + \sqrt{3} \cdot I_i \cdot X_d'' \cdot \sin \varphi_i .$$

Начальное значение сверхпереходного тока в месте КЗ:

$$I''_{H*} = \frac{E''_{c*}}{X''_{c*}} ,$$

где E''_{c*} , X''_{c*} – соответственно, эквивалентные ЭДС и сопротивления по отношению к точке КЗ.

При определении ударного тока КЗ учитывается затухание лишь апериодической составляющей тока, считая, что амплитуда сверхпереходного тока за полпериода сохранит своё начальное значение.

Ударный ток КЗ, определяемый для наиболее тяжёлых условий:

$$i_{\sigma} = \hat{\epsilon}_{\sigma} \cdot \sqrt{2} \cdot I''_i ,$$

где κ_{ν} – ударный коэффициент, показывающий во сколько раз ударный ток КЗ больше начальной амплитуды периодической составляющей тока КЗ.

При КЗ в установках выше 1000 В, как правило, ударный коэффициент принимают равным 1,8, что соответствует постоянной времени $T_A = 0,045$ с. В этом случае ударный ток КЗ $i_{\sigma} = 2,55 \cdot I''$.

По величине ударного тока проверяют работоспособность аппаратуры станций и подстанций при КЗ (проверка на динамическую стойкость).

6.2. Влияние и учёт нагрузки при КЗ

К ЭЭС подключаются нагрузки в виде сосредоточенных групп различных потребителей (обобщённая, комплексная нагрузка), а также в виде отдельных мощных синхронных и асинхронных двигателей, синхронных компенсаторов, конденсаторов для компенсации реактивной мощности и т. п.

Нагрузка может существенно повлиять на величину тока КЗ, а также на распределение его в схеме. Определяя предшествующий режим работы генераторов и, следовательно, их ЭДС, нагрузки таким образом косвенно сказываются на величине тока КЗ. Кроме того, в сверхпереходном режиме КЗ нагрузки могут самостоятельно выступать в роли дополнительных источников питания точки КЗ.

6.3. Учёт асинхронной нагрузки в начальный момент времени КЗ

При КЗ вблизи места присоединения нагрузки возможно генерирование двигателями тока (в первый момент КЗ) в следствие преобразования запасённой в них магнитной и механической энергии. Поэтому асинхронный двигатель можно рассматривать как генератор с ЭДС $E''_H = E''_o$, определяемой предшествующим режимом работы:

$$E''_f = E''_o = \sqrt{(U_0 \cdot \cos \varphi_0)^2 + (U_0 \cdot \sin \varphi_0 - I_0 \cdot X''_H)^2} \approx U_0 - \sin \varphi_0 \cdot I_0 \cdot X''_H,$$

где U_0 , I_0 , φ_0 – напряжение, ток и угол между ними в предшествующем режиме (рис. 6.2).

Значение E''_H в относительных единицах при $\cos \varphi_0 = 0,8$ равно $E''_H = I - X''_H \cdot 0,6$.

Сверхпереходное индуктивное сопротивление асинхронных двигателей определяется из условия:

$$X''^* g_0 = \frac{U^*}{I^*_{ПУСК}} = \frac{U_H \cdot I_H}{U_H \cdot I_{ПУСК}} \approx \frac{1}{S} \approx 0,2.$$

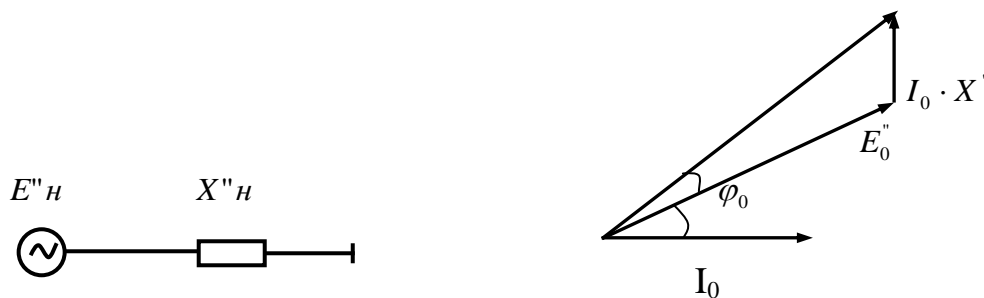


Рис. 6.2. Схема замещения и векторная диаграмма двигательной нагрузки в начальный момент КЗ

6.4. Учёт синхронной двигательной нагрузки в начальный момент КЗ

Влияние синхронных двигателей в значительной мере определяется их возбуждением. Если синхронный двигатель работает в режиме перевозбуждения, то ЭДС двигателя E''_D больше остаточного напряжения на шинах U_0 в месте подключения и он подпитывает точку КЗ. Если же синхронный двигатель работает в режиме перевозбуждения, то возможен режим, когда $E''_D \leq U_0$. В этом случае двигатель будет потреблять ток из сети.

При определении токов в начальный момент КЗ, если отсутствуют сверхпереходные параметры синхронного двигателя, можно использовать средние значения

$$E_{D*}'' = 1,1 \quad X_{D*}'' = 0,2.$$

Для синхронного компенсатора

$$E_{D*}'' = 1,2 \quad X_{D*}'' = 0,2.$$

В практических расчётах начального сверхпереходного тока КЗ учитывают отдельно лишь крупные двигатели, расположенные вблизи точки КЗ, остальная нагрузка учитывается как обобщённая с параметрами $E_{H*}'' = 0,85$ и $X_{H*}'' = 0,35$, считая их выраженными в относительных номинальных единицах при полной рабочей мощности в мВА нагрузки и среднем номинальном напряжении в кВ той ступени, где она подключена.

Ударный ток в месте КЗ при отдельном учёте двигателей и обобщённой нагрузки:

$$i_Y = \kappa_Y \cdot \sqrt{2} \cdot I'' + K_{YD} \cdot \sqrt{2} \cdot I_D'' + \sqrt{2} \cdot I_{OH}'',$$

где I'' , I_D'' , I_{OH}'' – значения начального сверхпереходного тока от генераторов, двигателей, обобщённой нагрузки; K_{YD} – ударный коэффициент для двигателей.

При определении токов в распределительных кабельных сетях целесообразно учитывать активное сопротивление кабелей. Вследствие этого апериодическая составляющая тока переходного процесса затухает более интенсивно и ударный коэффициент K_{YD} определяется по кривой.

6.5. Учёт системы при расчётах токов КЗ

Электрическая система характеризуется параметрами: мощностью КЗ S_{KC} , МВ·А и реактивным сопротивлением X_C . Параметры, которыми система вводится в расчёт, зависят от её мощности и удалённости от места КЗ. Если её мощность велика по сравнению с другими генераторами, вводимыми в расчёт, то система вводится в расчёт источником ЭДС бесконечной мощности:

$$U_{C*} = I = const, \quad X_C = 0, \quad S_{KC} = \infty, \quad R_C = 0.$$

Если КЗ рассматривается вблизи от шин системы или её мощность соизмерима с мощностями других генераторов, вводимых в расчётную

схему, то система вводится в расчёт источником ЭДС конечной мощности:
 $U_{C*} = I, X_C \neq 0$.

Сопротивление системы X_C в этом случае определяется по её току КЗ
 I_{CK} :

$$X_C = \frac{U_{HC}}{\sqrt{3} \cdot I_{CK}}, \text{ Ом.}$$

Иногда вместо I_{CK} задана мощность КЗ равная $S_{K3} = \sqrt{3} \cdot U_{HC} \cdot I_{CK}$,
 МВА, то в этом случае

$$X_C = \frac{U_{HC} \cdot I_C}{\sqrt{3} \cdot I_{CK} \cdot U_{HC}} = \frac{U_{HC}^2}{S_{KC}}, \text{ Ом.}$$

Таблица 6.1

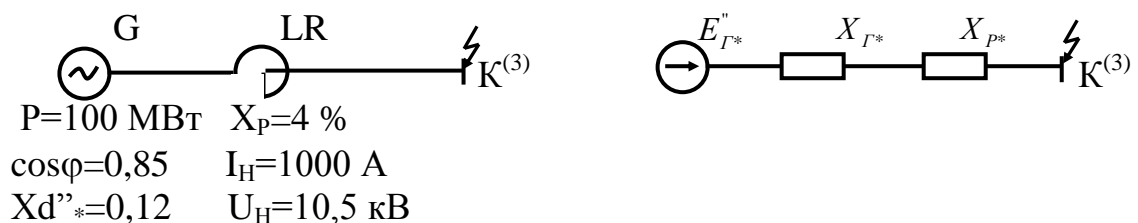
Примерные значения параметров синхронных машин

Наименование	Турбогенераторы (двухполюсные)	Генераторы и двигатели явнополюсные с демпферными обмотками	Генераторы и двигатели явнополюсные без демпферных обмоток	Синхронные компенсаторы
E''	1,08	1,13	1,18	1,2
X_d''	0,21 _(0,13...0,35)	0,24 _(0,13...0,35)	0,35 _(0,2...0,45)	0,25 _(0,18...0,38)
X_d'	0,32 _(0,236...0,421)	0,37 _(0,2...0,5)	0,35 _(0,2...0,45)	0,4 _(0,25...0,4)
X_q''	0,22 _(0,192...0,286)	0,75 _(0,4...1,0)	0,75 _(0,4...1,0)	1,25 _(0,7...1,5)
X_2	0,26 _(0,18...0,349)	0,24 _(0,13...0,35)	0,55 _(0,3...0,7)	0,24
X_0	0,11 _(0,077...0,16)	0,02...0,2	0,04...0,25	0,24 _(0,02...0,15)

Примечание. X_d'' , X_d' , X_q'' , X_2 , X_0 – реактивности в относительных единицах.

Пример 6.1

Определить сверхпереходный и ударный ток трёхфазного КЗ в точке К.



1. Базисные условия: $S_B=100 \text{ МВА}$, $U_B=10,5 \text{ кВ}$, $I_A = \frac{S_A}{\sqrt{3} \cdot U_A} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 5,5 \text{ кА}$.

2. Сверхпереходная ЭДС:

$$E_*'' = U_* + I_* \cdot X_d'' \cdot \sin \varphi = 1 + 0,8 \cdot 0,12 \cdot 0,53 = 1,05.$$

3. Сопротивление элементов схемы замещения:

$$\tilde{O}_{\tilde{A}^*} = \tilde{O}_{d_*''} \cdot \frac{S_{\tilde{A}}}{S_I} = 0,12 \cdot \frac{100 \cdot 0,85}{100} = 0,102;$$

$$\tilde{O}_{D^*} = \frac{\tilde{O}_D \%}{100} \cdot \frac{I_{\tilde{A}}}{I_f} = 0,04 \cdot \frac{5,5}{1,0} = 0,22;$$

$$\tilde{O}_{\Sigma^*} = \tilde{O}_{\tilde{A}^*} + \tilde{O}_{D^*} = 0,102 + 0,22 = 0,322.$$

4. Сверхпереходный ток:

$$I_*'' = \frac{E_*''}{X_{\Sigma^*}} = \frac{1,05}{0,322} = 3,26;$$

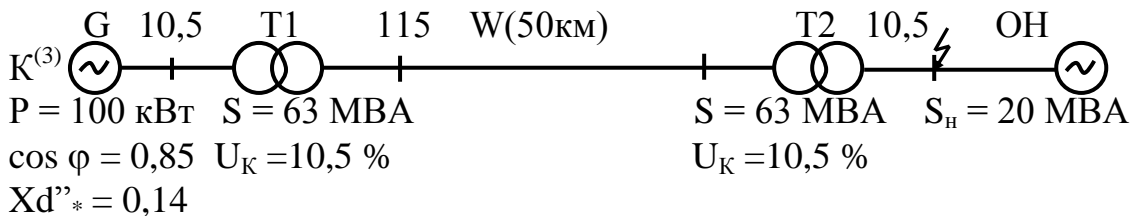
$$I'' = I_*'' \cdot I_{\tilde{A}} = 3,26 \cdot 5,5 = 17,9 \text{ êÀ}.$$

5. Ударный ток:

$$i_{\sigma} = 2,55 \cdot I'' = 2,55 \cdot 17,9 = 45,6 \text{ êÀ}.$$

Пример 6.2

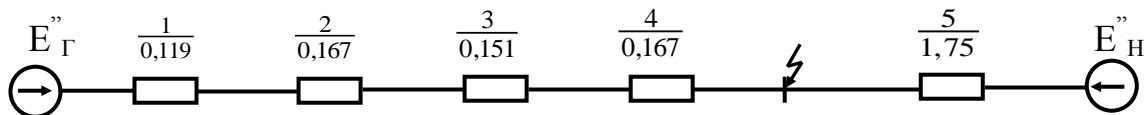
Определить сверхпереходный и ударный ток трёхфазного КЗ в точке К.



1. Базисные условия:

$$S_{\tilde{A}} = 100 \text{ êÀ}^2, \quad U_{\tilde{A}} = 10,5 \text{ êÀ}, \quad I_{\tilde{A}} = \frac{S_{\tilde{A}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\tilde{A}}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 5,5 \text{ êÀ}.$$

2. Схема замещения и её параметры:



$$X_1 = X_{d_*''} \cdot \frac{S_B}{S_H} = 0,14 \cdot \frac{100 \cdot 0,85}{100} = 0,119;$$

$$X_2 = \frac{U_K \%}{100} \cdot \frac{S_B}{S_H} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{63} = 0,167;$$

$$X_3 = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_B}{U_B^2} = 0,4 \cdot 50 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,151;$$

$$X_4 = \frac{U_K \%}{100} \cdot \frac{S_B}{S_H} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{63} = 0,167;$$

$$X_5 = X_{oh*}'' \cdot \frac{S_B}{S_H} = 0,35 \cdot \frac{100}{20} = 1,75;$$

$$X_6 = X_1 + X_2 + X_3 + X_4 = 0,119 + 0,167 + 0,151 + 0,167 = 0,604.$$

3. Сверхпереходная ЭДС генератора:

$$\dot{A}_*'' = U_* + I_{f*} \cdot X_{d*}'' \cdot \sin \varphi = 1 + 0,8 \cdot 0,14 \cdot 0,53 = 1,06.$$

4. Сверхпереходный и ударный ток от генератора:

$$I_*'' = \frac{E_*''}{X_{\dot{N}\dot{O}\dot{I}}_*} = \frac{1,06}{0,604} = 1,76;$$

$$I'' = I_*'' \cdot I_{\dot{A}} = 1,76 \cdot 5,5 = 9,65 \hat{=} \text{À};$$

$$i_{\dot{O}} = 2,55 \cdot I'' = 2,55 \cdot 9,65 = 24,6 \hat{=} \text{À}.$$

5. Сверхпереходный и ударный токи от нагрузки:

$$I_*'' = \frac{E_{I_*}''}{X_{I_*}} = \frac{0,85}{1,75} = 0,486;$$

$$I'' = I_*'' \cdot I_{\dot{A}} = 0,486 \cdot 5,5 = 2,67 \hat{=} \text{À};$$

$$i_{\dot{O}} = \sqrt{2} \cdot I'' = \sqrt{2} \cdot 2,67 = 3,77 \hat{=} \text{À}.$$

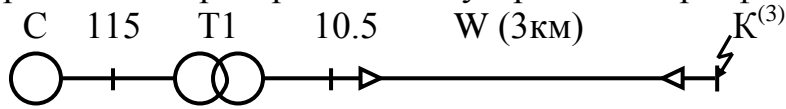
6. Сверхпереходный и ударный ток в точке КЗ:

$$I_{\dot{I}}'' = I_{\dot{A}}'' + I_{\dot{I}}'' = 9,65 + 2,67 = 12,32 \hat{=} \text{À}$$

$$i_{\dot{O}\dot{A}} = i_{\dot{O}\dot{A}} + i_{\dot{O}\dot{A}} = 24,5 + 3,77 = 28,27 \hat{=} \text{À}.$$

Пример 6.3

Определить сверхпереходный и ударный ток трёхфазного КЗ в точке К



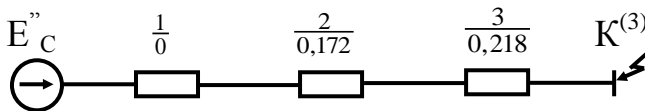
$$S_C = \infty \quad \text{ТРДЦН} - 63 \text{ МВА} \quad q = (3 \times 300) \text{ мм}^2$$

$$X_C'' = 0 \quad U_K = 10,8 \%$$

1. Базисные условия:

$$S_A = 100 \hat{\text{А}}\hat{\text{А}} \quad , \quad U_A = 10,5 \hat{\text{А}}\hat{\text{А}}, \quad I_A = \frac{S_A}{\sqrt{3} \cdot U_A} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 5,5 \hat{\text{А}}.$$

2. Схема замещения и её параметры:



$$X_1 = 0;$$

$$X_2 = \frac{U_K \%}{100} \cdot \frac{S_B}{S_H} = \frac{10,8}{100} \cdot \frac{100}{63} = 0,172;$$

$$X_3 = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_B}{U_B^2} = 0,08 \cdot 3 \cdot \frac{100}{10,6^2} = 0,218;$$

$$R_3 = \frac{l}{\gamma \cdot q} = \frac{3000}{53 \cdot 300} = 0,19 \hat{\Omega} \quad ; \quad R_{3*} = R_3 \cdot \frac{S_B}{U_B^2} = 0,19 \cdot \frac{100}{10,5^2} = 0,172;$$

$$Z_{\Sigma} = \sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_{*\Sigma}^2} = \sqrt{0,172^2 + 0,39^2} = 0,427.$$

3. Периодическая составляющая тока КЗ

$$I_E'' = \frac{E_C''}{Z_{*\Sigma}} \cdot I_A = \frac{1}{0,427} \cdot 5,5 = 12,9 \hat{\text{А}}.$$

Для системы бесконечной мощности $E_C'' = 1$.

4. Ударный ток:

$$\hat{I}_a = \frac{0,39}{314 \cdot 0,172} = 0,0072, \quad \hat{e}_o = 1,25, \quad i_o = \sqrt{2} \cdot \hat{e}_o \cdot I_f'' = 22,8 \hat{\text{А}}.$$

7. РАСЧЁТ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА КЗ

7.1. Параметры генератора в установившемся режиме

Установившимся режимом называют такую стадию переходного процесса, при которой все возникшие в начальный момент КЗ свободные токи в синхронной машине затухли и изменение напряжения на её зажимах под действием АРВ прекращено. Обычно считают, что этот режим наступает через 3-5 с после возникновения КЗ. При этом предполагается, что скорость вращения машины остаётся неизменной (синхронной). Такое представление установившегося режима является условным, так как такой режим в современной ЭЭС фактически не имеет места благодаря наличию быстродействующих релейных защит.

В настоящее время этот режим не является характерным, однако знакомство с ними очень полезно, так как здесь можно получить в наглядной форме ряд практически важных представлений и соотношений. Поэтому необходимо определить ток КЗ для этого режима.

Параметры короткозамкнутой цепи при установившемся режиме можно определить на основании характеристик холостого хода (ХХХ) и КЗ синхронной машины, её синхронных сопротивлений x_d в продольной и x_q в поперечной осях, сопротивления рассеяния статора x_σ и предельного тока возбуждения I_{*fnp} .

1. ХХХ синхронной машины (рис. 7.1) представляет собой зависимость $E_* = \varphi(I_{*f})$. Она построена в ОЕ, причём за единицу ЭДС принято номинальное напряжение синхронной машины при холостом ходе, то есть $U_{*n} = 1$, а за единицу тока возбуждения принят ток возбуждения, при котором напряжение синхронной машины на холостом ходе равно номинальному.

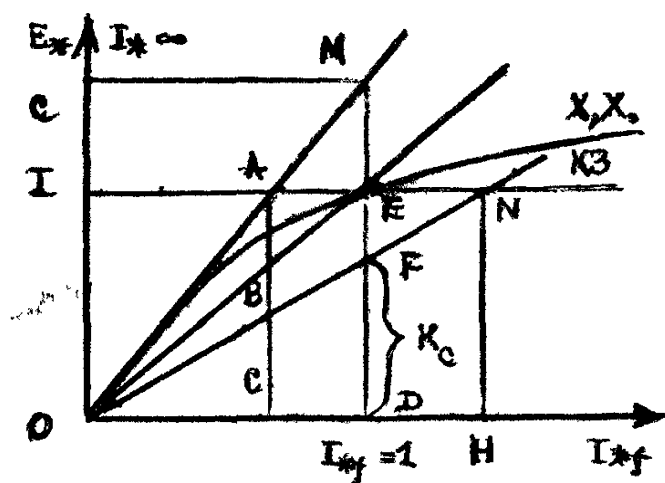


Рис. 7.1. Характеристики холостого хода и короткого замыкания генератора

Для ненасыщенной машины связь между ЭДС E_* и током возбуждения прямолинейная и выражается зависимостью (рис. 7.1).

$$E_* = cI_{*f}; \quad \tilde{n} = \frac{\dot{I}\ddot{A}}{\ddot{A}\ddot{A}}, \quad (7.1)$$

где c – коэффициент пропорциональности, численно равный ЭДС в ОЕ ненасыщенной машины при токе возбуждения равном единице.

Средние значения c для ТГ – 1,2, а для ГГ – 1,06.

2. Вместо x_d может быть задано отношение короткого замыкания k_c , которое представляет собой относительный установившийся ток КЗ $I_{*\infty}$, когда машина замкнута накоротко на выводах, а ток возбуждения равен единице. Величина k_c определяет ординату второй точки F, через которую проходит прямая OF, представляющая характеристику КЗ машины (рис. 7.1):

$$k_c = \frac{I_{*\infty}}{I_{*f}} (I_{*f} = 1). \quad (7.2)$$

Среднее значение k_c для ТГ = 0,7, для ГГ – 1,1.

Связь между k_c и x_d вытекает из условия КЗ на зажимах машины, а также из подобия $\triangle OBC$ и $\triangle ONH$, т. е.

$$x_d = \frac{c}{k_c}. \quad (7.3)$$

Реактивность x_d складывается из сопротивления рассеяния фазы статора x_σ и сопротивления продольной реакции статора x_{ad} . Учитывая небольшое насыщение машины и приближённость расчёта установившегося режима КЗ, заменим действительную ХХХ прямой, проходящей через начало координат и точку E с координатами (1,1) (прямая OE на рис. 7.9). При таком спрямлении ХХХ имеем:

$$E_* = I_{*f}; \quad x_d = \frac{1}{k_c}. \quad (7.4)$$

3. Индуктивное сопротивление рассеяния x_σ зависит от конструкции синхронной машины.

Для ТГ среднее значение $x_\sigma=0,1-0,15$, а для ГГ – 0,15-0,25.

4. Для машин, снабжённых АРВ, характерным параметром является предельный ток возбуждения. Это наибольшее значение тока возбуждения при форсировке. Величина его зависит от типа системы возбуждения и находится в пределах $I_{*fnp}=3-5$, что примерно в 2 раза больше тока возбуждения машин при номинальной нагрузке.

7.2. Влияние и учёт нагрузки

При установившемся режиме КЗ влияние нагрузки проявляется, с одной стороны, в том, что предварительно нагруженный генератор имеет большую ЭДС, чем генератор, работающий на холостом ходу; в том, что, оставаясь присоединенной к сети, она может существенно изменить распределение токов в схеме.

Из простейшей схемы (рис. 7.2 а) видно, что нагрузка шунтирует поврежденную ветвь и тем самым уменьшает внешнее сопротивление цепи статора. Это приводит к увеличению тока генератора, уменьшению его напряжения и, соответственно, уменьшению тока в месте КЗ. С увеличением удалённости КЗ влияние нагрузки сказывается сильнее. Нагрузка, присоединенная непосредственно к точке КЗ, в установившемся режиме не играет никакой роли.

Промышленная нагрузка состоит преимущественно из синхронных двигателей, сопротивление которых, как известно, резко зависит от скольжения; последнее, в свою очередь, определяется напряжением у двигателя в рассматриваемом аварийном режиме. Эти зависимости нелинейны, что сильно усложняет достаточно точный учёт нагрузки, поэтому для упрощения практических расчётов нагрузку учитывают приближённо, характеризуя её некоторым постоянным сопротивлением.

На рис. 7.2 б генератор с ЭДС E_q и реактивностью x_d работает на чисто индуктивную цепь, реактивность которой $x_{вн}$. Для его напряжения можно написать, с одной стороны,

$$U = E_q - Ix_{\delta}, \quad (7.5)$$

а с другой,

$$U = Ix_{вн}. \quad (7.6)$$

Сопротивление нагрузки можно определить из совместного решения (7.5) и (7.6), положив $x_{вн} = x_{нагр}$ и $U = U_{ном}$, что приводит к выражению

$$x_{*нагр} = \frac{x_d U_{ном}}{E_q - U_{ном}}. \quad (7.7)$$

Как видно, величина $x_{*нагр}$ определяется параметрами генератора, причём влияние коэффициента мощности нагрузки, сказывается в скрытом виде – через значение E_q . При средних значениях параметров типовых генераторов, работающих с полной нагрузкой при $\cos\varphi = 0,8$, относительная величина сопротивления нагрузки после округления результатов подсчёта (7.7) составляет $x_{*нагр} = 1,2$. Эта величина отнесена к полной мощности нагрузки и к среднему напряжению ступени, где присоединена данная нагрузка.

ЭДС нагрузки в установившемся режиме трехфазного КЗ принимается равной нулю.

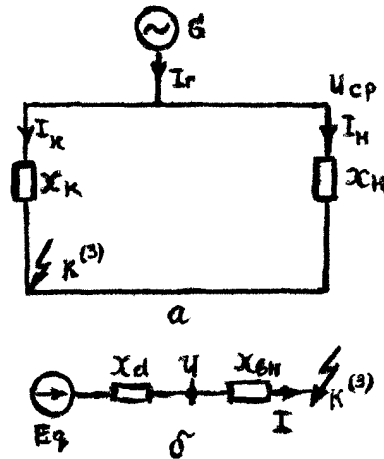


Рис. 7.2. Влияние и учёт нагрузки при трёхфазном КЗ

7.3. Аналитический расчёт при отсутствии в схеме генераторов с АРВ

Когда генераторы не имеют АРВ, расчёт установившегося режима трёхфазного КЗ сводится к определению токов и напряжений в линейной схеме. Порядок расчёта следующий:

1. Задаёмся базисными условиями ($S_б$ и $U_б$).
2. Составляется схема замещения, в которую активные элементы (генераторы) вводятся ЭДС E_q и сопротивлением $\frac{x_d S_б}{S_{ном}}$, а нагрузка – $E_H = 0$ и

$x_H = \frac{1,2 S_б}{S_{ном}}$, а пассивные элементы (трансформаторы, автотрансформаторы, воздушные и кабельные линии, реакторы) – только своими сопротивлениями.

3. Схема замещения преобразуется к простейшему виду, т. е. все сопротивления схемы замещения заменяются одним результирующим x_c с приложенной за ним эквивалентной ЭДС $E_{эkv}$.

4. Пользуясь законом Ома, по результирующему ЭДС и сопротивлению определяется установившийся ток $I_\infty^{(3)} = \frac{E_{эkv} I_б}{x_c}$.

7.4. Аналитический расчёт при наличии в схеме генераторов с АРВ

Снижение напряжения при КЗ приводит в действие устройство АРВ, которое стремится поддерживать напряжение на выводах генераторов на уровне номинального путём увеличения тока возбуждения. Поэтому можно заранее предвидеть, что токи и напряжения при этих условиях всегда больше, чем при отсутствии АРВ. Однако рост тока возбуждения у генераторов ограничен $I_{*гр}$.

Следовательно, для каждого генератора можно установить наименьшую величину внешней реактивности при КЗ, за которой генератор при предельном возбуждении обеспечивает нормальное напряжение на своих выводах. Такую реактивность называют критической $x_{*кр}$, которая может быть определена

$$x_{*кр} = \frac{x_d U_{*н}}{E_{*qпн} - U_{*н}}; \quad (7.8)$$

и связанный с ней ток

$$I_{*кр} = \frac{U_{*н}}{x_{*кр}}. \quad (7.9)$$

Относительное значение $E_{*qпн} = I_{*фпр}$ известно по каталожным данным системы возбуждения генераторов.

Среднее значение $x_{*кр}$ для типовых генераторов при номинальных условиях составляет 0,5, а критического тока – 2.

В установившемся режиме при трёхфазном КЗ генератор, имеющий АРВ, может оказаться в одном из двух режимов – предельного возбуждения нормального напряжения. Зная $x_{*кр}$, достаточно сопоставить с ней 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 вывода генератора до точки КЗ.

При сравнении $x_{*вн}$ и $x_{*кр}$ следует помнить, что они должны быть приведены к общим базисным условиям.

В табл. 7.1 сведены все соотношения, характеризующие указанные выше режимы работы генераторов при КЗ.

Порядок расчёта следующий:

1. Составляется схема замещения, в которую генератор можно не вводить.

2. Определяется $x_{*вн}$ и $x_{*кр}$.

3. Сравнивая между собой реактивности, определяют режим работы генератора.

4. В режиме предельного возбуждения генератор вводится в схему замещения параметрами $E_{*фпр}$ и $x_D = \frac{x_d S_{\sigma}}{S_{ном}}$.

5. В режиме нормального напряжения генератор вводится в схему замещения $E=1$ и $x_T = 0$.

6. Определяется $I^{(3)}_{*\infty}$ по выражениям, приведённым в табл. 7.1.

Соотношения, характеризующие режимы генераторов с АРВ

Режим предельного возбуждения	Режим нормального напряжения
$x_{*вн} < x_{кр}; I_* = I_{*кр}; U_* < U_{*н}$	$x_{*вн} > x_{кр}; I_* < I_{*кр}; U_* = U_{*н}$
$I_{*∞}^{(3)} = E_{qпр} / x_{\Sigma}$	$I_{*∞}^{(3)} = 1 / x_{*вн}$

7.5. Расчёт установившегося режима в сложных схемах

В схеме с несколькими генераторами, ток от которых протекает по общим для них ветвям, понятие внешней реактивности $x_{*вн}$ для каждого генератора с АРВУ в отдельности теряет смысл. Поэтому здесь нельзя однозначно определить возможный режим работы каждого генератора относительно точки КЗ.

В этих случаях расчёт ведётся путем последовательного приближения, задаваясь для каждого генератора, в зависимости от его удаленности от точки КЗ, режимом предельного возбуждения или режимом нормального напряжения. В первом случае генератор вводится в схему с замещением параметрами $E_{qпр}$ и x_d , во втором – $E = 1$ и $x_d = 0$. Затем производится расчёт установившегося режима.

После этого делается проверка выбранных режимов, которая заключается в сопоставлении найденных для этих генераторов токов с их критическими токами. Для режима предельного возбуждения должно быть $I_r > I_{кр}$, а для режима нормального напряжения – $I_r < I_{кр}$.

Если в результате проверки оказалось, что режимы некоторых генераторов выбраны не верно, то после их корректировки нужно сделать повторный расчёт с последующей проверкой, и так до тех пор, пока для каждого из генераторов полученные в результате расчётов и принятые режимы не совпадут.

Пример 7.1

Определить величину установившегося тока при трёхфазном КЗ в точке K_2 (рис. 7.3). Произвести расчёт аналитически для двух случаев: генераторы в схеме без АРВ; генераторы снабжены АРВ.

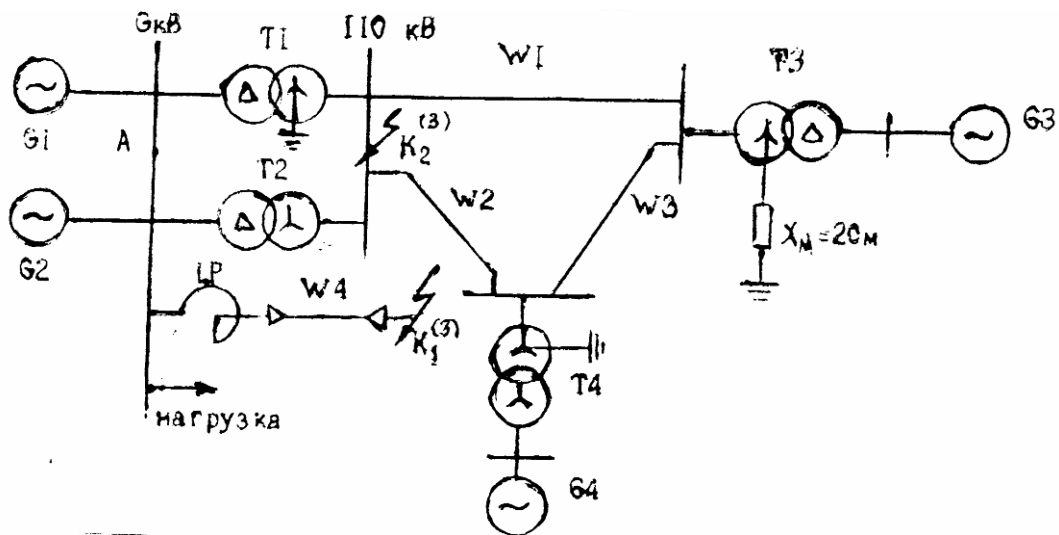


Рис. 7.3. Расчетная схема к примеру 7.1

Параметры элементов:

Генераторы: турбо (ТГ), гидро (ГГ)

$$G_1(\text{ТГ}) - \delta_d'' = 0,125; \quad D_f = 60 \text{ л.д.}; \quad \tilde{n} \hat{s} \varphi = 0,8;$$

$$G_2(\text{ТГ}) - \delta_d'' = 0,132; \quad D_f = 100 \text{ л.д.}; \quad \tilde{n} \hat{s} \varphi = 0,8;$$

$$G_3(\text{ГГ}) - \delta_d'' = 0,19; \quad D_f = 80 \text{ л.д.}; \quad \tilde{n} \hat{s} \varphi = 0,8;$$

$$G_4(\text{ГГ}) - \delta_d'' = 0,22; \quad D_f = 100 \text{ л.д.}; \quad \tilde{n} \hat{s} \varphi = 0,85.$$

Трансформаторы:

$$T_1 - S_{\tilde{m}} = 80 \text{ л.д.}; \quad U_k = 10\%;$$

$$T_2 - S_{\tilde{m}} = 125 \text{ л.д.}; \quad U_k = 11\%;$$

$$T_3 - S_{\tilde{m}} = 120 \text{ л.д.}; \quad U_k = 10,5\%;$$

$$T_4 - S_{\tilde{m}} = 125 \text{ л.д.}; \quad U_k = 12\%.$$

Линии электропередач:

$$W_1 - x_0 = 0,35 \hat{h} / \hat{e}i; \quad L = 80 \hat{e}i;$$

$$W_2 - x_0 = 0,42 \hat{h} / \hat{e}i; \quad L = 70 \hat{e}i;$$

$$W_3 - x_0 = 0,4 \hat{h} / \hat{e}i; \quad L = 60 \hat{e}i;$$

$$W_4 - x_0 = 0,08 \hat{h} / \hat{e}i; \quad L = 5 \hat{e}i.$$

Реактор:

$$LR - x_p = 6\%; \quad I_{\tilde{m}} = 1000 \text{ А}; \quad U_{\tilde{m}} = 6 \hat{e} \hat{A}.$$

$$\hat{I} \hat{a} \hat{d} \hat{o} \hat{c} \hat{e} \hat{a} - S_{\tilde{m}} = 35 \text{ МВА}.$$

Решение

Выполним расчёт в ОЕ.

Определим ЭДС и сопротивление нагрузки:

$$E_5 = E''_n = 0,85; \quad x_{14} = x_{набр} \frac{S_{\bar{o}}}{S_{ном}} = 0,35 \frac{100}{35} = 1.$$

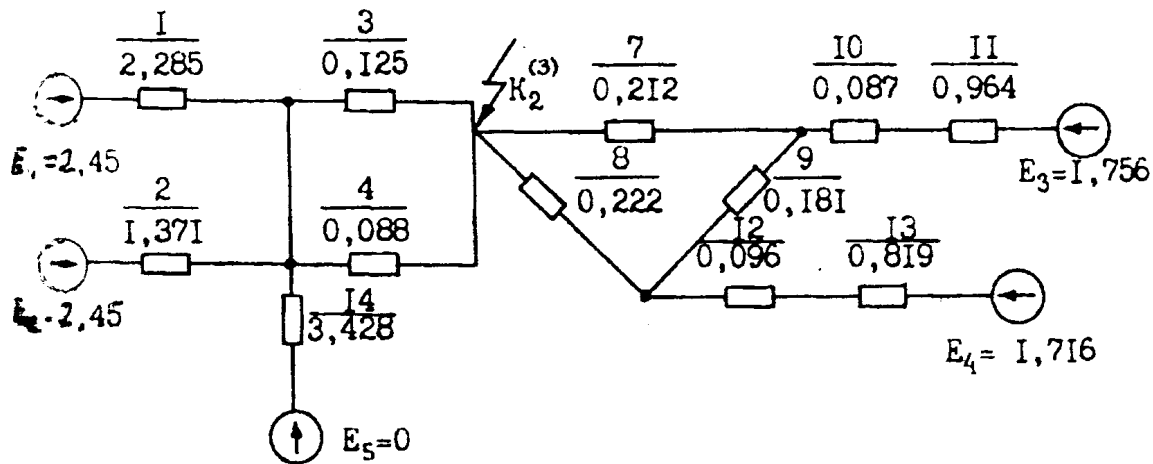


Рис. 7.4. Схема замещения для расчёта сверхпереходного режима к примеру 7.3

а) генераторы в схеме без АРВ.

Составим схему замещения для расчёта установившегося режима (рис. 7.4) и определим параметры элементов схемы.

Пусть в системе (рис. 7.3) все генераторы до КЗ в точке K_2 работали с номинальными параметрами. В этом случае для расчёта установившегося режима КЗ генераторы будут введены в схему замещения со следующими значениями ЭДС и сопротивлений:

$$G_1 \text{ и } G_2 : E_1 = E_2 = \sqrt{(U_* \cos \varphi)^2 + \left(U_* \sin \varphi + I_{*H} \frac{c}{k_s} \right)^2} =$$

$$= \sqrt{(1 \cdot 0,8)^2 + \left(1 \cdot 0,6 + 1 \frac{1,2}{0,7} \right)^2} = 2,45;$$

$$x_1 = \frac{x_d S_{\bar{o}}}{S_{ном}} = \frac{c}{k_c} \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{S_{ном}} = \frac{1,2}{0,7} \cdot \frac{100 \cdot 0,8}{60} = 2,285;$$

$$x_2 = \frac{1,2}{0,7} \cdot \frac{100 \cdot 0,8}{100} = 1,371;$$

$$G_3 : E_3 = \sqrt{(1 \cdot 0,8)^2 + \left(1 \cdot 0,6 + 1 \frac{1,06}{1,1} \right)^2} = 1,756;$$

$$G_4 : E_4 = \sqrt{(1 \cdot 0,85)^2 + \left(1 \cdot 0,527 + 1 \frac{1,06}{1,1}\right)^2} = 1,716;$$

$$x_{13} = \frac{1,0,6}{1,1} \cdot \frac{100 \cdot 0,85}{100} = 0,819;$$

$$\text{Нагрузка : } E_5 = 0; x_{14} = \frac{x_{*n} S_{\bar{o}}}{S_{\text{ном}}} = \frac{1,2 \cdot 100}{35} = 3,428.$$

Используя методы преобразования схем, получим результирующую схему рис. 7.5

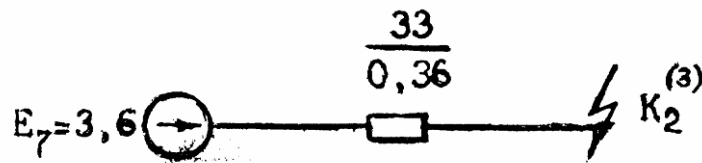


Рис. 7.5. Результирующая схема замещения

По результирующим E_8 и x_{24} относительно места повреждения определяем относительное значение установившегося тока трёхфазного КЗ:

$$I_{*\infty}^{(3)} = \frac{E_8}{x_{24}} = \frac{1,835}{0,33} = 5,56.$$

Для получения значения тока в кА необходимо полученный результат умножить на базисный ток

$$I_{\infty}^{(3)} = I_{*\infty}^{(3)} \cdot I_{\hat{a}} = 5,56 \cdot 0,502 = 2,79 \hat{a} \text{ A};$$

б) генераторы в схеме снабжены АРВ.

Для предварительного задания режимов работы генераторов определим внешние и критические реактивности, приведённые к базисным условиям, а также критические токи для каждого из них.

Для генераторов G_1 и G_2 при КЗ в точке K_2 (рис. 7.3):

$$x_{*gn} = x_{28} = \frac{1}{y_3 + y_4 + y_{14}} = \frac{1}{\frac{1}{0,125} + \frac{1}{0,088} + \frac{1}{3,428}} = 0,051;$$

$$x_{*kpG1} = x_{*kp} \frac{S_{\bar{o}}}{S_{\text{ном}}} = 0,5 \frac{100 \cdot 0,8}{60} = 0,66;$$

$$I_{*kpG1} = \frac{U_*}{x_{*kpG1}} = \frac{1}{0,66} = 1,5;$$

$$x_{*kpG2} = 0,5 \cdot \frac{100 \cdot 0,8}{100} = 0,4;$$

$$I_{*kpG1} = \frac{1}{0,4} = 2,5.$$

Чтобы определить $x_{*вн}$ для генераторов G_3 и G_4 , правую часть схемы (рис. 7.6) относительно точки K_2 преобразуем к виду, представленному на рис. 7.3.

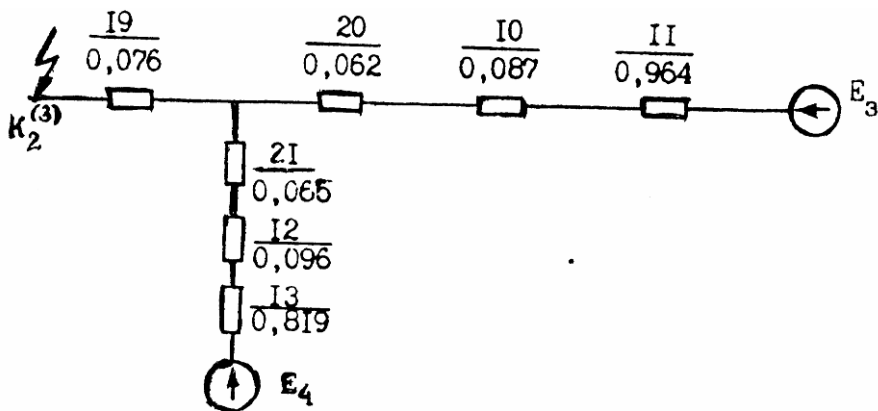


Рис. 7.6. Схема замещения к определению внешних реактивностей G_3 и G_4

Для генератора G_3 :

$$x_{*вн} = x_{29} = x_{10} + x_{20} + x_{19} = 0,087 + 0,062 + 0,076 = 0,225;$$

$$x_{*kpG3} = 0,5 \frac{100 \cdot 0,8}{80} = 0,5; \quad I_{*kpG3} = \frac{1}{0,5} = 2.$$

Для генератора G_4 :

$$x_{*вн} = x_{30} = x_{12} + x_{21} + x_{19} = 0,096 + 0,065 + 0,076 = 0,237;$$

$$x_{*kpG4} = 0,5 \frac{100 \cdot 0,85}{100} = 0,425; \quad I_{*kpG4} = \frac{1}{0,425} = 2,35.$$

Так как $x_{*вн} < x_{*кр}$ для всех генераторов, то будем считать, что они работают в режиме предельного возбуждения. Примем предельные значения тока возбуждения для G_1 и G_2 равным 3, а для G_3 и G_4 – равным 4. В этом случае генераторы вводятся в схему замещения следующими параметрами:

$$E_1 = E_2 = I_{*fnn} = 3; \quad x_1 = 2,285; \quad x_2 = 1,371;$$

$$E_3 = E_4 = I_{*fnn} = 4; \quad x_{11} = 0,964; \quad x_{13} = 0,819.$$

Схема замещения после преобразований примет вид рис. 7.7.

Предположим, что генераторы G_1 и G_2 работают в режиме нормального напряжения. Тогда их суммарный ток

$$I_* = \frac{U_*}{x_{28}} = \frac{1}{0,051} = 19,6$$

и каждого генератора в отдельности, соответственно,

$$I_{*G1} = I_* \frac{x_2}{x_1 + x_2} = 19,6 \frac{1,371}{2,285 + 1,371} = 7,35;$$

$$I_{*G2} = I_* \frac{x_1}{x_1 + x_2} = 19,6 \frac{2,285}{2,285 + 1,371} = 12,25.$$

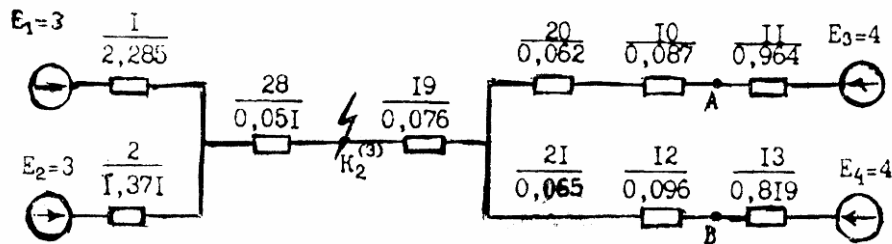


Рис. 7.7. Схема замещения для генераторов, работающих в режиме предельного возбуждения

Аналогичным образом предположим, что генераторы G_3 и G_4 работают в режиме нормального напряжения. Тогда напряжение в точках А и В (рис. 7.7) равны номинальным и в ОЕ равны единице, т. е. $U_* = 1$. Учитывая, что $x_{31} = x_{20} + x_{10} = 0,062 + 0,087 = 0,149$ и $x_{32} = x_{21} + x_{12} = 0,065 + 0,096 = 0,161$, то получим суммарный ток от этих генераторов:

$$I_* = \frac{U_*}{x_{19} + \frac{x_{31} \cdot x_{32}}{x_{31} + x_{32}}} = \frac{1}{0,076 + \frac{0,149 \cdot 0,161}{0,149 + 0,161}} = 6,52,$$

а от каждого в отдельности

$$I_{*G3} = I_* \frac{x_{32}}{x_{31} + x_{32}} = 6,52 \frac{0,161}{0,149 + 0,161} = 3,386;$$

$$I_{*G4} = I_* \frac{x_{31}}{x_{31} + x_{32}} = 6,52 \frac{0,149}{0,149 + 0,161} = 3,134.$$

Так как точки всех генераторов больше критических, то это говорит о том, что все генераторы работают в режиме предельного возбуждения.

В этом случае, преобразовывая схему (рис. 7.7), получим результирующую схему рис. 7.8.

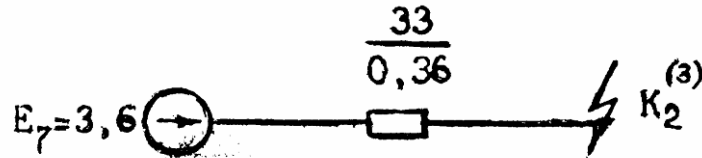


Рис. 7.8. Результирующая схема замещения

Установившийся ток трехфазного КЗ в точке K_2

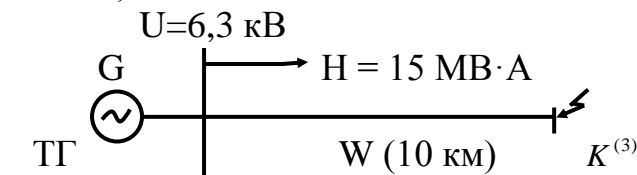
$$I_{*\infty}^{(3)} = \frac{E_7}{x_{33}} = \frac{3,6}{0,36} = 10; \quad I_{\infty}^{(3)} = I_{*\infty}^{(3)} \cdot I_a = 10 \cdot 0,502 = 5,02 \text{ êÀ.}$$

$$I_{*\infty}^{(3)} = \frac{E_{\infty i\delta}}{X_4} = \frac{3,72}{1,1735} = 3,16.$$

Домашнее задание № 5

Выполнить расчет установившегося режима КЗ для схемы (при генераторе с АРВ и без АРВ)

Схема 1



$$S = 30 \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

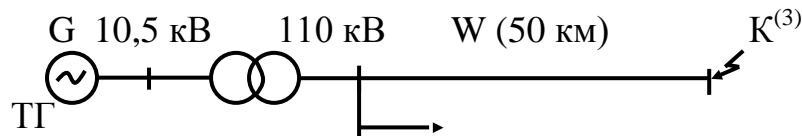
$$k_c = 0,6;$$

$$I_{*H} = 0,9;$$

$$\cos \varphi = 0,8.$$

Режим с АРВ считать по $I_{*Впр} = 4,5$

Схема 2



$$H = 20 \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$P = 50 \text{ МВт}; \quad S_H = 75 \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$\cos \varphi = 0,8; \quad U_k = 10,5 \text{ \%}.$$

$$I_{*B} = 2,0;$$

$$K_c = 0,7.$$

Режим с АРВ $I_{*Впр} = 5$.

Схема 3

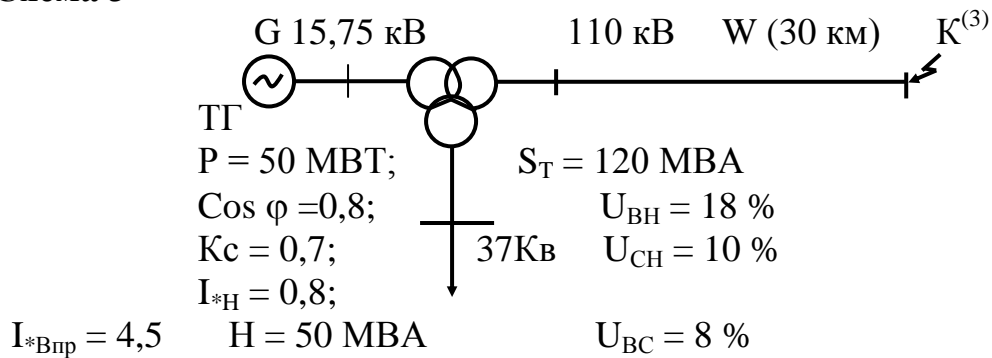


Схема 4

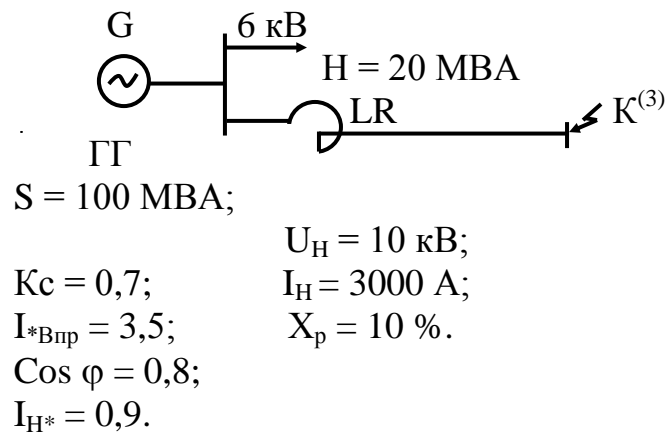


Схема 5

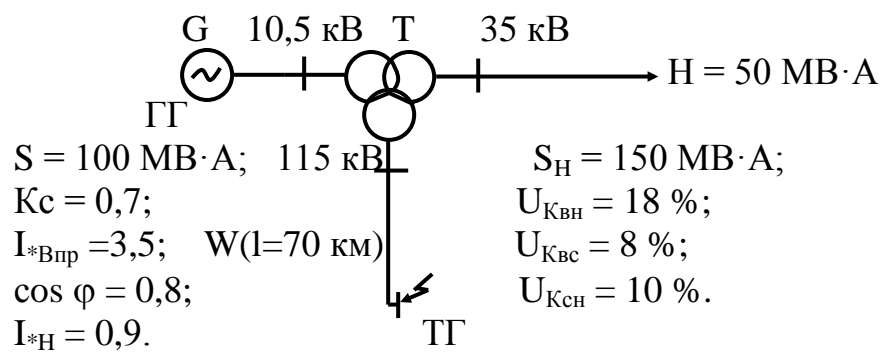


Схема 6

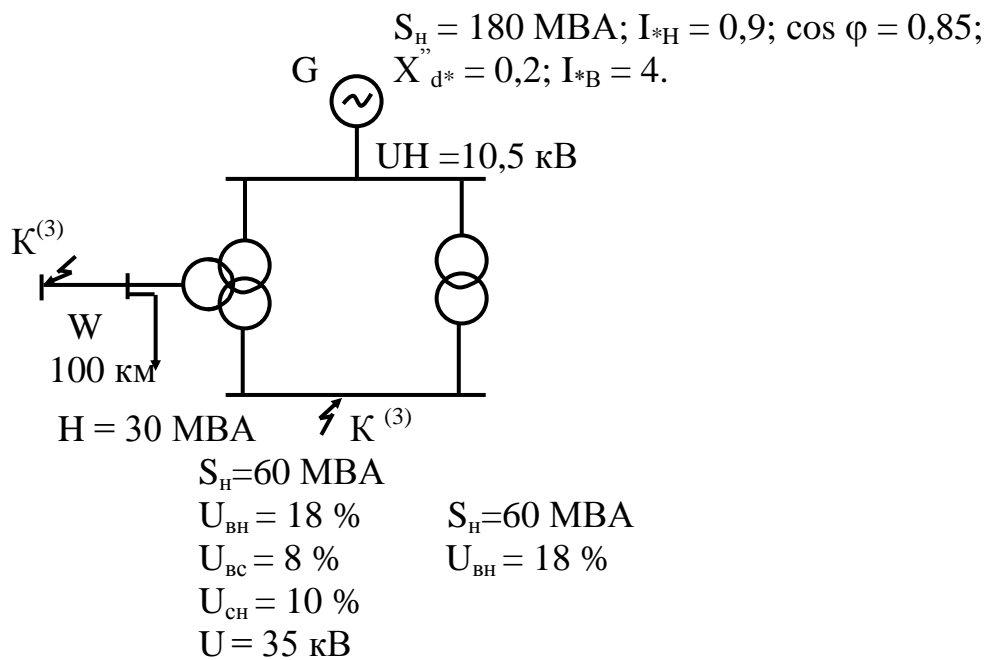
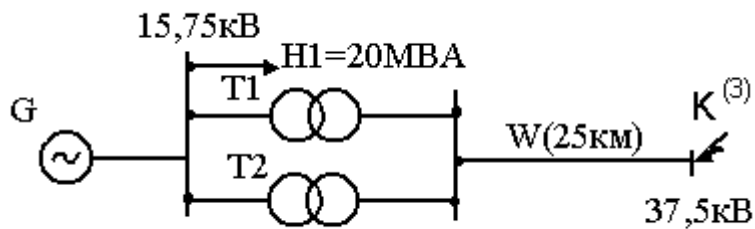


Схема 7



ТГ

$S = 100 \text{ MVA}; S_H = 40 \text{ MVA};$
 $I_{*Bmp} = 4; U_K = 10,5 \%$
 $Kc = 0,7;$
 $\cos \varphi = 0,8;$
 $I_{*H} = 0,9.$

Схема 8

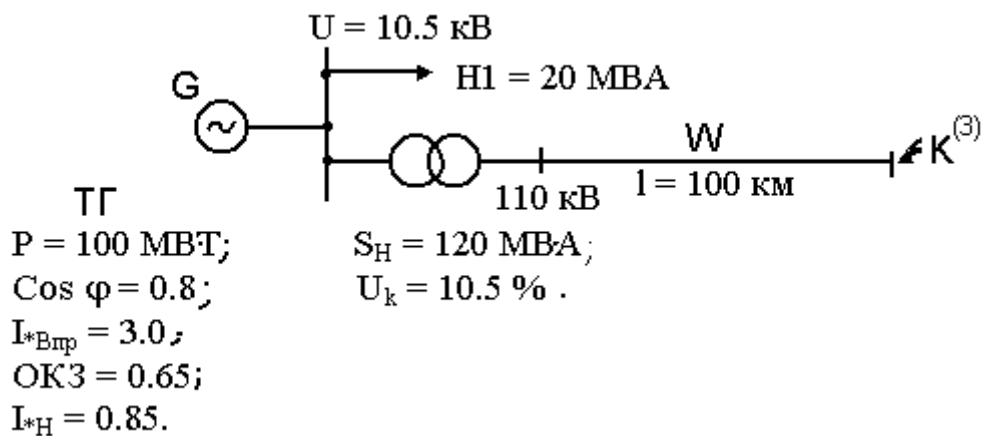


Схема 9

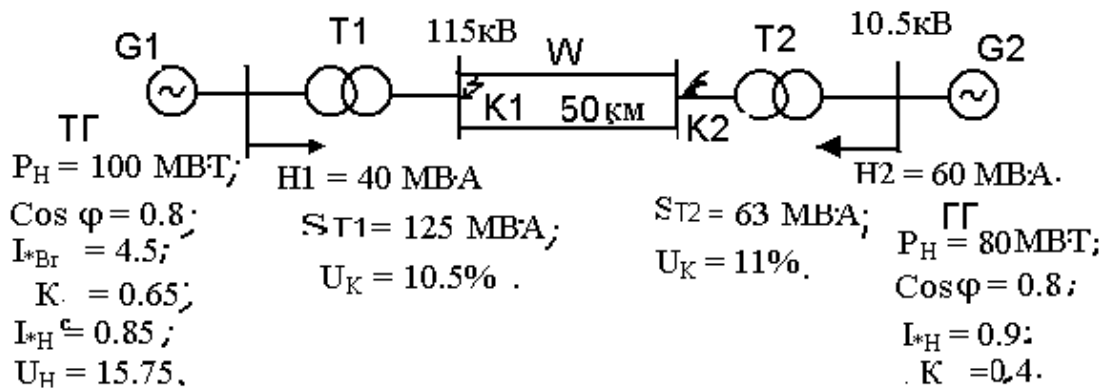
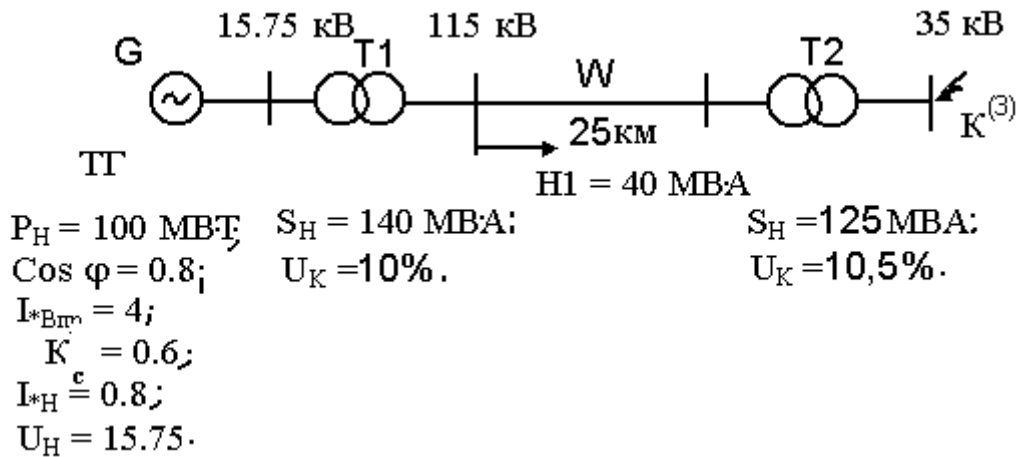


Схема 10



8. РАСЧЕТ ТОКОВ КЗ С ПОМОЩЬЮ РАСЧЕТНЫХ КРИВЫХ

8.1. Общие положения метода расчетных кривых

Ток КЗ в произвольный момент после возникновения КЗ может быть найден с помощью специально построенных расчетных кривых. Эти кривые позволяют определить периодическую составляющую тока в месте КЗ. При построении кривых приближенно учтено влияние нагрузки в сети на ток КЗ.

На рис. 8.1 и 8.2 даны расчетные кривые $Int=f(X_{расч})$ при $t=var$, построенные в 1940 г., для схемы с типовыми генераторами мощностью до 100 МВт, а также производные от них кривые $Int=f(t)$ при $X_{расч}=var$, построенные в 1970 г. Указанные кривые позволяют найти периодическую составляющую тока в месте КЗ с учетом влияния нагрузки в сети для произвольного момента времени от $t=0$ до $t=\infty$. Параметры современных генераторов мощностью более 100 МВт (сопротивления, механические постоянные, быстрдействие систем возбуждения и т. д.) существенно отличаются от аналогичных параметров генераторов мощностью до 100 МВт. Это обстоятельство потребовало разработки новых расчетных кривых (рис. 9.3), которые позволяют для интервала времени от 0 до 0,5 с найти периодическую составляющую тока в месте КЗ с приближенным учетом влияния нагрузки сети. Кривые справедливы для турбогенераторов мощностью 12,5 – 800 МВт, гидрогенераторов мощностью до 500 МВт и для всех крупных синхронных компенсаторов. Кривые включены в Руководящие указания по расчету коротких замыканий, выбору и проверке аппаратов и проводников по условиям КЗ (1975 г.).

Методика нахождения тока КЗ для произвольного момента времени с помощью расчетных кривых приведена ниже.

1. Составляется схема замещения, в которую генераторы вводятся своими сверхпереходными сопротивлениями X''_d , а нагрузочные ветви не учитываются.

2. Схема замещения упрощается относительно точки КЗ и находится результирующее сопротивление между источником и точкой КЗ $X_{расч(б)}$.

3. Результирующее сопротивление приводится к номинальным условиям источников

$$X_{РАСЧ(Н)} = X_{РАСЧ(б)} \cdot \frac{S_{Г,НОМ.СУМ}}{S_б}$$

4. По расчетным кривым для интересующего момента времени находится периодическая составляющая тока в месте КЗ, $Int(n)$.

5. Находится ток КЗ в именованных единицах

$$I_{nt} = I_{nt}(i) \cdot I_{\bar{A}, \hat{i}} \cdot \hat{N} \hat{O} \hat{i} = I_{nt}(i) \cdot \frac{S_{\bar{A}, \hat{i}} \cdot \hat{N} \hat{O} \hat{i}}{\sqrt{3} \cdot U_{CP, \hat{i}}},$$

где $I_{г, ном сум}$ – номинальный ток генераторов, приведенный к ступени напряжения той сети, где произошло КЗ.

6. При большой электрической удаленности точки КЗ от источников, когда $X_{расч}(н) > 3$, можно принять, что

$$I_{nt}(н) = \frac{1}{X_{расч}(н)} = I_{no}(н)$$

и

$$I_{nt} = \frac{I_{г, ном сум}}{X_{расч}(н)}.$$

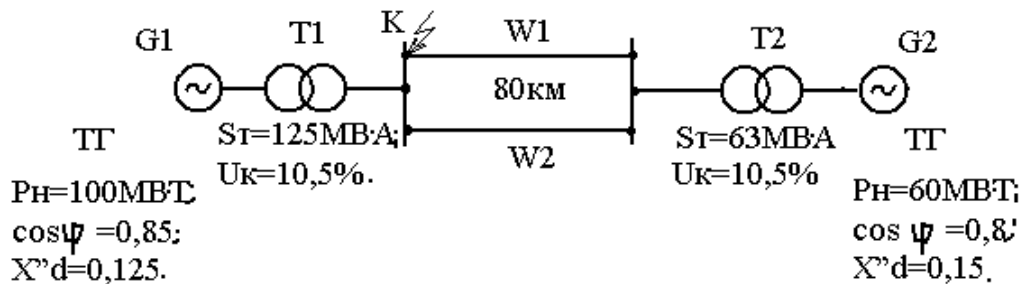
7. В ряде случаев нахождение тока КЗ с помощью расчетных кривых по общему изменению тока, т. е. когда все генераторы заменяются эквивалентным источником, неправомерно или невозможно. Это имеет место при наличии в исходной схеме источников, существенно различных по характеристикам (ТЭС, ГЭС), мощности (генераторы и электростанции конечной мощности и системы неизменного напряжения) и удаленности от места КЗ. В подобных случаях определение тока КЗ производят по индивидуальному изменению тока от характерных групп источников. Для этого исходная схема замещения приводится к схеме полного многоугольника, вершинами которого являются точки приложения ЭДС источников и точка КЗ.

В последней схеме находятся токи, посылаемые различными источниками в точку КЗ, а также суммарный ток в месте КЗ.

Описанный метод позволяет найти ток в месте КЗ, однако не позволяет найти распределение тока КЗ по ветвям схемы.

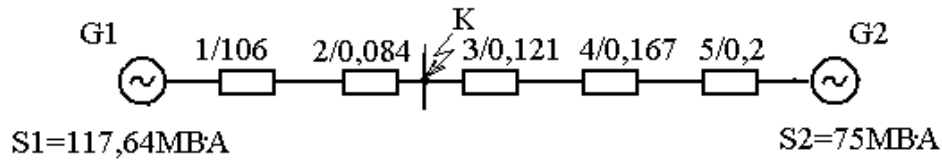
Пример 8.1

Для следующей схемы определить по расчетным кривым токи КЗ в точке К (I'' , I_0 , I_5 , I_∞)



1. Базисные условия: $S_{\bar{A}} = 100 \hat{A} \cdot \hat{A}$, $U_{\bar{A}} = 115 \hat{A}$.

2. Схема замещения



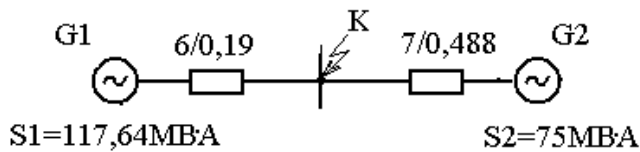
$$X_1 = X_{d^*}'' \cdot \frac{S_B}{S_H} = 0,125 \cdot \frac{100 \cdot 0,85}{100} = 0,106;$$

$$X_2 = \frac{U_K \%}{100} \cdot \frac{S_B}{S_H} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{125} = 0,084;$$

$$X_3 = \frac{x_0 \cdot l}{2} \cdot \frac{S_B}{U_H^2} = \frac{0,4 \cdot 80}{2 \cdot 115^2} = 0,121;$$

$$X_4 = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{63} = 0,167;$$

$$X_5 = 0,15 \cdot \frac{100 \cdot 0,8}{60} = 0,2.$$



$$X_6 = X_1 + X_2 = 0,106 + 0,084 = 0,19;$$

$$X_7 = 0,121 + 0,168 = 0,488;$$

$$X_8 = \frac{0,488 \cdot 0,19}{0,488 + 0,19} = 0,137;$$

$$X_{PACЧ} = X_8 \cdot \frac{S_{НСУМ}}{S_{\delta}} = 0,137 \cdot \frac{192,64}{100} = 0,263.$$

3. Токи КЗ в относительных единицах (рис. 8.1).

$$I^{*''} = 3,9; I_{0,5} = 2,55; I_{\infty} = 2,4.$$

4. Токи КЗ в именованных единицах

$$I_{НСУМ} = \frac{S_{НСУМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta}} = \frac{192,64}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 10,6 \text{ кА};$$

$$I'' = I_*'' \cdot I_{СМН} = 41,34 \text{ кА};$$

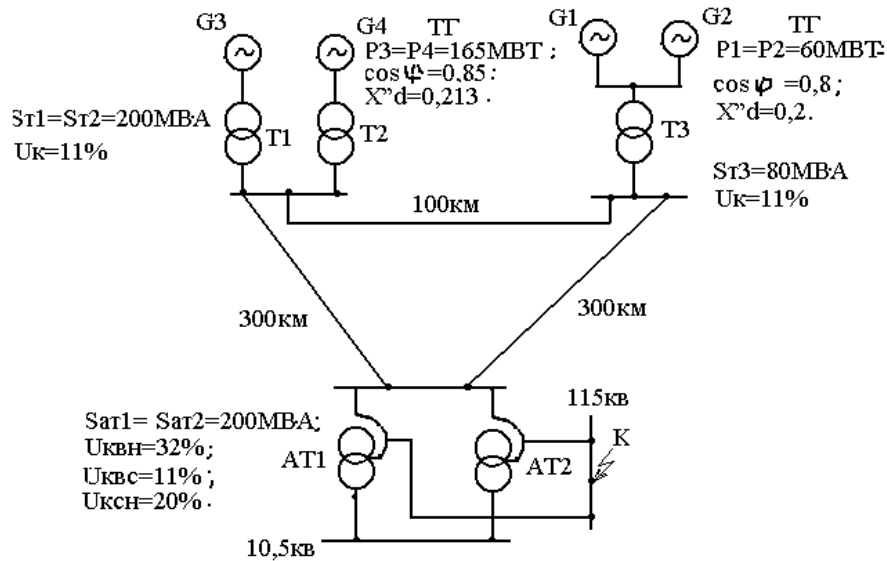
$$I_{0,5} = 2,55 \cdot 10,6 = 27,03 \text{ кА};$$

$$I_{\infty} = 2,4 \cdot 10,6 = 27,03 \text{ кА};$$

$$I_V = 2,55 \cdot 41,34 = 105,45 \text{ кА}.$$

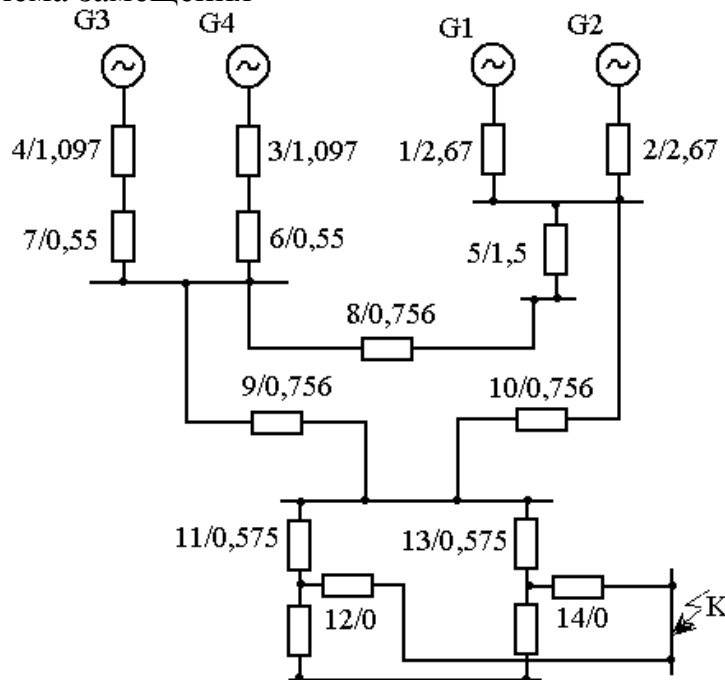
Пример 8.2

Для схемы определить по расчетным кривым токи КЗ в точке К I'' , $I_{0,5}$, I_{∞}



1. Базисные условия: $S_A = 1000 \text{ МВА}$, $U_A = 115 \text{ кВ}$.

2. Схема замещения



$$X_1 = X_2 = 0,2 \cdot \frac{1000 \cdot 0,8}{60} = 2,67;$$

$$X_3 = X_4 = 0,213 \cdot \frac{1000 \cdot 0,85}{165} = 1,097;$$

$$X_5 = \frac{12}{100} \cdot \frac{1000}{80} = 1,5;$$

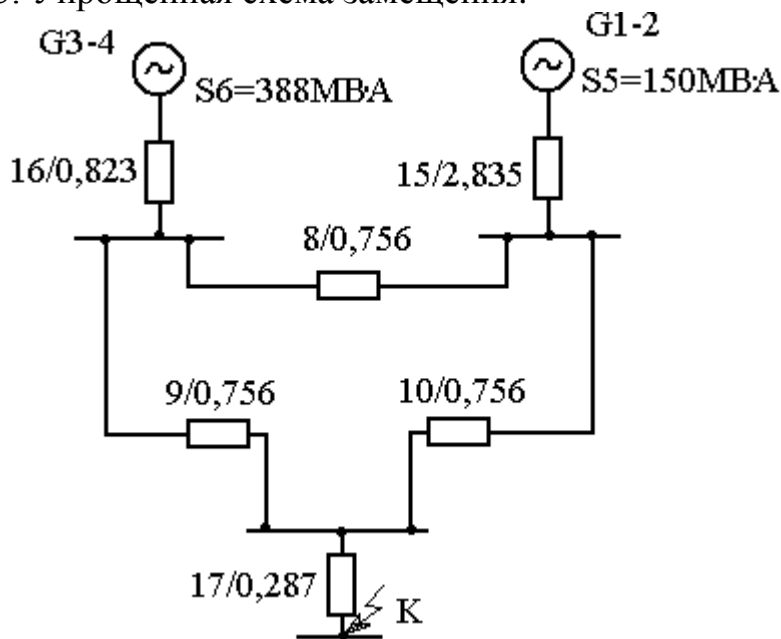
$$X_6 = X_7 = \frac{11}{100} \cdot \frac{1000}{200} = 0,55;$$

$$X_8 = X_9 = X_{10} = X_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_6^2} = 0,4 \cdot 100 \cdot \frac{1000}{230^2} = 0,756;$$

$$X_{11} = X_{13} = \frac{0,5}{100} \cdot (U_{KBH} + U_{KBC} - U_{KCH}) \cdot \frac{S_6}{S_H} = \frac{0,5}{100} (11 + 32 - 20) \cdot \frac{1000}{200} = 0,575;$$

$$X_{12} = X_{14} = \frac{0,5}{100} \cdot (U_{KBC} + U_{KCH} - U_{KBH}) \cdot \frac{S_6}{S_H} = \frac{0,5}{100} (11 + 20 - 32) \cdot \frac{1000}{200} \approx 0.$$

3. Упрощенная схема замещения:



$$S_5 = S_1 + S_2 = 150 \text{ MB} \cdot \text{A};$$

$$X_{15} = \frac{X_1}{2} + X_5 = 2,835;$$

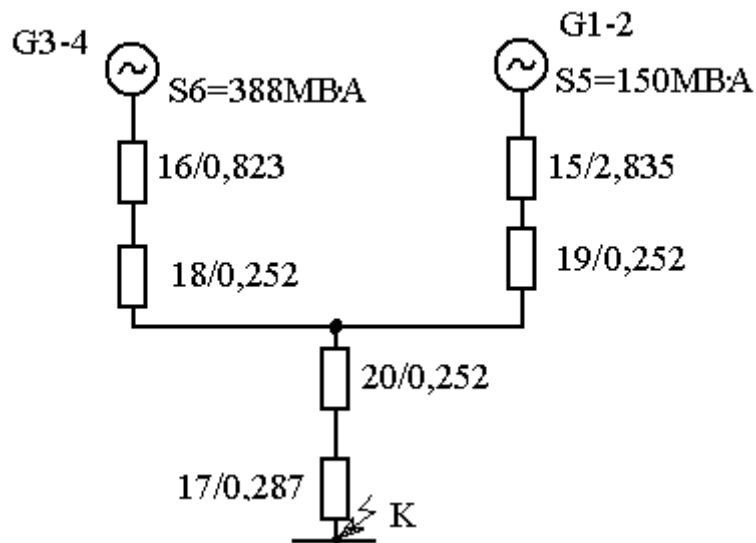
$$X_{17} = \frac{X_{11} + X_{12}}{2} = 2,87;$$

$$X_{16} = \frac{X_3 + X_6}{2} = 0,823 ;$$

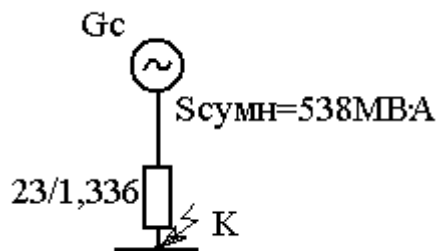
$$X_{18} = \frac{X_8 \cdot X_9}{X_8 + X_9 + X_{10}} = \frac{0,757 \cdot 0,757}{3 \cdot 0,757} = 0,252 ;$$

$$X_{19} = 0,252 ;$$

$$X_{20} = 0,252 .$$



Преобразовав схему, имеем: $X_{21} = \frac{(X_{16} + X_{18}) + (X_{15} + X_{19})}{X_{16} + X_{15} + X_{18} + X_{19}} = 0,797 ;$



$$X_{22} = X_{10} + X_{17} = 0,539 ;$$

$$X_{23} = X_{22} + X_{21} = 1,336 .$$

4. Расчетное сопротивление

$$X_{РАСЧ} = X_{23} \cdot \frac{S_{НСУМ}}{S_6} = 1,336 \cdot \frac{538}{1000} = 0,719 .$$

5. Токи КЗ в относительных единицах, определенные по расчетным кривым

$$I_*'' = 1,4; I_{*(0,5)}'' = 1,18; I_{*\infty}'' = 1,47.$$

6. Токи КЗ в именованных единицах:

$$I'' = I_*'' \cdot I_{\text{СУМН}} = 1,4 \cdot \frac{538}{\sqrt{3} \cdot 115} = 3,78 \text{ кА};$$

$$I_{(0,5)} = 1,18 \cdot 2,7 = 3,186 \text{ кА};$$

$$I_{\infty} = 1,47 \cdot 2,7 = 3,969 \text{ кА};$$

$$I_Y = 2,55 \cdot 3,78 = 9,64 \text{ кА}.$$

Домашнее задание № 6

Для схемы домашнего задания № 2 определить ток КЗ через 0,2 с, используя расчетные кривые.

9. РАСЧЁТ ТОКА ТРЁХФАЗНОГО КЗ С ПОМОЩЬЮ ТИПОВЫХ КРИВЫХ

Типовые кривые представляют собой семейство основных кривых (рис. 9.1)

$$\frac{I_{zt}}{I_{z0}} = f(t) \text{ при } \frac{I_{z0}}{I_{z,ном}} = \text{var}$$

и семейство дополнительных кривых

$$\frac{I_{kt}}{I_{k0}} = f\left(\frac{I_{zt}}{I_{z0}}\right) \text{ при } \frac{I_{z0}}{I_{k0}} = \text{var},$$

$$\frac{I_{zt}}{I_{z0}} \cdot \frac{I_{kt}}{I_{k0}}.$$

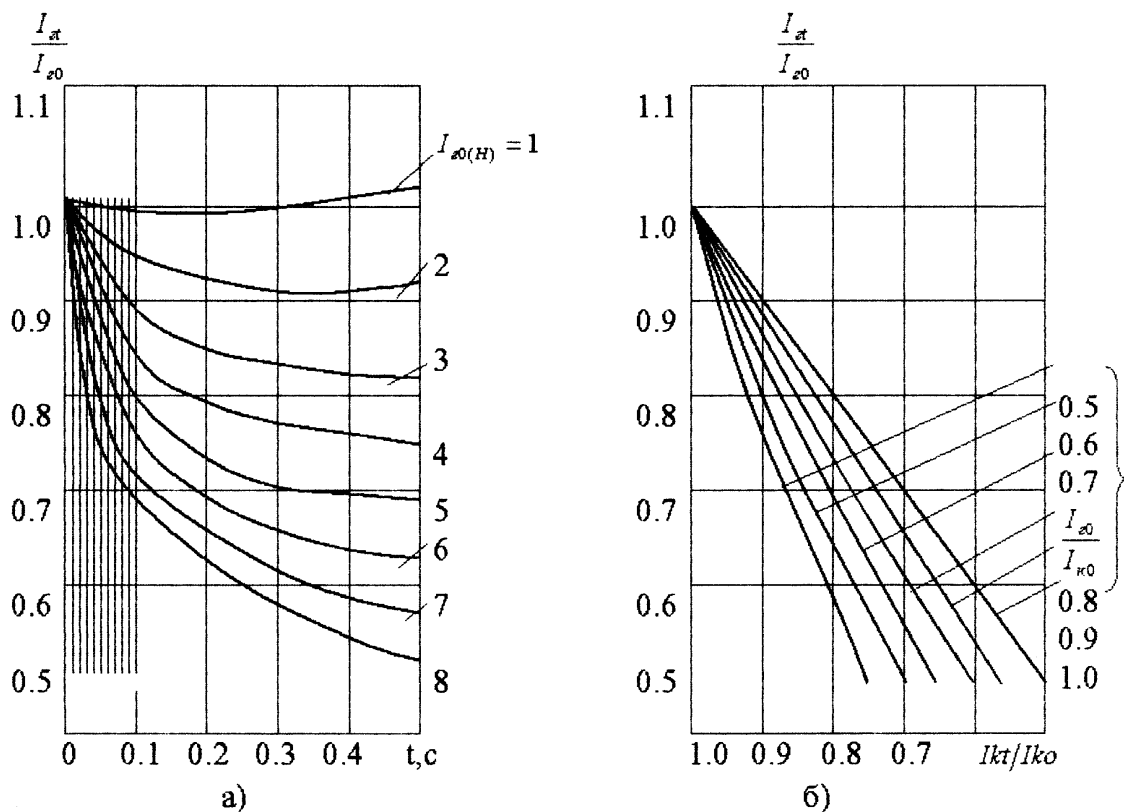


Рис. 9.1. Типовые кривые изменения во времени тока КЗ синхронной машины: I_{zt} – периодическая составляющая тока генератора (источника) в произвольный момент времени t после возникновения КЗ ($t = 0 \div 0,5$ с); I_{z0} – периодическая составляющая тока генератора (источника) в начальный момент КЗ; $I_{z,ном}$ – номинальный ток генератора (источника); I_{kt} – ток в месте КЗ в произвольный момент времени t ; I_{k0} – ток в месте КЗ в начальный момент КЗ

Для нахождения тока КЗ в схеме с несколькими генераторами, находящимися в примерно одинаковых условиях относительно точки КЗ и, следовательно, могущими быть представленными одним эквивалентным источником, необходимо:

1. Составить схему замещения, в которой генераторы учтены их сверхпереходным ЭДС E_q'' и сопротивлениями X_d'' , а нагрузочные ветви сети опущены.

2. Преобразовать схему относительно точки КЗ и найти начальное значение в месте КЗ $I_{к0}$ и тока генераторов I_{z0} .

3. Найти отношение токов:

$$\frac{I_{z0}}{I_{z,ном}} = \frac{I_{*z0(б)}}{I_{*z,ном(б)}} = \frac{I_{*z0(н)}}{I_{*z,ном(н)}} = I_{*z0(н)}.$$

4. По основным расчётным кривым (рис. 9.3 а) найти для интересующего момента времени t отношение токов:

$$\frac{I_{zt}}{I_{z0}}.$$

5. Найти искомый ток в месте КЗ для интересующего момента времени t :

$$I_{kt} = I_{zt} = \frac{I_{zt}}{I_{z0}} \cdot I_{z0}.$$

Если в схеме имеется несколько источников конечной мощности с разной электрической удалённостью от точки КЗ, а также система неизменного напряжения, то целесообразно все источники разбить на две группы. В одну из них следует включить все источники, электрически близко расположенные к точке КЗ (связанные с точкой КЗ непосредственно или через одну ступень трансформации), а в другую группу – все прочие источники, приняв их в качестве системы неизменного напряжения.

Для нахождения тока КЗ в этом случае необходимо:

1. Составить схему замещения, в которой источники учитываются их сверхпереходными ЭДС и сопротивлениями, а нагрузочные ветви сети опускаются.

2. Преобразовать схему относительно точки КЗ с выделением двух групп источников (схема трёхлучевой звезды).

3. Найти токи $I_{г0}$ и $I_{к0}$ и их отношение $I_{г0}/I_{к0}$.

4. Для интересующего момента времени t по основным кривым (рис. 9.1 а) найти $I_{gt}/I_{г0}$ при известном отношении $I_{г0}/I_{г,ном}$, а далее,

пользуясь вспомогательными кривыми (рис. 9.1 б), при известном отношении I_{k0}/I_{k0} найти I_{kt}/I_{k0} .

5. Определить искомый ток в месте КЗ:

$$I_{kt} = I_{k0} \frac{I_{kt}}{I_{k0}}$$

Если система непосредственно связана с точкой КЗ, т. е. не имеет общих с другими источниками ветвей, по которым одновременно проходят как ток системы, так и ток этих источников, то систему следует выделять в расчетной схеме и ток КЗ от нее находить по простейшему выражению:

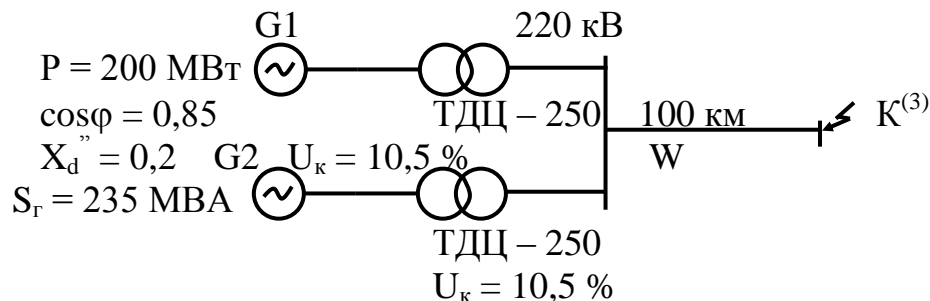
$$I_{K,C} = \frac{1}{X_{C(\sigma)}} \cdot I_{\sigma},$$

где I_{σ} – базисный ток той ступени напряжения сети, на которой возникло КЗ.

По типовым кривым можно найти ток в месте КЗ, но не его распределение по ветвям схемы.

Пример 9.1

Определить ток трехфазного КЗ в точке К для схемы в момент времени $t=0,5$ с.

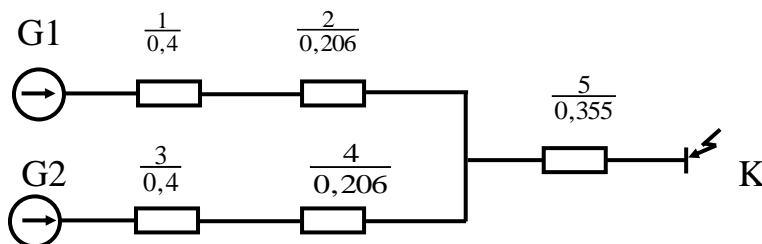


Решение

1. Базисные условия:

$$S_A = 470 \text{ МВА}, U_A = 230 \text{ кВ}, I_A = \frac{S_A}{\sqrt{3} \cdot U_A} = \frac{470}{\sqrt{3} \cdot 230} = 1,18 \text{ кА} \quad (I_{*Г,ном(б)}).$$

2. Определяем параметры схемы замещения



$$\dot{A}_{\bar{A}0}'' = U + I \cdot X_d'' \cdot \sin \varphi = 1 + 1 \cdot 0,2 \cdot 0,527 = 1,105;$$

$$X_1 = X_3 = X_{d''} \cdot \frac{S_B}{S_H} = 0,2 \cdot \frac{470}{235} = 0,4;$$

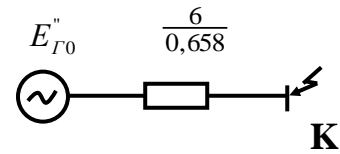
$$X_2 = X_4 = \frac{U_K \%}{100} \cdot \frac{S_B}{S_H} = \frac{11}{100} \cdot \frac{470}{250} = 0,205;$$

$$X_5 = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_B}{U_B^2} = 0,4 \cdot 100 \cdot \frac{470}{230^2} = 0,355;$$

$$X_6 = \frac{\tilde{O}_1 + \tilde{O}_2}{2} + \tilde{O}_5 = \frac{0,4 + 0,205}{2} + 0,355 = 0,658;$$

$$I_{\bar{A}i(a)} = I_{\bar{A}0(i)} = \frac{E_{\bar{N}0i\bar{A}0}''}{X_6} = \frac{1,105}{0,658} = 1,68;$$

$$I_{\bar{N}0i\bar{A}} = \frac{S_i}{\sqrt{3} \cdot U_{\bar{A}}} = \frac{470}{\sqrt{3} \cdot 230} = 1,18 \text{ êÀ.}$$



Для момента $t=0,5$ с определяем отношение

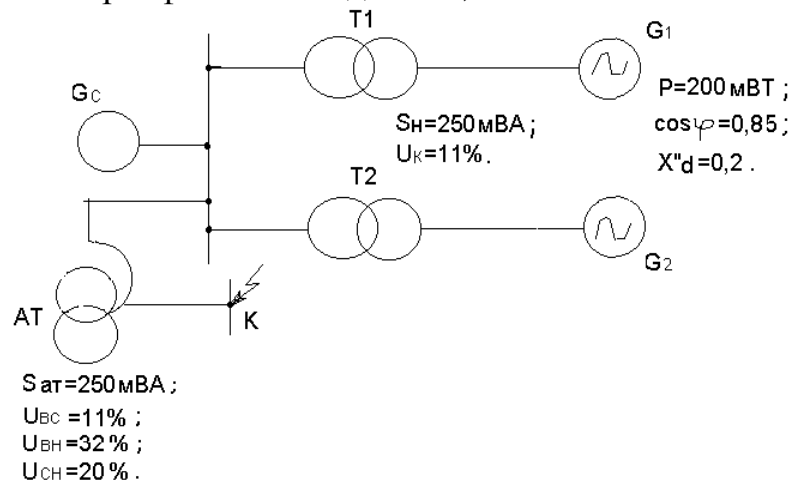
$$\gamma_t = \frac{I_{\Gamma t}}{I_{\Gamma 0}} = 1,5.$$

Определяем периодическую составляющую тока КЗ для момента времени $t=0,5$ с

$$I_{\Gamma t} = \gamma_t \cdot I_{\Gamma 0(H)} \cdot I_{\text{СУММГ}} = 1,5 \cdot 1,68 \cdot 1,18 = 2,79 \text{ кА.}$$

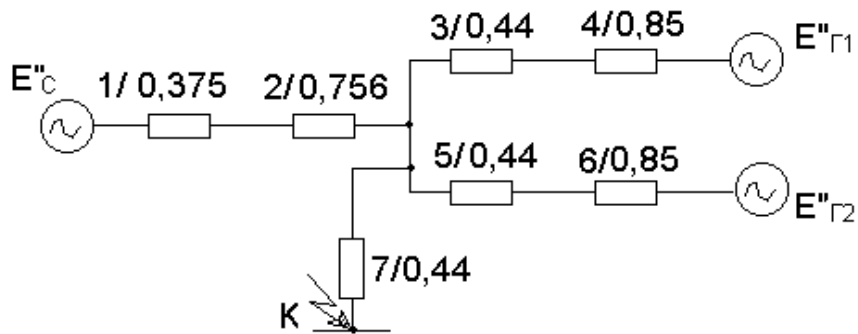
Пример 9.2

Определить ток трехфазного КЗ для $t=0,1$ с.



1. Базисные условия: $S_{\text{б}} = 1000 \text{ МВ} \cdot \text{А}, U_{\text{б}} = 115 \text{ кВ};$

2. Схема замещения



$$\dot{A}''_{\bar{A}} = U + I \cdot X_d'' \cdot \sin \varphi = 1 + 1 \cdot 0,2 \cdot 0,527 = 1,105;$$

$$X_1 = X_{0*(H)}'' \cdot \frac{S_B}{S_H} = 0,3 \cdot \frac{1000}{800} = 0,375;$$

$$X_2 = 0,4 \cdot 100 \cdot \frac{1000}{230^2} = 0,756;$$

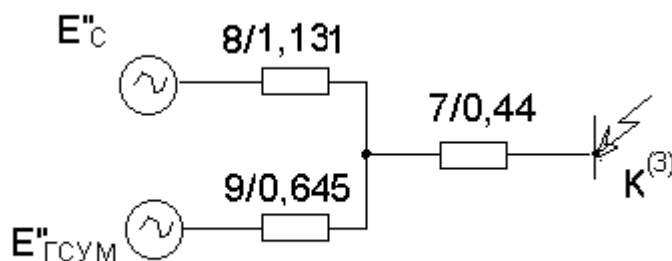
$$X_3 = X_5 = \frac{100}{100} \cdot \frac{1000}{250} = 0,44;$$

$$X_4 = X_6 = 0,2 \cdot \frac{1000 \cdot 0,85}{200} = 0,85;$$

$$X_7 = \frac{11}{100} \cdot \frac{1000}{250} = 0,4;$$

$$X_8 = X_1 + X_2 = 0,375 + 0,156;$$

$$X_9 = \frac{X_3 + X_4}{2} = \frac{0,44 + 0,85}{2} = 0,645;$$



$$X_{СУМ} = \frac{X_8 \cdot X_9}{X_8 + X_9} + X_7 = \frac{1,131 \cdot 0,645}{1,131 + 0,645} + 0,44 = 0,85;$$

$$E_{C\hat{O}\hat{I}}'' = \frac{E_C'' \cdot X_9 + E_{C\hat{O}\hat{I}\hat{A}}'' \cdot X_8}{X_8 + X_9} = \frac{1 \cdot 0,645 + 1,105 \cdot 1,131}{0,645 + 1,131} = 1,07;$$

$$I_{*KO(\hat{\sigma})} = \frac{E_{CUM}''}{X_{CUM}} = \frac{1,07}{0,85} = 1,26;$$

$$I_{*GO(\hat{\sigma})} = \frac{E_{GO}'' - I_{KO} \cdot X_7}{X_G} = \frac{1,105 - 1,26 \cdot 0,44}{0,645} = 0,854.$$

Ток генераторной ветви в относительных единицах:

$$I_{HG} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 115 \cdot 0,85} = 2,37 \text{ кА};$$

$$I_{*GO(H)} = I_{*GO(\hat{\sigma})} \cdot \frac{I_{\hat{\sigma}}}{I_{HG}} = 0,854 \cdot \frac{5,026}{2,37} = 1,81 \text{ кА}.$$

По кривым рис. 8.3 $I_{gt}/I_{go}=f(t)$ для $t=0,1$ с определяем:

$$I_{*GO} / I_{GO} = 0,94;$$

$$I_{GO} / I_{KO} = \frac{0,854}{1,26} = 0,678.$$

По кривым рис. 8.3 определяем:

$$I_{K0,1} / I_{KO} = 0,965.$$

Ток в точке К в именованных единицах:

$$I_{K0,1} = 0,965 \cdot 1,26 \cdot 5,026 = 6,05 \text{ кА}.$$

Домашнее задание № 7

Для схемы домашнего задания № 2 рассчитать ток через 0,2 с с помощью типовых кривых.

10. РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЭВМ

При проектировании и эксплуатации электроустановок и систем для решения многих технических вопросов требуется провести ряд расчетов, среди которых заметное место занимают расчеты электромагнитных переходных процессов.

Под расчетом электромагнитного переходного процесса обычно понимают вычисление токов и напряжений в рассматриваемой схеме при заданных условиях.

В зависимости от назначения такого расчета находят указанные величины для заданного момента времени или находят их изменение в течение всего переходного процесса. При этом решение обычно проводят для одной или нескольких ветвей.

В решении задач по определению токов КЗ можно выделить следующие основные этапы:

1. Выбор расчетных условий: выбор вида и момента времени КЗ, местоположения КЗ, предшествующего режима, расчетной схемы.
2. Определение параметров расчетной схемы.
3. Составление схемы замещения. Схему замещения выполняют в однолинейном исполнении.
4. Расчет токов КЗ.

После составления схемы замещения расчет режима КЗ представляет собой задачу нахождения токов и напряжений в схеме с известными для нее сопротивлениями и приложенными ЭДС. Простота описания топологии расчетной схемы и удобство программирования вычислительного процесса в MСADe позволяют значительно облегчить расчет токов КЗ в относительно сложных схемах без упрощения последних, определить значения токов во всех элементах электрической сети и снижение уровней напряжения во всех узлах схемы, быстро и просто моделировать режим трехфазного КЗ в различных точках электрической сети.

Программа расчета электрической цепи в MСADe состоит из следующих частей:

1. Задание численных значений переменным, соответствующим сопротивлениям элементам электрической сети, напряжениям источников ЭДС, коэффициентам трансформации, и указать напряжение ступени, к которой будет производиться приведение параметров схемы замещения.

2. Описание топологии расчетной схемы замещения электрической сети и параметры ее узлов и ветвей. Здесь задаются:

- а) общие характеристики схемы замещения:
 - количество узлов в схеме K_u ;
 - количество ветвей в схеме K_w ;

- номер балансирующего узла B_u ;
- б) параметры узлов схемы замещения:
 - номера узлов на схеме N ;
 - номинальные напряжения в узлах $U_{нж}$;
 - расчетные коэффициенты приведения напряжений в узлах к основной ступени напряжения;
- в) параметры ветвей схемы замещения.
 1. Загрузить в среду MCAD файл для расчета токов короткого замыкания TKZ.MCD и перезаписать его с новым именем NAME, соответствующим пользователю.
 2. Задать значения сопротивлений и ЭДС элементов расчетной схемы замещения.
 3. Задать напряжение основной ступени напряжения $U_{осн}$, к которой должны быть приведены все параметры схемы замещения.
 4. Задать коэффициенты трансформации K , которые имеются в расчетной схеме.
 5. Задать топологические параметры схемы:
 - количество узлов K_u ,
 - количество ветвей K_w ,
 - номер балансирующего узла B_u .
 6. Заполнить массивы параметров узлов схемы замещения:
 - N_i – номер i -го узла на схеме замещения,
 - U_{ni} – номинальное напряжение в i -ом узле;
 - $K_{n_пр}$ – коэффициент приведения напряжения в i -ом узле к основной ступени напряжения, вычисляемые через коэффициенты трансформации, указанные в п. 4.
 7. Заполнить массивы параметров ветвей схемы замещения:
 - N_{nj} – номер начала j -ой ветви;
 - N_{kj} – номер конца j -ой ветви;
 - $X_{в}$ – реактивное сопротивление j -ой ветви, Ом;
 - $E_{в}$ – ЭДС j -ой ветви, кВ;
 - $K_{в_пр}$ – коэффициент приведения ЭДС в i -ой ветви к основной ступени напряжения, вычисляемые через коэффициенты трансформации, указанные в п. 4.
 8. Произвести расчет токов в ветвях и напряжений в узлах при трехфазном КЗ в заданной точке. Результаты расчета вывести на печатающее устройство.

Домашнее задание № 8

Произвести расчет тока КЗ для схемы домашнего задания № 2.

11. ПОПЕРЕЧНАЯ НЕСИММЕТРИЯ

11.1. Общие положения

Расчеты токов трехфазных КЗ в трехфазных симметричных сетях производятся на одну фазу вследствие подобия явлений, происходящих в каждой из фаз и равенства значений одноименных величин.

При несимметрии в произвольной точке системы сопротивления в фазах неодинаковы и по этим причинам явления по фазам различны. Неодинаковы в этом случае токи, напряжения и углы сдвига между ними в различных фазах. Для определения токов и напряжений в любой фазе несимметричной системы необходимо составить схему замещения и написать необходимое число уравнений с учетом взаимоиндукции, что усложняет решение задач.

Сравнительно просто расчеты несимметричных режимов в трехфазных сетях осуществляются с помощью метода симметричных составляющих. Вычисление токов и напряжений в этом случае сводятся к определению этих величин при некотором фиктивном трехфазном КЗ, что дает возможность вновь воспользоваться однолинейной схемой замещения и произвести расчет на одну фазу. В этом заключается одно из основных достоинств метода симметричных составляющих.

11.2. Метод симметричных составляющих

В соответствии с методом симметричных составляющих произвольную несимметричную систему трех векторов \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} можно разложить однозначно на три симметричные системы:

систему векторов прямой последовательности \underline{A}_1 ; \underline{B}_1 ; \underline{C}_1 ;
систему векторов обратной последовательности \underline{A}_2 ; \underline{B}_2 ; \underline{C}_2 ;
систему векторов нулевой последовательности \underline{A}_0 ; \underline{B}_0 ; \underline{C}_0 .
Согласно условию разложения имеем:

$$\begin{aligned}\underline{A} &= \underline{A}_1 + \underline{A}_2 + \underline{A}_0, \\ \underline{B} &= \underline{B}_1 + \underline{B}_2 + \underline{B}_0, \\ \underline{C} &= \underline{C}_1 + \underline{C}_2 + \underline{C}_0.\end{aligned}\tag{11.1}$$

Для сведения уравнений (11.1) к трем неизвестным вводят оператор фазы \mathbf{a} . Модуль оператора фазы равен 1. Таким образом, если любой вектор умножить на \mathbf{a} , то модуль вектора не изменится, а лишь произойдет его поворот на 120° против часовой стрелки. Благодаря этому свойству можно векторы каждой из симметричных систем (прямой, обратной, нулевой) вы-

разить через один вектор той же системы, т. е. три неизвестных в уравнении (11.1) свести к одному.

Оператор фазы \mathbf{a} определяется из соотношений:

$$\mathbf{a} = e^{j120^\circ} = \cos 120^\circ + j \sin 120^\circ = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2};$$

$$\mathbf{a}^2 = e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2}; \quad \mathbf{a}^3 = e^{j360^\circ} = 1.$$

Если принять в качестве основной фазу $\underline{\mathbf{A}}$, то систему (11.1) при помощи оператора фазы \mathbf{a} можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} \underline{\mathbf{A}} &= \underline{\mathbf{A}}_1 + \underline{\mathbf{A}}_2 + \underline{\mathbf{A}}_0, \\ \underline{\mathbf{B}} &= \mathbf{a}^2 \underline{\mathbf{A}}_1 + \mathbf{a} \underline{\mathbf{A}}_2 + \underline{\mathbf{A}}_0, \\ \underline{\mathbf{C}} &= \mathbf{a} \underline{\mathbf{A}}_1 + \mathbf{a}^2 \underline{\mathbf{A}}_2 + \underline{\mathbf{A}}_0. \end{aligned} \quad (11.2)$$

Совместное решение системы уравнений (11.2) дает:

$$\begin{aligned} \underline{\mathbf{A}}_1 &= (\underline{\mathbf{A}} + \mathbf{a} \underline{\mathbf{B}} + \mathbf{a}^2 \underline{\mathbf{C}}) / 3, \\ \underline{\mathbf{A}}_2 &= (\underline{\mathbf{A}} + \mathbf{a}^2 \underline{\mathbf{B}} + \mathbf{a} \underline{\mathbf{C}}) / 3, \\ \underline{\mathbf{A}}_0 &= (\underline{\mathbf{A}} + \underline{\mathbf{B}} + \underline{\mathbf{C}}) / 3. \end{aligned} \quad (11.3)$$

11.3. Основные уравнения

ЭДС симметричного трехфазного источника питания образуют симметричную систему векторов прямой последовательности. При нормальной симметричной нагрузке или при трехфазном КЗ такая ЭДС способна вызвать только токи прямой последовательности, так как напряжения и ЭДС других последовательностей в таких режимах отсутствуют.

При несимметричных КЗ в месте повреждения возникают несимметричные напряжения вследствие нарушения симметрии режима. Вся схема в целом и по частям продолжает оставаться симметричной. Появляющиеся при этом токи обратной и нулевой последовательности вызывают в элементах схемы соответствующие магнитные потоки и падения напряжения.

ЭДС контуров токов обратной и нулевой последовательности можно учитывать падением напряжения в реактивном сопротивлении машины той или иной последовательности. В силу указанных соображений можно считать, что при любом режиме генератор вырабатывает ЭДС только прямой последовательности, а ЭДС обратной и нулевой последовательности генератора равны нулю.

В соответствии с изложенным для произвольного несимметричного КЗ основные уравнения в соответствии с вторым законом Кирхгофа отдельно для каждой последовательности будут иметь вид:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{K1} &= \underline{E} - \underline{Z}_1 \cdot \underline{I}_{K1}; \\ \underline{U}_{K2} &= 0 - \underline{Z}_2 \cdot \underline{I}_{K2}; \\ \underline{U}_{K0} &= 0 - \underline{Z}_0 \cdot \underline{I}_{K0},\end{aligned}\tag{11.4}$$

где \underline{U}_{K1} , \underline{U}_{K2} , \underline{U}_{K0} , \underline{I}_{K1} , \underline{I}_{K2} , \underline{I}_{K0} – симметричные составляющие напряжения и тока в месте КЗ; \underline{E} – результирующая ЭДС схемы прямой последовательности относительно точки КЗ; \underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 , \underline{Z}_3 – результирующие сопротивления схем соответствующих последовательностей относительно точки КЗ.

Уравнения (11.4) содержат шесть неизвестных величин: три составляющие напряжения и три составляющие тока. Недостающие уравнения для определения неизвестных величин получают из граничных условий, которыми характеризуется тот или иной вид несимметричного повреждения.

11.4. Сопротивления различных последовательностей элементов электрических систем

11.4.1. Общие положения

Все сопротивления, которыми характеризуются отдельные элементы в нормальном симметричном режиме, а также в симметричном переходном процессе, по существу, являются сопротивлениями прямой последовательности. Этот термин раньше не вводился, так как в схеме протекали токи лишь прямой последовательности. При отсутствии взаимной индукции между фазами какого-либо элемента его сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательности одинаковы, так как они обусловлены только собственной индуктивностью фазы $X_1 = X_2 = X_0$.

При наличии магнитной связи между фазами реактивное сопротивление определяется с учетом взаимной индуктивности, которое зависит от того, какая последовательность токов протекает по фазам. Для элемента, магнитосвязанные цепи которого неподвижны друг относительно друга, сопротивления прямой и обратной последовательностей одинаковы, так как от перемены чередования фаз взаимная индукция между фазами такого элемента не изменяется.

Таким образом, для трансформаторов, воздушных и кабельных линий, реакторов $X_1 = X_2$.

Сопротивление нулевой последовательности всех элементов резко отличается от сопротивления прямой и обратной последовательностей, так как в этом случае взаимная индукция сказывается иначе в силу того, что система токов нулевой последовательности совпадает по фазам, в то время как токи прямой и обратной последовательностей по фазам сдвинуты на

120°. Кроме того, на величину сопротивления нулевой последовательности оказывает существенное влияние схема соединения фаз рассматриваемого элемента и режим нейтрали.

11.4.2. Сопротивления обратной и нулевой последовательности синхронных машин

Реактивное сопротивление обратной последовательности синхронных машин зависит от симметрии ротора. Токи обратной последовательности создают магнитный поток, который вращается относительно статора с синхронной скоростью в обратном направлении вращения ротора и, следовательно, вращается относительно ротора с двойной синхронной частотой. При своем перемещении этот поток встречает различное сопротивление в расточке статора, поочередно совпадая то с продольной, то с поперечной осью ротора. Если воздушный зазор одинаков по всей окружности расточки машины и ротор симметричен, то в своем перемещении поток обратной последовательности всюду встречает одинаковое сопротивление, как и поток прямой последовательности, в силу чего реактивное сопротивление обратной последовательности мало отличается от сверхпереходного реактивного сопротивления.

Значения реактивного сопротивления обратной последовательности приводятся в каталогах и справочниках как параметры машины. При отсутствии таких данных в качестве приближенных значений можно принимать:

- для турбогенераторов и машин с демпферными обмотками $X_2 = 1,22 X_d''$;
- для машин без демпферных обмоток $X_2 = 1,45 X_d'$.

В практических приближенных расчетах токов, при удаленном КЗ, допускается еще большее упрощение: $X_2 = X_d''$.

Реактивное сопротивление нулевой последовательности. Токи нулевой последовательности синхронных машин создают потоки, одинаковые и совпадающие по времени. Но так как фазовые обмотки машины сдвинуты по окружности статора на 120° электрических градусов, потоки нулевой последовательности машины оказываются сдвинутыми в пространстве друг относительно друга на 120°. В силу этого обстоятельства можно считать, что результирующий поток нулевой последовательности синхронных машин определяется потоками рассеяния пазов и лобовых частей.

Реактивное сопротивление рассеяния будет неодинаковой при протекании токов разных последовательностей. Для токов нулевой последовательности сопротивление рассеяния меньше, чем для токов прямой и обратной последовательности, причем это уменьшение зависит от типа обмотки. Поэтому величина реактивного сопротивления нулевой последовательности синхронных машин колеблется в широком диапазоне: $X_0 = (0,15...0,7)X_d''$.

11.4.3. Сопротивление обратной последовательности нагрузки

Чтобы установить величину реактивного сопротивления обратной последовательности обобщенной нагрузки, необходимо сначала оценить величину X_2 асинхронных двигателей, из которых преимущественно состоит эта нагрузка.

Если в нормальных условиях асинхронный двигатель работает со скольжением s , то по отношению к магнитному потоку обратной последовательности ротор двигателя имеет скольжение **2...5 %**. С увеличением скольжения реактивное сопротивление асинхронного двигателя снижается (благодаря большему проявлению ответной реакции ротора), при этом с достаточной для практических целей точностью можно принимать: $X_2 = X_s = X_k$, т. е. реактивное сопротивление обратной последовательности асинхронного двигателя равно его реактивному сопротивлению КЗ.

Таким образом, реактивное сопротивление обратной последовательности обобщенной нагрузки практически можно принимать такой же, как и для начального момента КЗ, т. е. $X_{2*} = 0,35 \text{ ОЕ}$, считая ее отнесенной к полной мощности нагрузки и среднему напряжению той ступени, где она подключена.

11.4.4. Сопротивление нулевой последовательности реакторов

Реактивное сопротивление реакторов в основном определяется их самоиндукцией. Взаимоиндукция между фазами реактора настолько мала, что практически ею можно пренебречь. По этой причине реактивное сопротивление нулевой последовательности реактора можно считать равным реактивному сопротивлению прямой последовательности, т. е. $X_0 = X_1$.

11.4.5. Сопротивление нулевой последовательности трансформаторов

Реактивное сопротивление нулевой последовательности трансформаторов зависит от схемы соединения обмоток и их конструкции.

Прежде всего выясним, в какой мере влияет каждый из этих факторов на величину реактивного сопротивления нулевой последовательности, и лишь после этого обратимся к количественной оценке его величины для трансформаторов.

Если к обмотке, соединенной в треугольник, приложить напряжение нулевой последовательности, то в силу равенства потенциалов каждой из фаз разность потенциалов (напряжения) между любыми фазами равна нулю, следовательно, ток по обмотке, соединенной в треугольник, протекать не будет. К аналогичному выводу можно прийти, если напряжение нуле-

вой последовательности приложено к обмотке, соединенной в звезду без заземленной нейтрали.

Таким образом, сопротивления нулевой последовательности трансформатора со стороны его обмотки, соединенной треугольником (Δ) (рис. 11.1 а) или звездой без заземленной нейтрали (Y) (рис. 11.1 в), всегда равно бесконечности ($X_0 = \infty$), так как приложенное напряжение нулевой последовательности со стороны указанных обмоток не может вызвать в трансформаторе тока нулевой последовательности независимо от схемы соединения других его обмоток.

Обратимся к количественной оценке реактивного сопротивления нулевой последовательности трансформаторов.

При соединении обмоток Y_0/Δ (рис. 11.1 а) ЭДС нулевой последовательности вторичных обмоток будут вызывать соответствующие токи, которые циркулируют только в этих обмотках, не выходя за их пределы. Это позволяет в схеме замещения замкнуть концы вторичной обмотки на нулевой провод. Тогда значение сопротивления X_0 может быть записано так:

$$X_0 = X_B + \frac{X_H \cdot X_{\mu 0}}{X_{\mu 0} + X_H} = X_B + \frac{X_H}{1 + X_H/X_{\mu 0}} \approx X_B + X_H = X_1.$$

Имея ввиду, что величина X_H значительно меньше $X_{\mu 0}$ ($X_{\mu 0}/X_H \approx 20$), можно считать, что и для трехстержневого трансформатора с соединением обмоток Y_0/Y_0 (рис. 11.1 б) $X_0 \approx X_1$.

Для трехфазных групп однофазных трансформаторов или четырех и пятистержневых трансформаторов при соединении обмоток Y_0/Y_0 с учетом $X_{\mu 0} = \infty$ имеем: $X_0 \approx X_B + X_H = X_1$.

Для трехобмоточных трансформаторов (рис. 11.2) имеем:

На рис. 11.2 а ток нулевой последовательности в обмотке С не протекает, следовательно, $X_0 = X_B + X_H = X_{B-H}$.

На рис. 11.2 б путь токов нулевой последовательности на стороне С обмотки обеспечен, следовательно, в схему нулевой последовательности трансформатор вводится полной схемой замещения.

На рис. 11.2 в ток нулевой последовательности протекает по всем обмоткам трансформатора $X_0 = X_B + X_H \cdot X_C / (X_H + X_C)$.

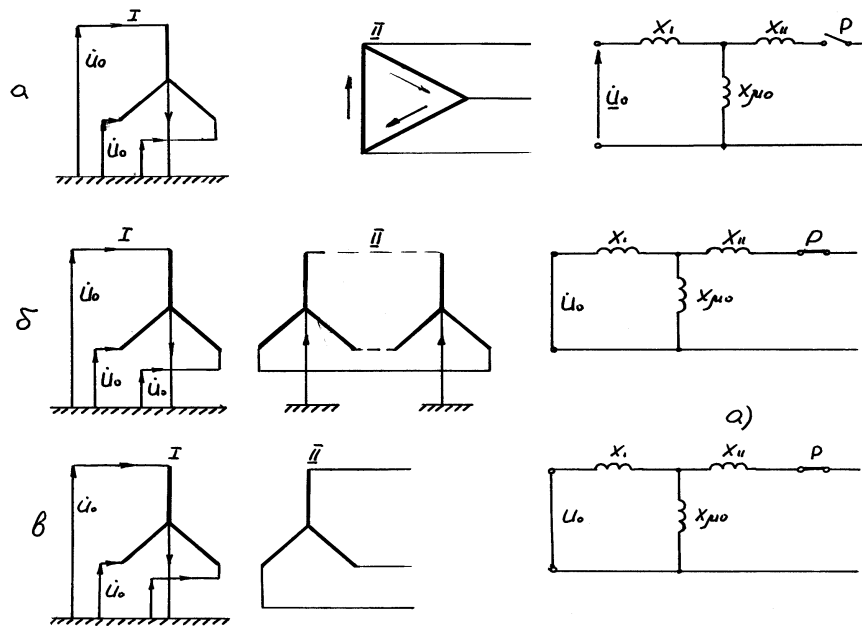


Рис. 11.1. К определению X_0 двухобмоточных трансформаторов: а – при соединении обмоток Y_0/Δ ; б – при соединении обмоток Y_0/Y_0 ; в – при соединении обмоток Y_0/Y

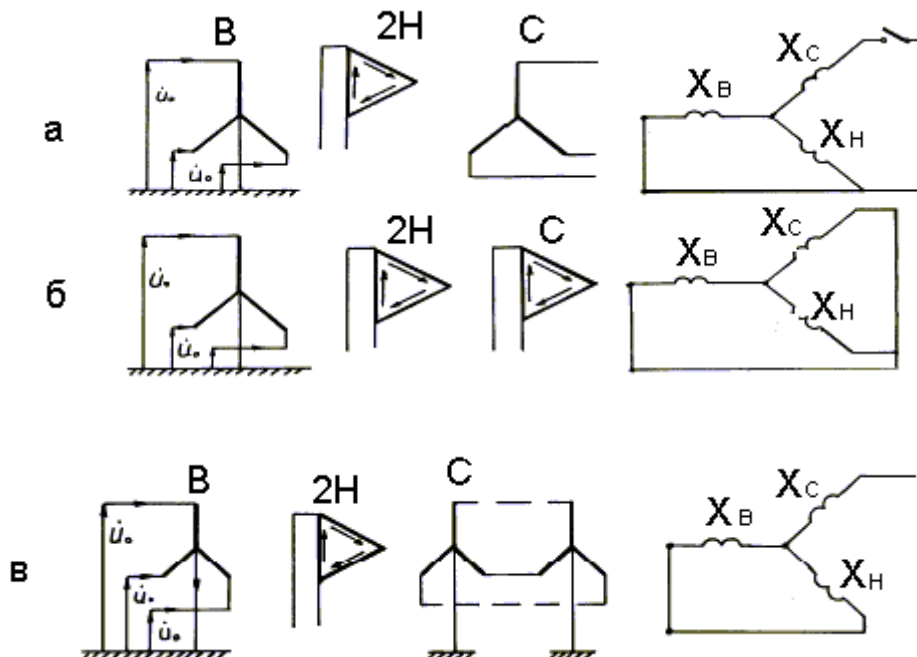


Рис. 11.2. Схемы замещения трехобмоточных трансформаторов для токов нулевой последовательности

11.4.6. Сопротивление нулевой последовательности воздушных ЛЭП

В практических расчетах используют приближенные значения сопротивлений нулевой последовательности, считая, что:

для одноцепных линий без грозозащитных тросов $X_0 = 3,5 X_1$;

для одноцепных линий с грозозащитными тросами $X_0 = 3,0 X_1$;

для двухцепных линий без грозозащитных тросов $X_0 = 5,5 X_1$;

для двухцепных линий с грозозащитными тросами $X_0 = 4,7 X_1$.

Таблица 11.1

Наименование элемента	Трехфазное КЗ		Прямая последовательность	Обратная последовательность	Нулевая последовательность
	ИЕ	ОЕ			
Синхронный генератор	$X_d'' \cdot \frac{U_H^2}{S_H}$	$X_d'' \cdot \frac{S_{\sigma}}{S_H}$	$X_1 = X^{(3)}$	без ДО $X_2 = 1,45 X_d'$ с ДО $X_2 = 1,22 X_d''$	$X_0 = (0,15 \dots 0,7) X_1$
Воздушная ЛЭП	$x_0 \cdot l$	$X_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\sigma}}{U_{\text{Л}}^2}$	$X_1 = X^{(3)}$	$X_2 = X_1$	одноцепная с тросами $X_0 = 3,0 X_1$, одноцепная без тросов $X_0 = 3,5 X_1$, двухцепная с тросами $X_0 = 4,7 X_1$ двухцепная без тросов $X_0 = 5,5 X_1$
Кабельная ЛЭП	$x_0 \cdot l$	$X_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\sigma}}{U_{\text{Л}}^2}$	$X_1 = X^{(3)}$	$X_2 = X_1$	$X_0 = (3,5 \dots 4,7) X_1$, $R_0 = 10 \text{ r L}$
Токоогранич. реактор	$\frac{X_p \%}{100} \cdot \frac{U_H}{\sqrt{3} \cdot I_H}$	$\frac{X_p \%}{100} \cdot \frac{I_{\sigma} U_H}{I_H U_{\sigma}}$	$X_1 = X^{(3)}$	$X_2 = X_1$	$X_0 = X_1$
Асинхронный двигатель	$0,2 \cdot \frac{U_H^2}{S_H}$ $E'' = 0,9 U_H$	$0,2 \cdot \frac{S_{\sigma}}{S_H}$ $E'' = 0,9$	$X_1 = X^{(3)}$	$X_2 = X_1$	$X_0 = (0,15 \dots 0,7) X_1$
Обобщенная нагрузка	$0,35 \cdot \frac{U_H^2}{S_H}$ $E_H'' = 0,8 U_H$	$0,35 \cdot \frac{S_{\sigma}}{S_H}$ $E_{H^*}'' = 0,8$	$X_1 = X^{(3)}$	$X_2 = X_1$	Определяется элементами
Двухобмот. трансформ.	$\frac{U_k \%}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_H}$	$\frac{U_k \%}{100} \cdot \frac{S_{\sigma}}{S_H}$	$X_1 = X^{(3)}$	$X_2 = X_1$	Определяется соединением обмоток
Синхронный двигатель, компенс.	$0,2 \cdot \frac{U_H^2}{S_H}$ $E'' = 1,1 U_H$	$0,2 \cdot \frac{S_{\sigma}}{S_H}$ $E_*'' = 1,1$	$X_1 = X^{(3)}$	$X_2 = 1,22 X_1$ допускается $X_2 = X_1$	$X_0 = (0,15 \dots 0,7) X_1$

11.4.7. Сопротивление нулевой последовательности кабелей

Токи нулевой последовательности возвращаются по оболочке кабеля и по земле. Оболочка кабеля оказывает такое же влияние, как и трос в воздушных линиях, т. е. увеличивает сопротивление нулевой последовательности. Величины сопротивления нулевой последовательности для кабелей в приближенных расчетах принимаются:

$$X_0=(3.5...4.7)X_1; R_0=10R_1,$$

где R_1 и X_1 – соответственно, активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности кабеля.

Формулы для определения сопротивлений прямой, обратной и нулевой последовательности элементов системы электроснабжения приведены в табл. 11.1.

11.5. Схемы отдельных последовательностей

При применении метода симметричных составляющих к расчету несимметричного переходного или установившегося возникает необходимость в составлении схем замещения всех трех последовательностей (прямой, обратной, нулевой).

Из схем замещения находят результирующие сопротивления отдельных последовательностей относительно места несимметрии. Из схемы замещения прямой последовательности, помимо того, находят результирующую ЭДС относительно той же точки. Рассмотрим принципы схем прямой, обратной и нулевой последовательностей для расчетной схемы, приведенной на рис. 11.3 а.

Схема прямой последовательности. Схема прямой последовательности является обычной схемой (рис. 11.3 б), которую составляют при расчете любого симметричного трехфазного режима. При применении метода расчетных кривых генераторы должны быть введены в схему замещения их сверхпереходными сопротивлениями, а нагрузки следует исключить.

Началом схемы прямой последовательности считают точку, в которой объединены свободные концы всех генерирующих и нагрузочных ветвей (если расчет ведется аналитическим методом). Это точка нулевого потенциала схемы прямой последовательности. Концом схемы прямой последовательности считают точку, где возникла рассматриваемая несимметрия.

Схема обратной последовательности. Поскольку пути циркуляции токов обратной последовательности те же, что и токов прямой последовательности, схема обратной последовательности по структуре аналогична схеме прямой последовательности и состоит из тех же элементов (рис. 11.3 в). Различие между ними состоит прежде всего в том, что в схеме обратной последовательности ЭДС всех генерирующих ветвей принимаются равными нулю,

кроме того, генераторы и нагрузки (при необходимости их учета) входят в нее своими реактивными сопротивлениями обратной последовательности, а все остальные элементы – теми же реактивными сопротивлениями, что и в схему прямой последовательности.

Началом и концом схемы обратной последовательности считаются, соответственно, те же точки, что и для схемы прямой последовательности.

Схема нулевой последовательности. Ток нулевой последовательности по существу является однофазным током, разветвленным между тремя фазами и возвращающимся через землю и параллельные ей цепи. В силу этого путь циркуляции токов нулевой последовательности резко отличается от пути, по которому проходят токи прямой и обратной последовательности. Схема нулевой последовательности в значительной мере определяется соединением обмоток трансформаторов.

Составление схемы нулевой последовательности следует начинать от точки КЗ, считая, что в этой точке все фазы замкнуты между собой коротко и к ней приложено напряжение нулевой последовательности.

Замкнутый контур для токов нулевой последовательности возможен только в том случае, если в цепи, электрически связанной с точкой КЗ, имеется, по меньшей мере, одна заземленная нейтраль или четвертый провод.

При наличии нескольких заземленных нейтралей в этой цепи образуется несколько параллельных контуров для токов нулевой последовательности.

Трансформация токов нулевой последовательности возможна только при соблюдении определенных условий. Так, если трансформатор имеет соединение обмоток Y_0/Δ , то ток нулевой последовательности в звезде наводит в треугольнике ток, который, протекая по фазам треугольника, не выходит за его пределы. Вся сеть, которая присоединена со стороны треугольника, в схему нулевой последовательности не входит, независимо от того, имеются ли в ней заземленные нейтрали или их нет.

В трансформаторе с соединением обмоток Y_0/Y_0 трансформация токов нулевой последовательности возможна при условии, что в каждой обмотке обеспечен путь для этих токов. При соблюдении этого условия в схему нулевой последовательности входят как трансформатор, так и все элементы, по которым протекают токи нулевой последовательности с обеих сторон трансформатора.

Сопротивление, через которое заземлена нейтраль трансформатора, двигателя, нагрузки, должно быть введено в схему нулевой последовательности утроенной величиной. Это обусловлено тем, что схему замещения составляют на одну фазу, а через указанное сопротивление протекает сумма токов нулевой последовательности всех трех фаз.

Началом схемы нулевой последовательности считают точку, в которой объединены ветви с нулевым потенциалом, а ее концом – точку, где возникла несимметрия.

Порядок составления схемы замещения нулевой последовательности следующий:

1. Схема представляется в трехфазном исполнении.
2. Составление схемы начинают от точки, где возникла несимметрия, считая, что в этой точке все фазы замкнуты между собой накоротко и к ней приложено напряжение нулевой последовательности.
3. Исходя из направления токов в точке несимметрии, устанавливают направление протекания токов нулевой последовательности во всех элементах, у которых имеются пути протекания токов нулевой последовательности.
4. Сопротивление, через которое заземлены нейтралю трансформатора, генератора, двигателя, нагрузки, должно быть введено в схему нулевой последовательности утроенной величиной.

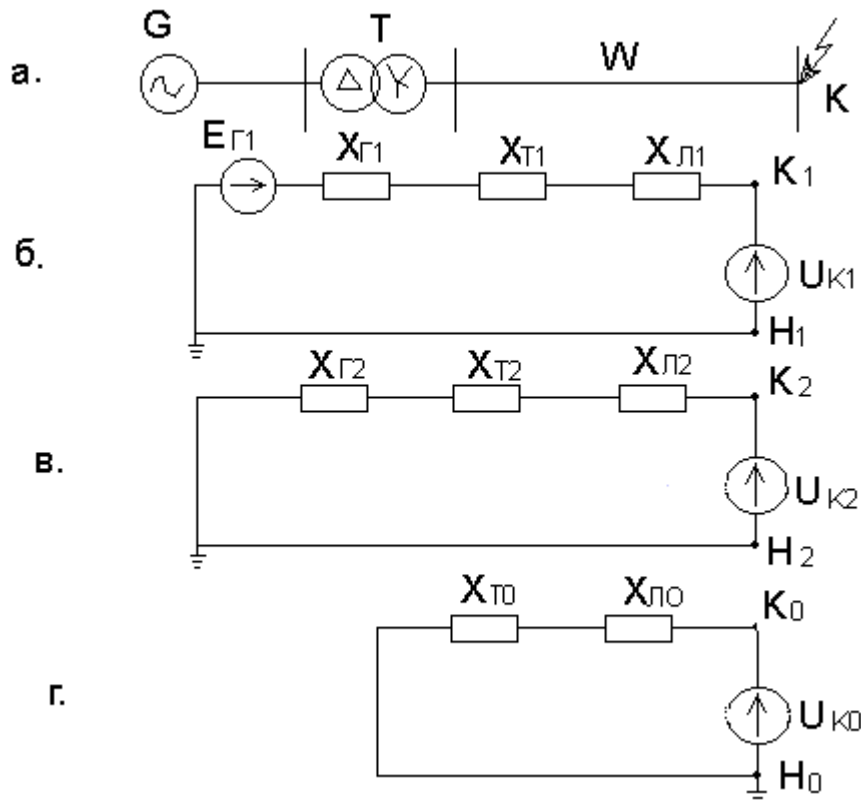


Рис. 11.3. Расчетная схема (а) и схемы замещения прямой (б), обратной (в) и нулевой последовательности (г)

Из схем отдельных последовательностей находят результирующую ЭДС E_c и результирующие X_{1c} , X_{2c} , X_{0c} .

11.6. Правило эквивалентности прямой последовательности

Из выражений для симметричных составляющих токов и напряжений в месте несимметричного КЗ (табл. 11.2) замечаем, что токи обратной и нулевой последовательности и напряжения всех последовательностей пропорциональны току прямой последовательности в месте КЗ. Следовательно, задача расчета любого несимметричного КЗ прежде всего состоит в вычислении тока прямой последовательности в месте рассматриваемого вида КЗ.

Величина тока прямой последовательности определяется так:

– при двухфазном КЗ:

$$\underline{I}_K^2 = \frac{\underline{E}_C}{j(X_{1C} + X_{2C})};$$

– при однофазном КЗ:

$$\underline{I}_K^1 = \frac{\underline{E}_C}{j(X_{1C} + X_{2C} + X_{0C})};$$

– при двухфазном КЗ на землю:

$$\underline{I}_K^{1,1} = \frac{\underline{E}_C}{j\left(X_{1C} + \frac{X_{2C} \cdot X_{0C}}{X_{2C} + X_{0C}}\right)}.$$

Структура приведенных выражений позволяет ток прямой последовательности при любом (**n**) виде несимметричного КЗ выразить в общем виде:

$$\underline{I}_K^n = \frac{\underline{E}_C}{j(X_{1C} + X^{(n)})},$$

где $X^{(n)}$ – дополнительная реактивность, величина которой для каждого вида КЗ определяется только значениями **X_{2C}** и **X_{0C}**.

Таблица 11.2

Определяемая величина	Виды КЗ		
	К(2)	К(1)	К(1,1)
1	2	3	4
Токи в месте КЗ			
а) прямой последовательности в фазе А \underline{I}_{KA1}	$\underline{E}_A / j(X_1 + X_2)$ $-\underline{I}_{KA1}$	$\underline{E}_A / j(X_1 + X_2 + X_0)$ \underline{I}_{KA1}	$\underline{E}_A / j(X_1 + X_2 \parallel X_0)$ $-\underline{I}_{KA1} Z_0 / (Z_0 + Z_2)$
б) обратной последовательности в фазе А \underline{I}_{KA2}	0	\underline{I}_{KA1}	$-\underline{I}_{KA1} Z_2 / (Z_0 + Z_2)$
в) Нулевой последовательности			\underline{I}_{KA0}

1	2	3	4
Полный ток КЗ			
а) в фазе А \underline{I}_{KA}	0	$3\underline{I}_{KA1}$	0
б) в фазе В \underline{I}_{KB}	$-j\sqrt{3}\underline{I}_{KA1}$	0	$\underline{I}_{KA1}(a^2 - Z_2 + aZ_0 / (Z_2 + Z_0))$
в) в фазе С \underline{I}_{KC}	$j\sqrt{3}\underline{I}_{KA1}$	0	$\underline{I}_{KA1}(a - Z_2 + aZ_0 / (Z_2 + Z_0))$
Напряжения в месте КЗ			
а) прямой последовательности \underline{U}_{KA1}	$\underline{I}_{KA1} Z_2$	$\underline{I}_{KA1}(Z_2 + Z_0)$	$\underline{I}_{KA1} Z_2 Z_0 / (Z_2 + Z_0)$
б) обратной последовательности \underline{U}_{KA2}	$\underline{I}_{KA1} Z_2$	$-\underline{I}_{KA1} Z_0$	$\underline{I}_{KA1} Z_2 Z_0 / (Z_2 + Z_0)$
в) нулевой последовательности \underline{U}_{KA0}	0	$-\underline{I}_{KA1} Z_0$	$\underline{I}_{KA1} Z_2 Z_0 / (Z_2 + Z_0)$
г) фазы А \underline{U}_{KA}	$2\underline{I}_{KA1} Z_2$	0	$3\underline{I}_{KA1} Z_2 Z_0 / (Z_2 + Z_0)$
д) фазы В \underline{U}_{KB}	$-\underline{I}_{KA1} Z_2$	$\underline{I}_{KA1}[(a^2 - a)Z_2 + (a^2 - 1)Z_0]$	0
е) фазы С \underline{U}_{KC}	$\underline{I}_{KA1} Z_2$	$\underline{I}_{KA1}[(a - a^2)Z_2 + (a - 1)Z_0]$	0

Таблица 11.3

Значения дополнительного реактанса $X(n)$ и коэффициента $m(n)$

Вид КЗ	(n)	X (n)	m(n)
трехфазное	(3)	0	1
двухфазное	(2)	X_2	$\sqrt{3}$
однофазное	(1)	$X_2 + X_0$	3
двухфазное на землю	(1,1)	$X_2 X_0 / (X_2 + X_0)$	$\sqrt{3}\sqrt{1 - X_2 X_0 / (X_2 + X_0)^2}$

Абсолютная величина полного тока поврежденных фаз в месте КЗ пропорциональна току прямой последовательности, что позволяет записать общее выражение:

$$\underline{I}_K^{(n)} = m(n) \cdot \underline{I}_{K1}^{(n)}, \quad (11.6)$$

где $m(n)$ – коэффициент пропорциональности, зависящий от вида КЗ.

Значения $X(n)$ и $m(n)$ для различных видов КЗ приведены в табл. 11.3.

Обобщенная запись для тока (11.5) позволила Н.Н. Щедрину впервые сформулировать важное положение, которое называют правилом эквивалентности прямой последовательности.

Ток прямой последовательности любого несимметричного КЗ может быть определен как ток при трехфазном КЗ в точке, удаленной от действительной точки КЗ на дополнительное сопротивление $X(n)$, которое не зависит от параметров схемы прямой последовательности и для каждого вида КЗ определяется результирующими сопротивлениями

ями обратной последовательности X_{2c} и нулевой последовательности X_{0c} относительно точки возникшей несимметрии.

11.7. Указания к расчету переходного процесса при поперечной несимметрии

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.

При расчетах токов несимметричных КЗ применяют правило эквивалентности прямой последовательности, на основании которого ток прямой последовательности при любом несимметричном КЗ численно равен току при некотором эквивалентном трехфазном КЗ в точке, удаленной на величину $X(n)$ от действительной точки КЗ. Следовательно, все методы расчета токов при трехфазных КЗ приемлемы и для определения тока любого несимметричного КЗ.

12. РАСЧЕТ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КЗ. ПОСТРОЕНИЕ ВЕКТОРНЫХ ДИАГРАММ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ

Порядок расчета токов при несимметричных КЗ

1. Составляют схемы замещения отдельных последовательностей. Подпитывающий эффект двигателей и нагрузки при несимметричных КЗ проявляется слабее, поэтому учитываются лишь те из них, которые непосредственно связаны с точкой КЗ. Ударный коэффициент оценивают учетом добавки $\Delta x^{(n)}$ определяемой видом КЗ.

2. Рассчитывают параметры элементов схем замещения и определяют результирующие сопротивления отдельных последовательностей относительно точки КЗ, а также результирующую ЭДС из схемы прямой последовательности.

3. Для конкретного вида КЗ определяют ток прямой последовательности по выражению (11.1), а затем полный ток в поврежденных фазах в месте КЗ по выражению (11.6).

4. Если при несимметричном КЗ требуется определить токи и напряжения в других точках схемы, то симметричные составляющие токов и напряжений распределяются в схемах замещения соответствующих последовательностей. При этом необходимо учитывать группы соединений обмоток трансформаторов, так как при переходе через них симметричные составляющие изменяются, в общем случае, как по величине, так и по фазе.

5. 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 суммарное сопротивление отдельных последовательностей, определяются расчетные сопротивления выделяемых генерирующих ветвей по выражению:

$$X_{РАСЧ} = \frac{(X_{1C} + X(n)) \cdot S_H}{S_{\sigma} \cdot C}, \quad (12.1)$$

где X_{1C} – суммарное сопротивление схемы замещения прямой последовательности, приведенное в относительных единицах к S_{σ} , МВ·А; $X(n)$ – дополнительное сопротивление (табл. 11.3) в относительных единицах; S_H – суммарная номинальная мощность генераторов выделенной ветви, МВ·А; C – коэффициент распределения для той же ветви, определяемый из схемы прямой последовательности.

По найденному расчетному сопротивлению при данном виде КЗ по соответствующим расчетным кривым находят относительное значение тока прямой последовательности в рассматриваемый момент времени t .

Если в схеме присутствует источник бесконечной мощности, то реактивное сопротивление его ветви определяется аналогично:

$$X = \frac{(X_{1c} + X(n))}{C_c},$$

где C_c – коэффициент распределения ветви, в которой действует данный источник.

Поскольку расчет данным методом является достаточно приближенным, то можно не подсчитывать суммарный реактанс схемы обратной последовательности, а принимать $X_{2c} = X_{1c}$.

Величина периодической составляющей тока в месте несимметричного КЗ при расчете по общему изменению будет:

$$I \cdot t(n) = m(n) \cdot I \cdot k_{1t} \cdot I_H,$$

а по методу индивидуального затухания:

$$I k t(n) = m(n) \cdot \left(\frac{I \cdot 1t_1 \cdot I_{H1} + I \cdot 1t_2 \cdot I_{H2} + I_{\sigma}}{X_c} \right),$$

где $m(n)$ – коэффициент, значение которого для каждого вида КЗ приведены в табл. 11.3; I_H – суммарный номинальный ток генераторов, приведенный к напряжению ступени КЗ; $I \cdot 1t_1$, $I \cdot 1t_2$ – относительные токи прямой последовательности, найденные по расчетным кривым для выделенных ветвей 1, 2 и т. д.; I_{H1} , I_{H2} – номинальные токи тех же ветвей, приведенные к ступени КЗ; I_{σ} / X_c – ток прямой последовательности от источника бесконечной мощности.

6. Если при КЗ требуется определить токи и напряжения в других точках схемы, то симметричные составляющие токов и напряжений распределяются в схемах замещения соответствующих последовательностей. При этом необходимо учитывать группы соединений обмоток трансформаторов, т. к. при переходе через них симметричные составляющие изменяются как по величине, так и по фазе.

Пример 12.1

Определить аналитическим способом сверхпереходный и ударный токи трехфазного, двухфазного, однофазного, двухфазного КЗ на землю для схемы (рис. 11.3).

Исходные данные к примеру 12.1

Турбогенератор с демпферными обмотками:

$$x_{2*} \approx 1,22x_{d*}''; S_G = 200 \text{ МВ} \cdot \text{А}; x_{d*}'' = 0,125; \cos \varphi = 0,8.$$

Трансформатор: $S_T = 250 \text{ МВ} \cdot \text{А}; U_K = 10,5\%; 15,15 / 115 \text{ кВ}.$

Линия: одноцепная с тросами; $x_0 = 0,4 \text{ Ом/км}; L = 100 \text{ км}.$

Решение

1. Принимаем базисные условия:

$$S_{\bar{o}} = 200 \text{ МВ} \cdot \text{А}; U_{\bar{o}} = U_{CP} = 115 \text{ кВ}; I_{\bar{o}} = \frac{S_{\bar{o}}}{\sqrt{3}U_{\bar{o}}} = \frac{200}{\sqrt{3} \cdot 115} = 1,0 \text{ кА}.$$

2. Составим схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей (рис. 11.3).

Схема замещения прямой последовательности (рис. 11.3 б) повторяет схему для расчета трехфазного КЗ, но содержит источник U_{k1} .

Схема замещения обратной последовательности (рис. 11.3 в) отличается отсутствием в ней ЭДС генерирующих ветвей, которые принимаются равными нулю.

Составление схемы замещения нулевой последовательности (рис. 11.3 г) начинают от точки КЗ считая, что в этой точке все фазы замкнуты между собой и к ней относительно земли приложено напряжение нулевой последовательности U_{k0} . Под действием напряжения U_{k0} через элементы, соединенные в звезду с заземленной нейтралью и имеющие электрическую связь с точкой КЗ, будут протекать токи нулевой последовательности. Поэтому в схему замещения включаются лишь линия (одноцепная с тросами) и трансформатор. Генератор из схемы замещения исключается, так как токи нулевой последовательности не выходят за треугольник трансформатора.

3. Определяем параметры схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей:

Прямая последовательность:

$$X_{G1} = X_{d*}'' \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{S_H} = 0,125 \frac{200}{200} = 0,125;$$

$$X_{T1} = \frac{U_K \%}{100} \cdot \frac{U_{\bar{o}}}{S_H} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{200}{200} = 0,084;$$

$$X_{L1*} = X_0 L \frac{S_{\bar{o}}}{U_{\bar{o}}^2} = 0,4 \cdot 100 \cdot \frac{200}{115^2} = 0,605;$$

$$E_{G1*} = U_{G1*} + I_{G*} X_{d*}'' \sin \varphi = 1 + 1 \cdot 0,125 \cdot 0,6 = 1,075;$$

$$X_{1*C} = X_{G1*} + X_{T1*} + X_{L1*} = 0,125 + 0,084 + 0,605 = 0,814.$$

Обратная последовательность:

$$X_{\tilde{A}2*} = 1,22X_{\tilde{A}1*} = \left(\begin{array}{c} \delta\acute{o}\delta\acute{a}\acute{i}\tilde{a}\tilde{a}\acute{i}\acute{a}\delta\grave{a}\delta\acute{i}\delta \quad \tilde{n} \\ \grave{a}\grave{a}\grave{i}\grave{i}\delta\acute{a}\delta\acute{i}\grave{i}\grave{i} \quad \grave{e} \quad \acute{i}\acute{a}\grave{i}\grave{i}\delta\grave{e}\grave{a}\grave{i}\grave{e} \end{array} \right) = 1,22 \cdot 0,125 = 0,152;$$

$$X_{T2*} = X_{T1*} = 0,084; \quad X_{L2*} = X_{L1*} = 0,605,$$

тогда суммарное сопротивление обратной последовательности

$$X_{2*C} = X_{T2*} + X_{L2*} = 0,152 + 0,084 + 0,605 = 0,84.$$

Нулевая последовательность:

$$X_{T0*} = X_{T1*} = 0,084 \text{ (для группы соединения обмоток } \Delta/Y0 \text{);}$$

$$X_{L0*} = 3X_{L1*} = 3 \cdot 0,605 = 1,815 \text{ (одноцепная с тросами).}$$

Суммарное сопротивление нулевой последовательности:

$$X_{0C*} = X_{T0*} + X_{E0*} = 0,084 + 1,815 = 1,899.$$

Ток трехфазного КЗ будет:

$$I_K^{(3)} = \frac{E_C}{X_{1C}} \cdot I_\sigma = \frac{1,075}{0,814} \cdot 1,0 = 1,32 \text{ кА}; \quad i_{y\delta} = 2,55 \cdot 1,32 = 3,37 \text{ кА.}$$

4. Рассчитаем ток двухфазного КЗ.

Определяем ток прямой последовательности:

$$I_{k1}^{(2)} = \frac{E_{1\Sigma}''}{X_{1C*} + X_*^{(2)}} = \frac{1,075}{0,814 + 0,84} = \frac{1,075}{1,654} = 0,65,$$

где $X_*^{(2)} = X_{2*C} = 0,84$.

Определяем ток, протекающий в поврежденных фазах:

$$I_k^{(2)} = I_\sigma I_{k*}^{(2)} \cdot \sqrt{3} = 1,0 \cdot 0,65 \cdot 1,73 = 1,12 \text{ кА.}$$

Ударный ток КЗ:

$$i_{y\delta}^{(2)} = 2,55 I^{(2)} = 2,55 \cdot 1,12 = 2,87 \text{ кА.}$$

5. Рассчитаем ток однофазного КЗ:

$$I_{k1}^{(1)} = \frac{E_{1\Sigma}''}{X_{1\Sigma*} + \Delta X_*^{(1)}} = \frac{1,075}{0,814 + 0,84 + 1,899} = \frac{1,075}{3,55} = 0,303,$$

$$\Delta X_*^{(1)} = X_{2C*} + X_{0C*} = 0,84 + 1,899 = 2,74;$$

$$I_{K*}^{(1)} = m^{(1)} I_{K1*}^{(1)} = 3 \cdot 0,303 = 0,91 m^{(1)} = 3.$$

Ток в именованных единицах:

$$I_K^{(1)} = I_\sigma I_{K1*}^{(1)} = 1,0 \cdot 0,91 = 0,91 \text{ кА.}$$

Ударный ток:

$$i_{y\delta}^{(1)} = 2,55 I^{(1)} = 2,55 \cdot 0,91 = 2,32 \text{ кА.}$$

6. Рассчитаем ток двухфазного КЗ на землю:

$$I_{k1}^{(1,1)} = \frac{E_{1C*}''}{X_{1C*} + \Delta X_*^{(1,1)}} = \frac{1,075}{0,814 + 0,582} = \frac{1,075}{1,396} = 0,77;$$

$$\Delta X_*^{(1,1)} = \frac{X_{2C} \cdot X_{0C}}{X_{2C} + X_{0C}} = \frac{0,84 \cdot 1,899}{0,84 + 1,899} = \frac{1,888}{2,74} = 0,582;$$

$$I_{K*}^{(1,1)} = m^{(1,1)} I_{K1*}^{(1,1)} = 1,54 \cdot 0,77 = 1,18;$$

$$m^{(1,1)} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{X_{2C} \cdot X_{0C}}{(X_{2C} + X_{0C})^2}} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{0,84 \cdot 1,899}{(0,84 + 1,899)^2}} = 1,54.$$

Ток в именованных единицах:

$$I_K^{(1,1)} = I_\sigma I_{K1*}^{(1,1)} = 1,0 \cdot 1,18 = 1,18 \text{ кА.}$$

Ударный ток:

$$i_{y\delta}^{(1,1)} = 2,55 I^{(1,1)} = 2,55 \cdot 1,18 = 3,015 \text{ кА.}$$

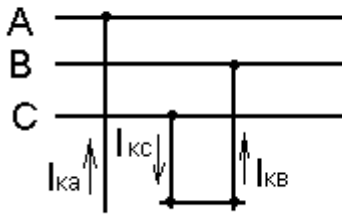
Пример 12.2

По результатам расчета примера 12.1 построить векторные диаграммы токов и напряжений для двухфазного, однофазного и двухфазного на землю КЗ.

1. Построим векторные диаграммы токов (рис. 12.1) и напряжений (рис. 12.2) для двухфазного КЗ.

Векторная диаграмма токов:

Граничные условия:



$$\underline{I}_{KA}^{(2)} = 0, \quad \underline{I}_{KB}^{(2)} = -\underline{I}_{KC}^{(2)}, \quad \underline{U}_{KB}^{(2)} - \underline{U}_{KC}^{(2)} = 0, \text{ т.к. } .$$

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_{KA}^{(2)} &= 0 \\ \underline{I}_{KA}^{(2)} &= \underline{I}_{KA1} + \underline{I}_{KA2} \end{aligned} \right\} = \underline{I}_{KA1} = \underline{I}_{KA2}.$$

Токи в поврежденных фазах:

$$\underline{I}_{KB}^{(2)} = -j\sqrt{3}\underline{I}_{KA1}; \quad \underline{I}_{KC}^{(2)} = j\sqrt{3}\underline{I}_{KA1}.$$

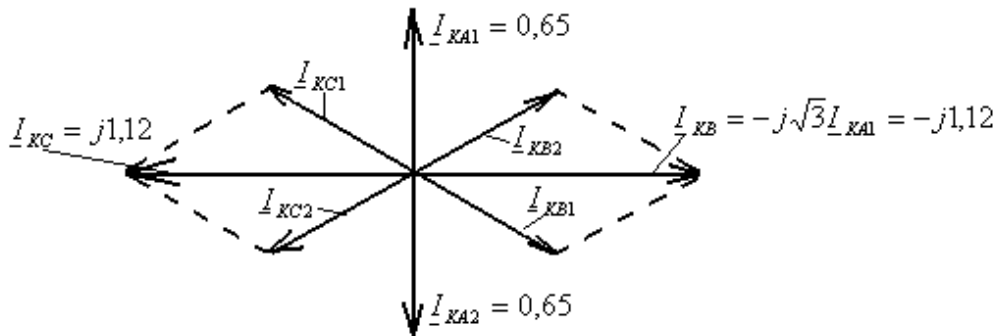


Рис. 12.1. Векторная диаграмма токов при двухфазном КЗ

Векторная диаграмма напряжений.

Граничные условия

$$\underline{U}_{KB}^{(2)} - \underline{U}_{KC}^{(2)} = 0.$$

Из граничных условий и путем преобразования уравнения имеем, что напряжение прямой и обратной последовательностей фазы А в месте короткого замыкания будут

$$\underline{U}_{KA2}^{(2)} = \underline{U}_{KA1}^{(2)} = jX_{2C} \underline{I}_{KA1}^{(2)},$$

а фазные напряжения в месте короткого замыкания соответствуют:

$$\underline{U}_{KA}^{(2)} = \underline{U}_{KA1}^{(2)} + \underline{U}_{KA2}^{(2)} = 2\underline{U}_{KA1}^{(2)} = 2jX_{2\Sigma} \underline{I}_{KA1}^{(2)}, \quad \underline{U}_{KB}^{(2)} = \underline{U}_{KC}^{(2)} = -\underline{U}_{KA1}^{(2)} = -\underline{U}_{KA}^{(2)} / 2.$$

Построим по основным выражениям, с учетом данных задачи, векторные диаграммы напряжений (рис. 12.2):

$$\underline{U}_{KA2}^{(2)} = \underline{U}_{KA1}^{(2)} = 0,84 \cdot 0,65 = 0,546.$$

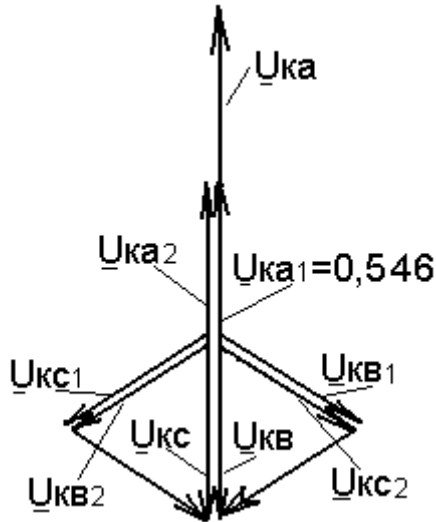
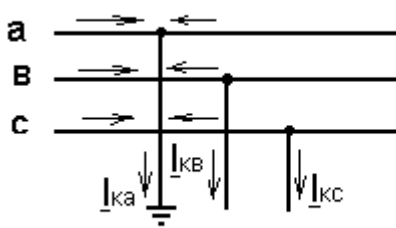


Рис. 12.2. Векторная диаграмма напряжений при двухфазном КЗ

Построим векторные диаграммы токов (рис. 12.3) и напряжений (рис. 12.4).

Векторная диаграмма токов:



Граничные условия:

$$\underline{I}_{KB}^{(1)} = 0; \quad \underline{I}_{KA}^{(1)} = 0; \quad \underline{I}_{KC}^{(1)} = 0;$$

Нетрудно убедиться, что при таких граничных условиях симметричные составляющие токов в месте КЗ связаны соотношениями:

$$\underline{I}_{KA1}^{(1)*} = \underline{I}_{KA2}^{(1)*} = \underline{I}_{I0}^{(1)*} = \frac{1}{3} \underline{I}_{KA}^{(1)*} = 0,303.$$

Векторная диаграмма напряжений.

Для заземленной фазы имеем:

$$\underline{U}_{KA} = \underline{U}_{KA1} + \underline{U}_{KA2} + \underline{U}_{I0} = 0.$$

Симметричные составляющие напряжений в месте КЗ:

$$\underline{U}_{K0} = -jX_{0C} \underline{I}_{\hat{E}A1} = -1,899 \cdot 0,303 = -0,575j;$$

$$\underline{U}_{K2} = -jX_{2C} \underline{I}_{\hat{E}A1} = -0,84 \cdot 0,303 = -0,255j;$$

$$\underline{U}_{KA1} = (\underline{U}_{KA2} + \underline{U}_{K0}) = j(X_{2C} + X_{0C}) \underline{I}_{KA1} = j2,74 \cdot 0,303 = j0,83.$$

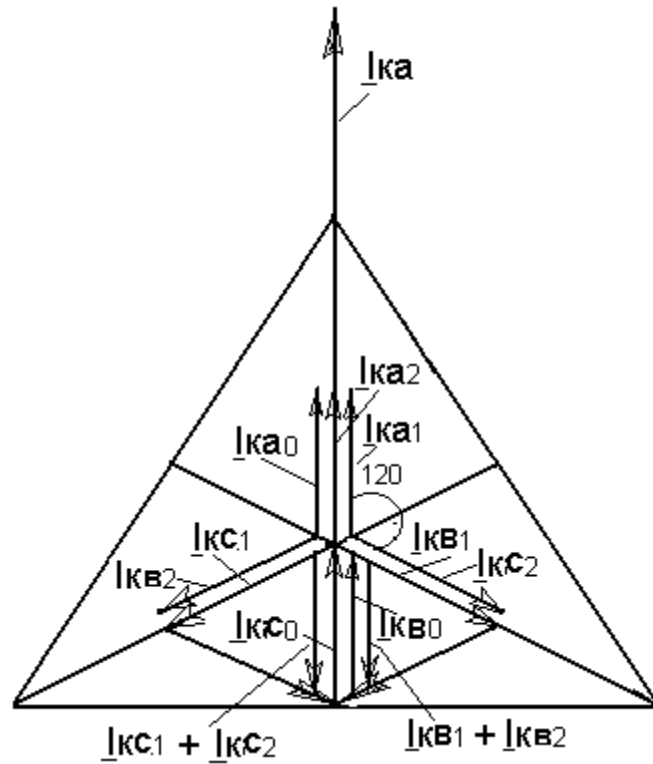


Рис. 12.3. Векторная диаграмма токов при однофазном КЗ

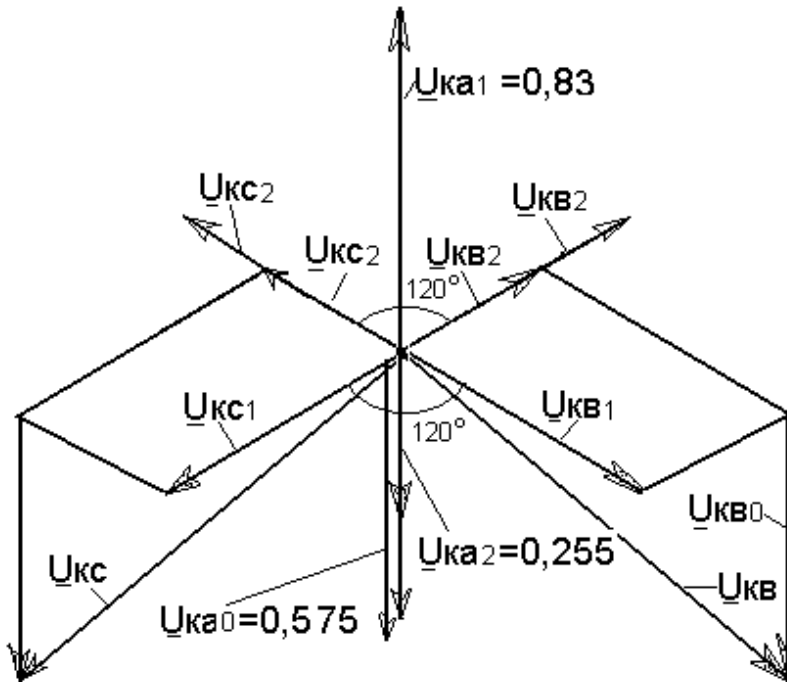
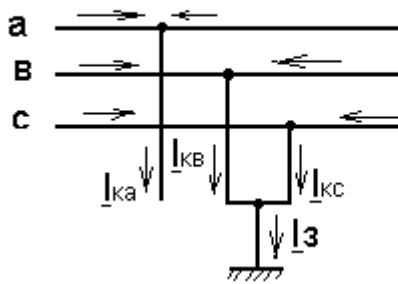


Рис. 12.4. Векторная диаграмма напряжений при однофазном КЗ

Построим векторные диаграммы токов (рис. 12.5) и напряжений (рис. 12.6) при двухфазном на землю.



Граничные условия
 $\underline{I}_{KA}^{(1,1)} = 0; \quad \underline{U}_{KB}^{(1,1)} = 0; \quad \underline{U}_{KC}^{(1,1)} = 0;$

В записи через симметричные составляющие граничные условия для токов дают:

$$\underline{I}_{KA1}^{(1,1)} + \underline{I}_{KA2}^{(1,1)} + \underline{I}_{K0}^{(1,1)} = 0.$$

Симметричные составляющие токов:

$$I_{k0}^{(1,1)} = -\underline{I}_{KA1}^{(1,1)} \frac{X_{2C}}{X_{2C} + X_{0C}} = -j0,77 \frac{0,84}{0,84 + 1,899} = -j0,236;$$

$$I_{KA2}^{(1,1)} = -\underline{I}_{KA1}^{(1,1)} \frac{X_{0C}}{X_{2C} + X_{0C}} = -j0,77 \frac{1,899}{0,84 + 1,899} = -j0,534.$$

Проверим

$$\underline{I}_{KA}^{(1,1)} = -(\underline{I}_{KA2}^{(1,1)} + \underline{I}_{K0}^{(1,1)}) = 0,77j = -j0,236 - j0,534.$$

Векторная диаграмма напряжений.

Граничные условия напряжений через симметричные составляющие дают:

$$\underline{U}_{KA1}^{(1,1)} = \underline{U}_{KA2}^{(1,1)} = \underline{U}_{K0}^{(1,1)} = 1/3 \underline{U}_{KA}^{(1,1)}.$$

$$\underline{U}_{KA1}^{(1,1)} = \underline{I}_{KA1}^{(1,1)} j \frac{X_{2C} \cdot X_{0C}}{X_{2C} + X_{0C}} = 0,77j \frac{0,84 \cdot 1,899}{0,84 + 1,899} = j0,448.$$

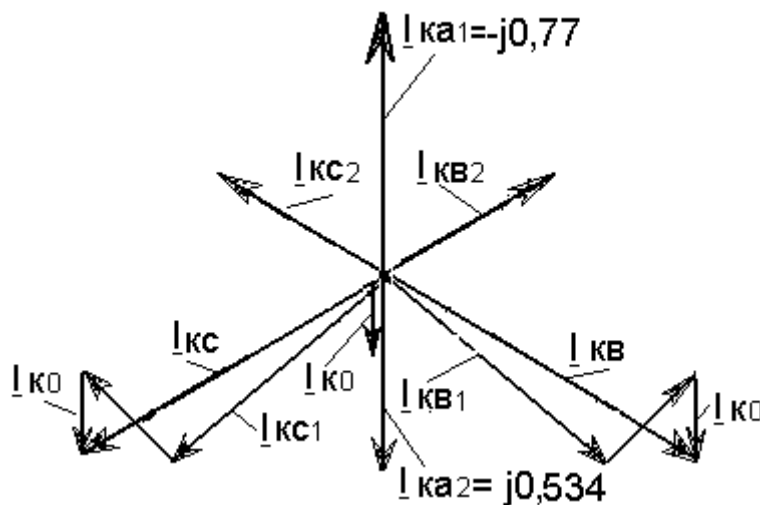


Рис. 12.5. Векторная диаграмма токов при $K^{(1,1)}$

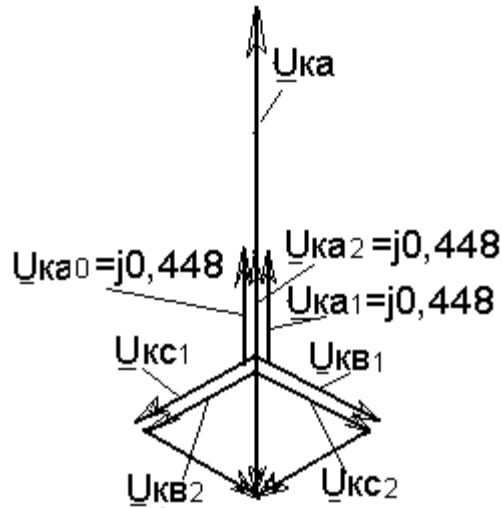


Рис. 12.6. Векторная диаграмма напряжений при $K^{(1,1)}$

Пример 12.3

Определить с помощью расчетных кривых сверхпереходный и ударный ток КЗ для двухфазного, однофазного и для двухфазного КЗ на землю по исходным данным примера 12.1.

1. Двухфазное КЗ

Используя полученные в примере 12.1 X_{1^*C} и X_{2^*C} , определим $X_{PACЧ}^{(2)}$:

$$X_{PACЧ}^{(2)} = (X_{1^*C} + X_{2^*C}) \cdot \frac{S_{НГ}}{S_{\delta}} = (0,814 + 0,84) \cdot \frac{200}{200} = 1,654.$$

Из расчетных кривых определяем для $X_{PACЧ}^{(2)}$

$$I_{lt} = 0,63.$$

Относительное значение тока в поврежденных фазах:

$$I_{*t=0} = m^{(2)} \cdot I_{lt=0} = \sqrt{3} \cdot 0,63 = 1,09.$$

Определим новый базисный ток:

$$I_{H\delta} = \frac{S_{НГ}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta}} = \frac{200}{\sqrt{3} \cdot 115} = 1,0 \text{ кА.}$$

Ток КЗ:

$$I_{*t=0}^{(2)} = I_{*t=0} \cdot I_{H\delta} = 1,09 \cdot 1,0 = 1,09 \text{ кА.}$$

Ударный ток КЗ:

$$i_y = \sqrt{2} \cdot K_Y \cdot I_{*t=0}^{(2)} = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 1,09 = 2,78 \text{ кА.}$$

2. Однофазное КЗ

$$X_{PACЧ}^{(1)} = (X_{1*C} + X_{2*C} + X_{0*C}) \frac{S_{HГ}}{S_{\sigma}} = (0,814 + 0,84 + 1,899) \frac{200}{200} = 3,55$$

– из расчетных кривых

$$I_{1t=0} = 0,3;$$

– ток в поврежденной фазе

$$I_{t=0}^{(1)} = m^{(1)} \cdot I_{1t=0} \cdot I_{K\sigma} = 3 \cdot 0,3 \cdot 1,0 = 0,9 \text{ кА};$$

– ударный ток КЗ

$$i_y = 2,55 \cdot I_{*t=0}^{(1)} = 2,55 \cdot 0,9 = 2,29 \text{ кА.}$$

3. Двухфазное КЗ на землю

$$X_{\dot{D}\dot{A}\dot{N}\times}^{(1,1)} = (X_{1*C} + X_{2*C} // X_{0*C}) \frac{S_{\dot{I}\bar{A}}}{S_{\dot{a}}} = \left(0,814 + \frac{0,84 \cdot 1,899}{0,84 + 1,899}\right) \frac{200}{200} = 1,396$$

– из расчетных кривых

$$I_{1t=0} = 0,75;$$

– ток в поврежденной фазе

$$I_{t=0}^{(1,1)} = m^{(1,1)} \cdot I_{1t=0} \cdot I_{K\sigma} = 1,54 \cdot 0,75 \cdot 1,0 = 1,15 \text{ кА};$$

– ударный ток КЗ

$$i_y = 2,55 \cdot I_{*t=0}^{(1,1)} = 2,55 \cdot 1,15 = 2,95 \text{ кА.}$$

Домашнее задание № 9

Для расчетной схемы, приведенной на рис. 12.7, определить ток КЗ аналитическим способом и методом расчетных кривых.

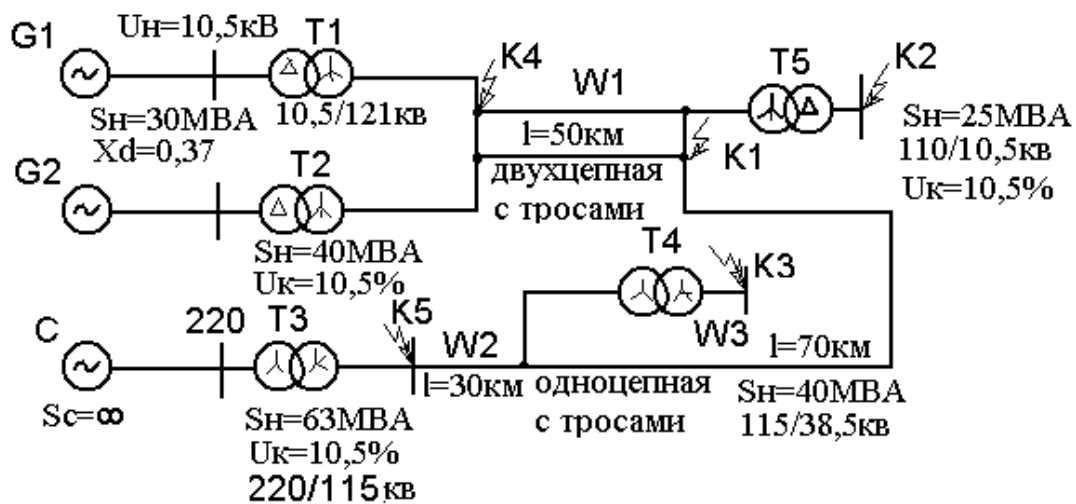


Рис. 12.7. Расчетная схема к домашнему заданию

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Точка КЗ	K1	K1	K1	K2	K3	K4	K4	K4	K5	K5
Вид КЗ	$K^{(2)}$	$K^{(1)}$	$K^{(1,1)}$	$K^{(2)}$	$K^{(2)}$	$K^{(2)}$	$K^{(1)}$	$K^{(1,1)}$	$K^{(1)}$	$K^{(1,1)}$

13. ОДНОКРАТНАЯ ПРОДОЛЬНАЯ НЕСИММЕТРИЯ

13.1. Общие указания

Продольная несимметрия возникает при неравенствах фазных сопротивлений системы электроснабжения или отдельных ее элементов при обрывах и отключениях одной или двух фаз.

Продольную несимметрию в какой-либо точке трехфазной системы можно представить включением в рассечку каждой фазы неодинаковых сопротивлений (рис. 13.1). Такой подход к решению задачи позволяет проводить решения для каждого вида продольной несимметрии, используя характеризующие его граничные условия и метод симметричных составляющих.

При расчетах ток прямой последовательности при продольной несимметрии можно определять как ток симметричного трехфазного режима в схеме, где несимметричный участок заменен симметричной цепью, величина сопротивления которой для каждого вида продольной несимметрии определяется сопротивлениями как самого несимметричного участка, так и схем обратной и нулевой последовательности относительно места несимметрии.

Расчетные выражения для симметричных составляющих токов и падений напряжений в месте продольной несимметрии, вызванной включением сопротивления в одну или две фазы, сведены в табл. 13.1. Разрыв одной или двух фаз является частным случаем такой несимметрии; расчетные выражения для него получают из выражений, приведенных в табл. 13.1, полагая $Z=\infty$.

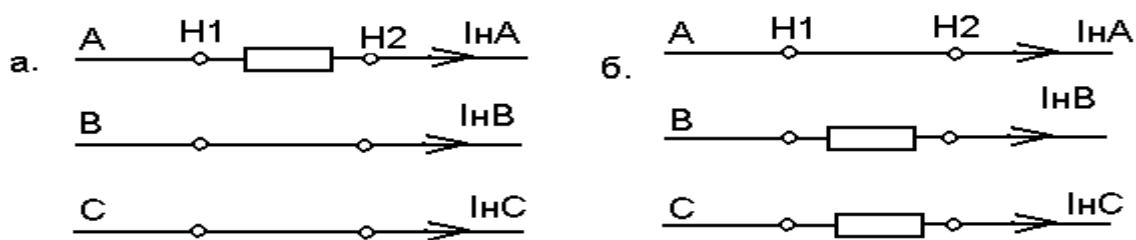


Рис. 13.1. Несимметрия от включения сопротивлений: а – в одну фазу; б – в две фазы

Таблица 13.1

Величина	Несимметрия одной фазы		Несимметрия двух фаз	
	Сопротивление в одной фазе	Разрыв одной фазы	Сопротивления в двух фазах	Разрыв двух фаз
\underline{I}_{HA1}	$\underline{E}_{Ac}/(Z_{H1}+Z_{(H1)})$	$\underline{E}_{Ac}/(Z_{H1}+Z_{(H1)})$	$\underline{E}_{Ac}/(Z_{H1}+Z_{(H1)})$	$\underline{E}_{Ac}/(Z_{H1}+Z_{(H1)})$
$Z_{(H)}$	$Z/3 Z_{H2} Z_{H0}$	$Z_{H2} Z_{H0}$	$Z ((Z Z_{H2}+Z Z_{H0}))$	$Z_{H2}+Z_{H0}$
\underline{I}_{HA2}	$-Z_{(H1)}\underline{I}_{HA1}/Z_{H2}$	$-Z_{(H1)}\underline{I}_{HA1}/Z_{H2}$	$(Z-Z_{(H2)})\underline{I}_{H1}/(Z+Z_{H2})$	\underline{I}_{HA1}
\underline{I}_{HA0}	$-Z_{(H1)}\underline{I}_{HA1}/Z_{H0}$	$-Z_{(H1)}\underline{I}_{HA1}/Z_{H0}$	$(Z-Z_{(H2)})\underline{I}_{H1}/(Z+Z_{H0})$	\underline{I}_{HA1}
$\Delta\underline{U}_{HA1}$	$Z_{(H1)}\underline{I}_{HA1}$	$Z_{(H1)}\underline{I}_{HA1}$	$Z_{(H2)}\underline{I}_{HA1}-Z_2\underline{I}_{HA1}$	$Z_{(H2)}\underline{I}_{HA1}$
$\Delta\underline{U}_{HA2}$	$\Delta\underline{U}_{HA1}$	$\Delta\underline{U}_{HA1}$	$(Z-Z_{(H2)}) (Z+Z_0)$	$-Z_2\underline{I}_{A1}$
$\Delta\underline{U}_{H0}$	$\Delta\underline{U}_{HA1}$	$\Delta\underline{U}_{HA1}$	$-Z_0\underline{I}_{HA1} (Z-Z_{(H2)}) (Z+Z_0)$	$-Z_0\underline{I}_{A1}$

13.2. Правило эквивалентности прямой последовательности

Изложенное положение представляет собой правило эквивалентности прямой последовательности применительно к условиям однократной продольной несимметрии. Оно аналогично этому правилу при однократной поперечной несимметрии и позволяет ток прямой последовательности в месте продольной несимметрии выразить в общем виде:

$$I_{HA1}^{(n)} = \frac{\dot{E}_{1C}}{Z_{H1C} + Z_{\Delta H}^{(n)}},$$

где \dot{E}_{1C} – результирующие ЭДС и сопротивление схемы прямой последовательности относительно точки разрыва (табл. 13.1); Z_{H1C} – дополнительное сопротивление, зависящее от вида разрыва.

Абсолютное значение тока в неповрежденных фазах определяют по выражению:

$$I_{HA}^{(n)} = m^{(n)} \cdot I_{HA1}^{(n)},$$

где $m^{(n)}$ – коэффициент, зависящий от вида разрыва (табл. 13.2).

Таблица 13.2

Вид разрыва	$Z_{\Delta H}^{(n)}$	$m^{(n)}$
Разрыв одной фазы	$X_{L2C} // X_{L0C}$	$\sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{X_{L2C} \cdot X_{L0C}}{(X_{L2C} + X_{L0C})^2}}$
Разрыв двух фаз	$X_{L2C} + X_{L0C}$	3

Симметричные составляющие токов и падений напряжений в месте продольной несимметрии, необходимые для построения векторных диаграмм определяются по табл. 13.1.

13.3. Схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательности

Результирующие сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей находят по схемам соответствующих последовательностей.

Схема прямой последовательности является обычной схемой для расчета тока трехфазного КЗ. В зависимости от применяемого метода расчета (аналитический, по расчетным или типовым кривым) и момента времени генераторы и нагрузки в схему вводят соответствующими реактивностями и ЭДС. Схема обратной последовательности состоит из тех же элементов и по структуре идентична схеме прямой последовательности, но ЭДС генерирующих ветвей в ней принимаются равным нулю.

Схема нулевой последовательности существенно отличается от схем прямой и обратной последовательностей, т. к. токи нулевой последовательности, протекая от места КЗ, могут иметь возврат к месту несимметрии только через землю и параллельные ей цепи (тросы линий, оболочки кабелей, нулевые провода). Составление схемы замещения нулевой последовательности начинают от точки КЗ, считая, что в этой точке все фазы замкнуты между собой и к ней относительно земли приложено напряжение нулевой последовательности $\Delta U_{НО}$, под действием которого через элементы, соединенные в звезду с заземленной нейтралью и имеющие электрическую связь с точкой КЗ, будут протекать токи нулевой последовательности, поэтому в схему замещения включаются лишь те элементы, через которые протекают токи нулевой последовательности.

Величины сопротивлений прямой, обратной и нулевой последовательностей элементов систем электроснабжения определяются также, как и для поперечной несимметрии.

Исходная схема и пример составления схем отдельных последовательностей показан на рис. 13.2.

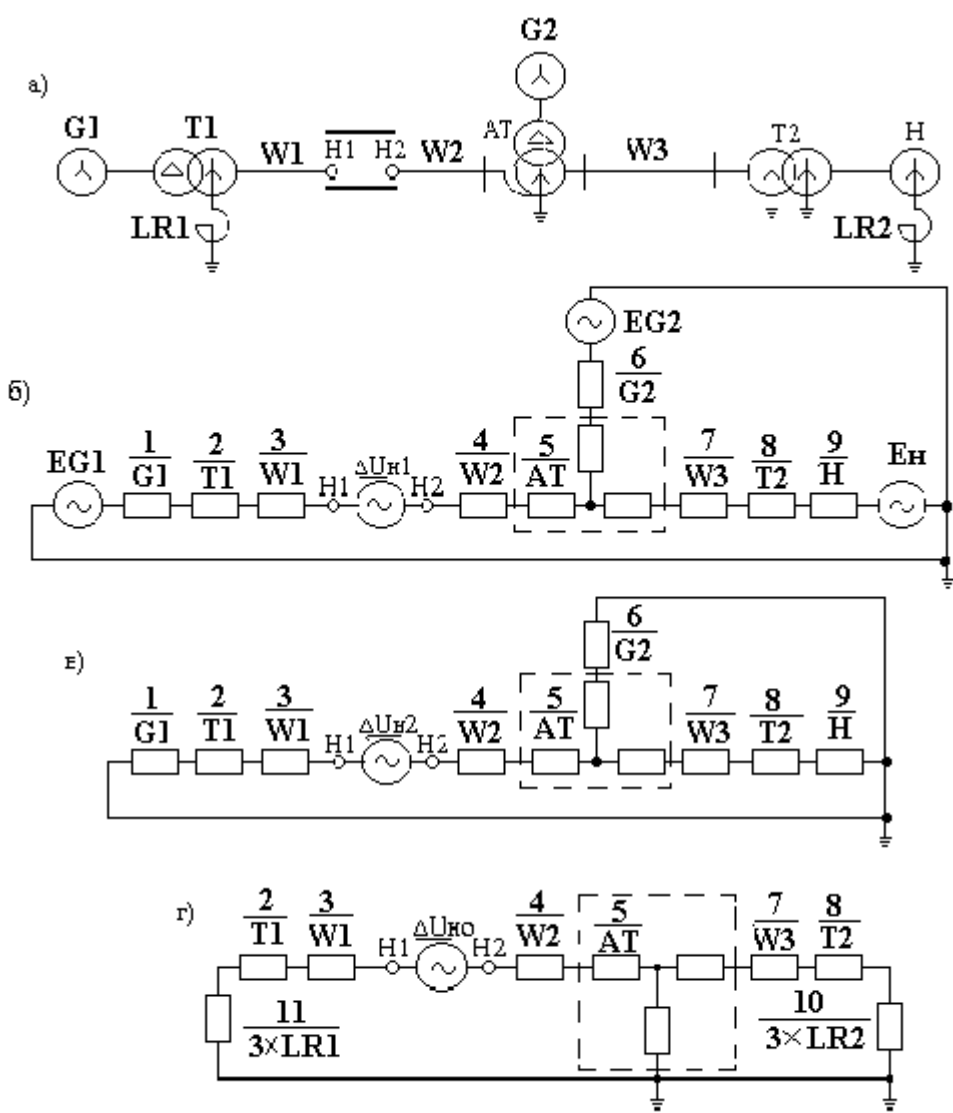


Рис. 13.2: а – расчетная схема; б – схема замещения прямой последовательности; в – схема замещения обратной последовательности; г – схема замещения нулевой последовательности

Пример 13.1

Для расчетной схемы рис. 13.3 требуется сравнить величины начальных сверхпереходных токов при несинхронном включении генератора в систему, считая, что такое включение производится одновременно:

- а) тремя фазами выключателя В; б) двумя фазами (разрыв одной фазы).

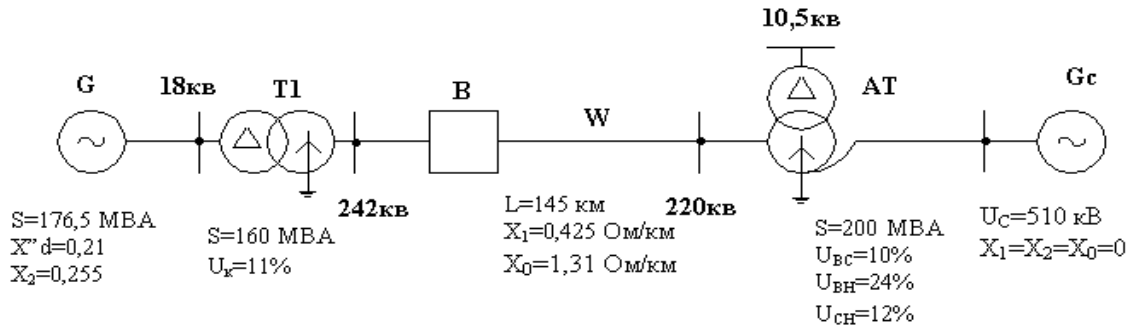
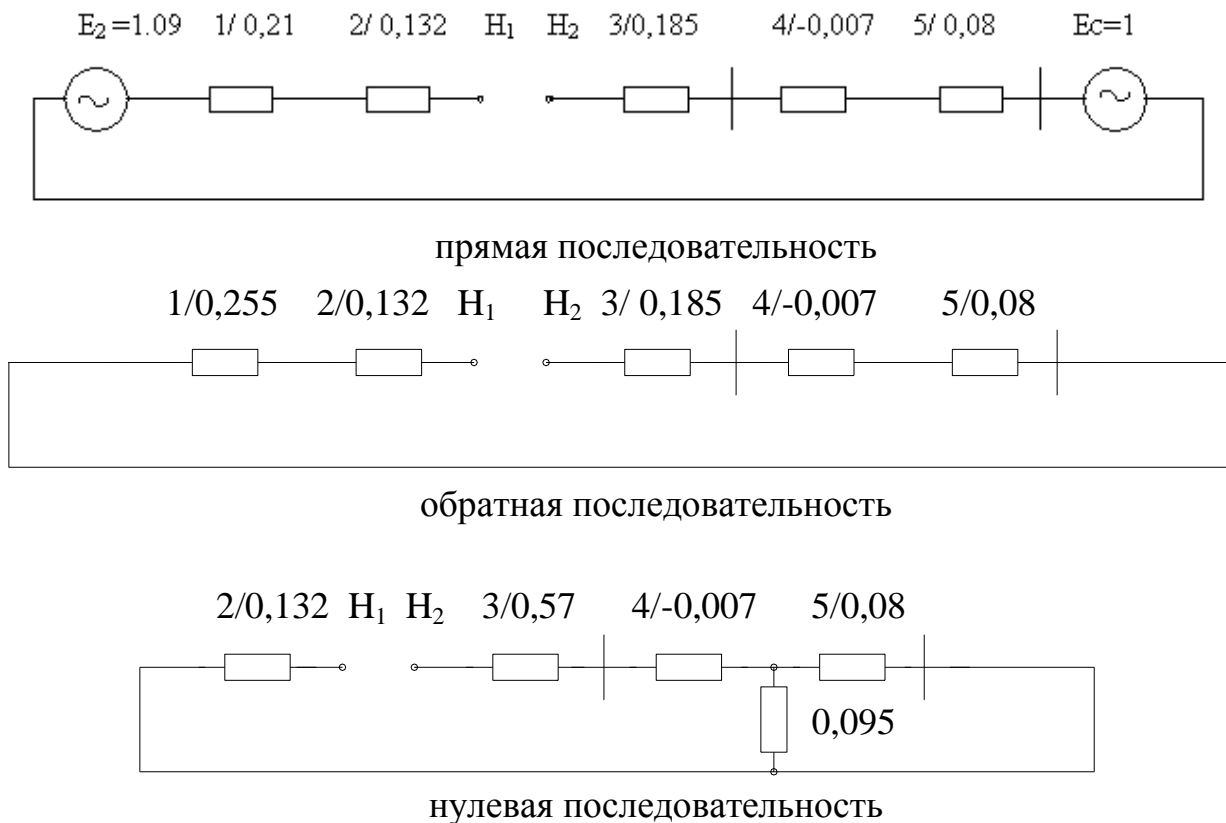


Рис. 13.3. Расчетная схема к примеру 13.1

1. Задаемся базисными условиями:

$$S_{\sigma} = 176,5 \text{ МВА}; U_{\sigma 2} = 242 \text{ кВ.}$$

2. Сопротивления элементов приведем к базисным условиям и составим схемы замещения:



3. Результирующие реактивности схем отдельных последовательно-стей относительно места разрыва:

$$X_{H1C} = 0,21 + 0,132 + 0,185 - 0,007 + 0,08 = 0,6;$$

$$X_{H2C} = 0,255 + 0,132 + 0,185 - 0,007 + 0,08 = 0,645;$$

$$X_{f_{0\bar{N}}} = 0,132 + 0,3 + 0,27 - 0,007 + (0,08 // 0,095) = 0,74.$$

4. Считаем, что при включении выключателя напряжение генератора по величине равно напряжению системы, которое в относительных единицах составляет: $U_* = 1,09$. Наиболее тяжелые условия по току имеют место, когда напряжения включаемых источников находятся в противофазе ($E_{сум} = E_G + E_C = 1,09 + 1 = 2,09$).

5. Ток при включении трех фаз:

$$I_H^{(3)} = \frac{2,09}{0,6} = 3,48.$$

6. При включении двух фаз (разрыв одной фазы):

$$X_{\Delta H}^{(1)} = 0,645 // 0,74 = 0,345.$$

Значение тока прямой последовательности будет:

$$I_H''^{(1)} = \frac{2,09}{0,6 + 0,345} = 2,21.$$

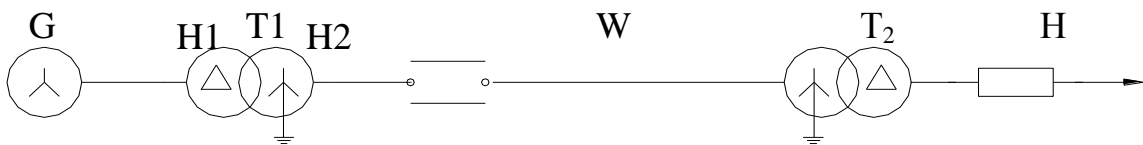
Абсолютное значение тока определяется:

$$I_H''^{(1)} = m \cdot I_{H1}''^{(1)} = 1,5 \cdot 2,21 = 3,32,$$

$$\text{где } m = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{0,645 \cdot 0,74}{(0,645 + 0,74)^2}} = 1,5.$$

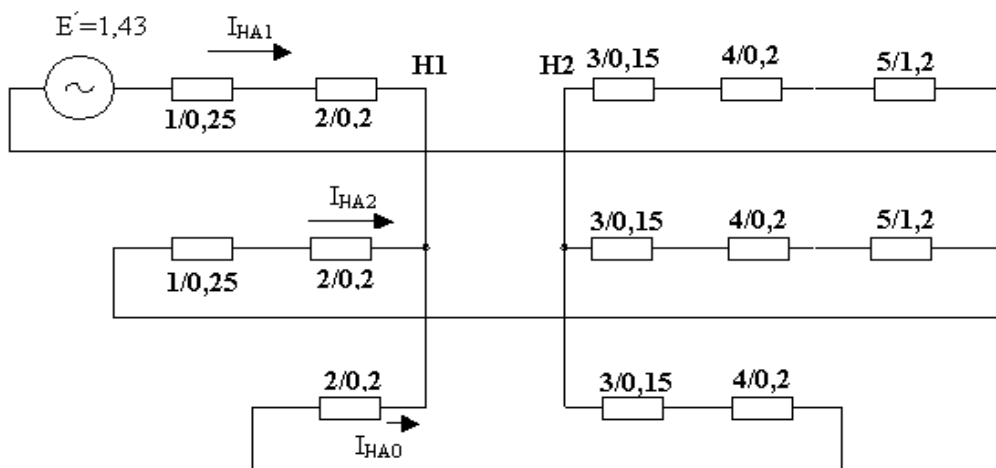
Пример 13.2

Определить токи в линии W при разрыве одной и двух фаз, построить комплексные схемы замещения.



а) разрыв одной фазы.

1. Комплексная схема замещения будет (величины сопротивлений приведены к базисным условиям), где $E_1'' = E_G'' + E_C'' = 1,09 + 0,34 = 1,43$.



2. Результирующие реактивности отдельных последовательностей относительно места разрыва составят:

$$X_{H1C} = 0,25 + 0,2 + 0,15 + 0,2 + 1,2 = 2,0;$$

$$X_{H2C} = 0,25 + 0,2 + 0,15 + 0,2 + 0,35 = 1,15;$$

$$X_{H0C} = 0,20 + 0,57 + 0,20 = 0,97.$$

3. Дополнительная реактивность:

$$X_{\Delta H}^{(1)} = 1,15 // 0,97 = 0,526.$$

4. Ток прямой последовательности в месте разрыва будет:

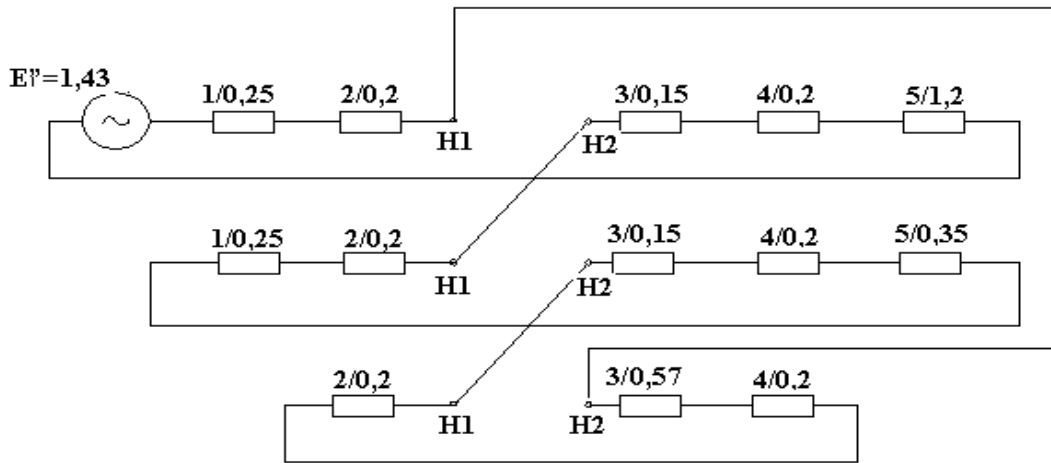
$$I_{HA1} = \frac{1,43}{2,0 + 0,526} = 0,565.$$

5. Ток в неповрежденных фазах будет:

$$I_H = m^{(1,1)} \cdot I_{HA1} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{1,15 \cdot 0,97}{(1,15 + 0,97)^2}} \cdot 0,565 = 0,85;$$

б) разрыв двух фаз.

1. Комплексная схема замещения:



$$X_{H1C} = 2,0; X_{H2C} = 1,15; X_{H0C} = 0,97.$$

2. Находим дополнительную реактивность:

$$X_{\Delta H}^{(2)} = 1,15 + 0,97 = 2,12.$$

3. Ток прямой последовательности в месте разрыва будет:

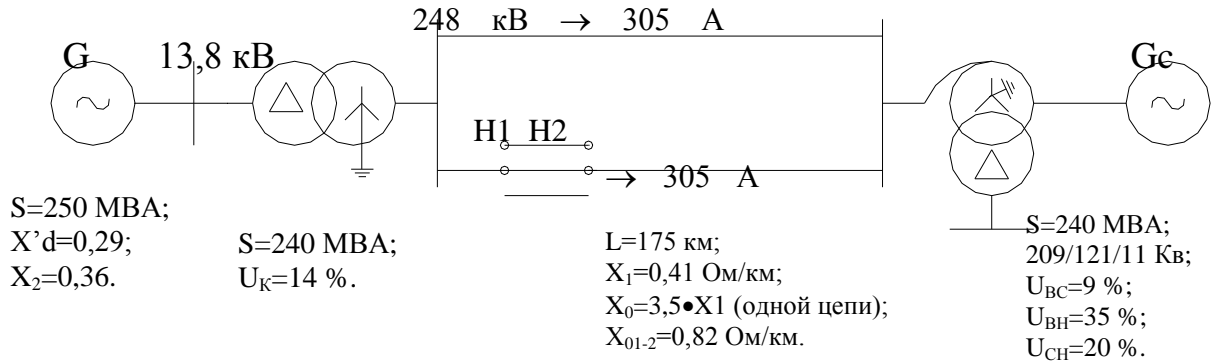
$$\dot{I}_{HA1} = \dot{I}_{HA2} = \dot{I}_{HA0} = \frac{1,43}{2 + 2,12} = 0,35.$$

4. Ток в неповрежденной фазе будет:

$$\dot{I}_{HA} = 3 \cdot 0,35 = 1,05.$$

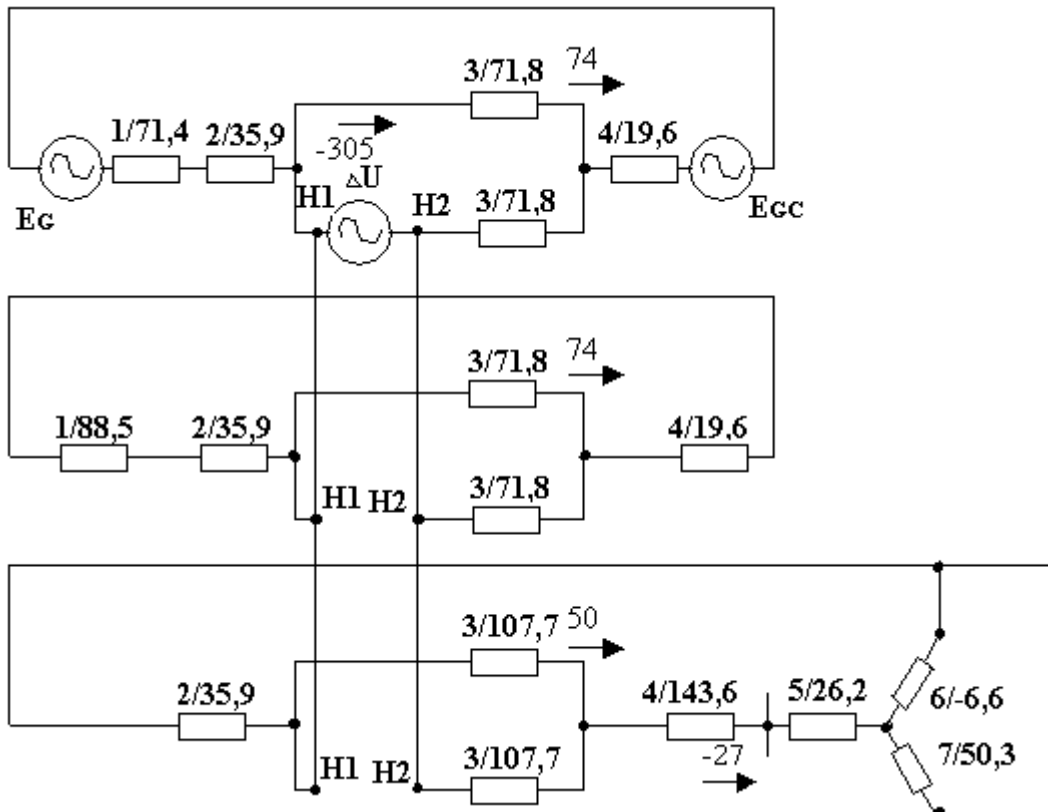
Пример 13.3

Построить векторные диаграммы токов в обеих цепях линии при разрыве провода фазы А цепи W2. Предшествующие фазные токи каждой линии составляют 305 А.



Параметры системы: $S_c = \infty$; $X_1 = X_2 = X_0 = 0$.

1. Составляем комплексную схему замещения и приводим сопротивления к напряжению разрыва:



2. Результирующие реактивности схем отдельных последовательностей:

$$X_{H1C} = 117,8 \text{ Ом}; \quad X_{H2C} = 119,8 \text{ Ом}; \quad X_{H0C} = 177,3 \text{ Ом}.$$

3. Результирующая реактивность комплексной схемы относительно источника будет:

$$X_C = 117,8 // 119,8 // 177,3 = 44,5 \text{ Ом};$$

4. Ток прямой последовательности в месте разрыва:

$$\dot{I}_{HA1} = -305 \cdot \frac{44,5}{117,8} = -115 \text{ А.}$$

5. Составляющие токов обратной и нулевой последовательности в месте разрыва:

$$\dot{I}_{HA2} = -305 \cdot \frac{44,5}{119,3} = -113 \text{ А}, \quad \dot{I}_{HA0} = -305 \cdot \frac{44,5}{177,3} = -77 \text{ А.}$$

6. Построим векторные диаграммы токов, приняв предшествующий ток совпадающим по фазе с аварийной составляющей тока прямой последовательности.

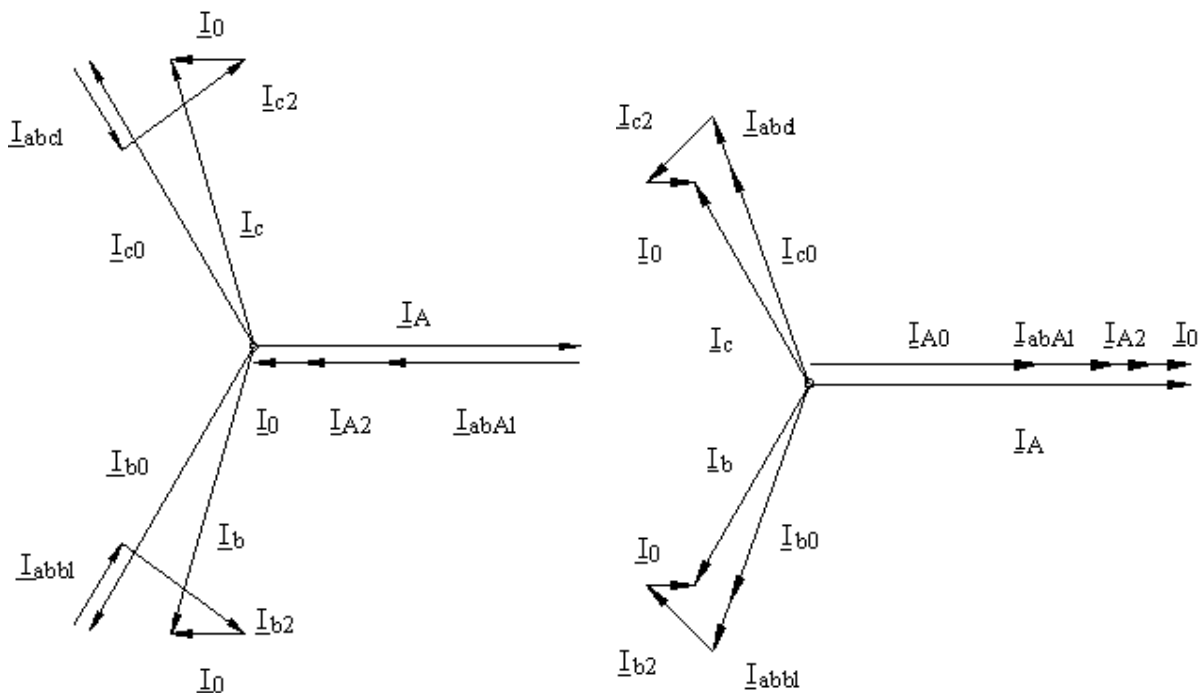


Рис. 13. Векторные диаграммы токов: а – в цепи W2; б – в цепи W1

Пример 13.4

Для условий примера 13.1 построить векторные диаграммы напряжений при разрыве одной или двух фаз.

Разрыв одной фазы.

Суммарное сопротивление прямой последовательности:

$$X_{C1} = 0,21 + 0,132 + 0,185 - 0,007 + 0,08 = 0,6.$$

Суммарное сопротивление обратной последовательности:

$$X_{C2} = 0,255 + 0,132 + 0,185 - 0,007 + 0,08 = 0,645.$$

Суммарное сопротивление нулевой последовательности:

$$X_{C0} = 0,132 + 0,57 - 0,007 + \left(\frac{0,08 \cdot 0,095}{0,08 + 0,095} \right) = 0,74.$$

Суммарная ЭДС и ХΔ:

$$E_C = 1 + 1,09 = 2,09;$$

$$X_{\Delta}^{(H1)} = \left(\frac{0,645 \cdot 0,74}{0,645 + 0,74} \right) = 0,345;$$

$$X_{\Delta}^{(H2)} = 0,645 + 0,74 = 1,385.$$

Значения составляющих токов прямой, обратной и нулевой последовательностей:

$$I_1^{(H1)} = \frac{E_C}{X_{C1} + X_{\Delta}^{(H1)}} = \frac{2,09}{0,6 + 0,345} = 2,21;$$

$$I_2^{(H1)} = -I_{L1}^{(H1)} \cdot \frac{X_{\Delta L}^{(H1)}}{X_{\Sigma 2}} = -2,21 \cdot \frac{0,345}{0,645} = -1,182;$$

$$I_0^{(H1)} = -I_{L1}^{(H1)} \cdot \frac{X_{\Delta L}^{(H1)}}{X_{\Sigma 0}} = -2,21 \cdot \frac{0,345}{0,74} = -1,03.$$

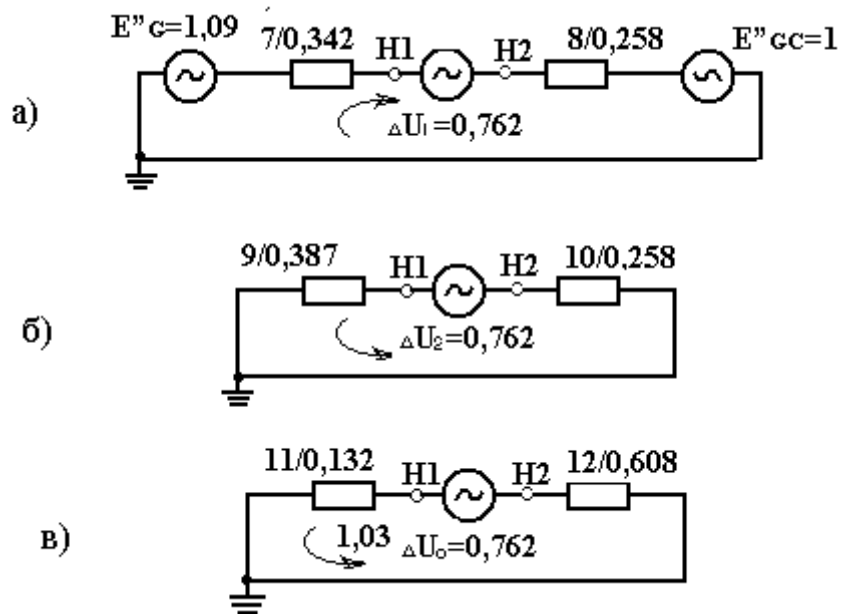
Проверка:

$$I_1^{(H1)} + I_2^{(H1)} + I_0^{(H1)} = 2,21 - 1,182 - 1,03 = 0;$$

$$I_1^{(H2)} = I_2^{(H2)} = I_0^{(H2)} = \frac{E_C}{X_{\Sigma 1} + X_{\Delta}^{(H2)}} = \frac{2,09}{0,6 + 1,385} = 1,05.$$

Падения напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей:

$$U_1^{(H1)} = U_2^{(H1)} = \Delta U_0^{(H1)} = jX_{\Delta}^{(H1)} \cdot I_1^{(H1)} = j0,345 \cdot 2,21 = 0,762.$$



Схемы замещения прямой (а), обратной (б) и нулевой (в) последовательностей.

Напряжение прямой последовательности:

Точки Н1:

$$U_{1H1} = 1,09 - I_1 \cdot X_1^{(1)} = 1,09 - 2,21 \cdot 0,342 = 0,334.$$

Точки Н2:

$$U_{1H2} = -1 + I_1 \cdot X_1^{(11)} = -1 + 2,21 \cdot 0,258 = -0,429$$

или

$$U_{1H2} = U_{1H1} - \Delta U = 0,334 - 0,762 = 0,429.$$

Напряжение обратной последовательности:

Точки Н1:

$$U_{2H1} = I_{L2}^{(1)} \cdot X_{2\Sigma}^{(1)} = 1,182 \cdot 0,387 = 0,457.$$

Точки Н2:

$$U_{2H2} = -1,182 \cdot 0,258 = -0,305.$$

Напряжение нулевой последовательности:

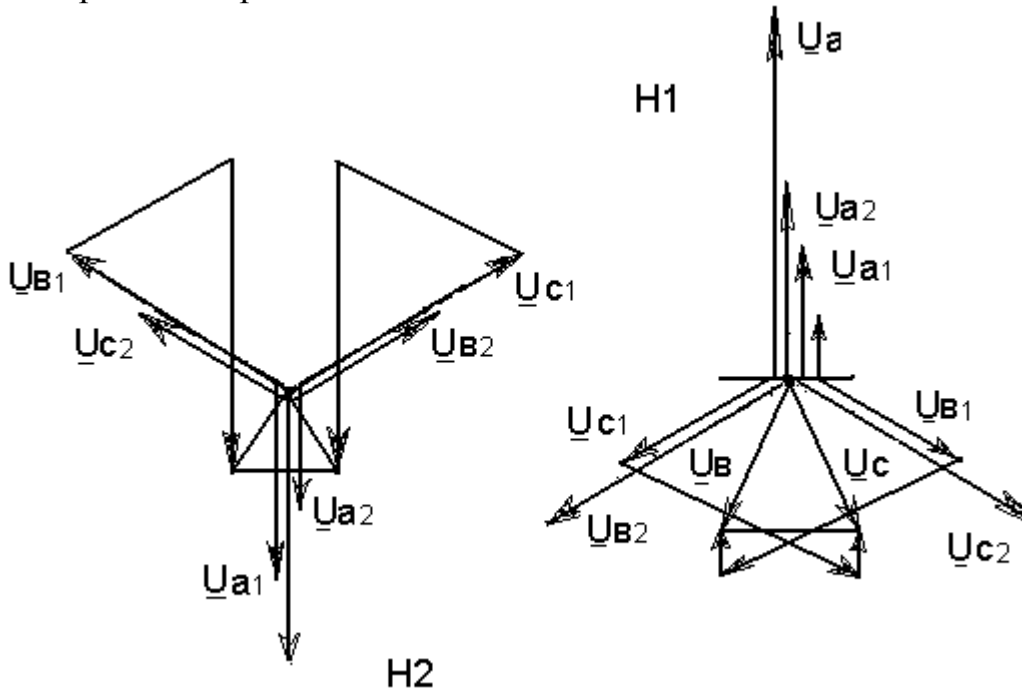
Точки Н1:

$$U_{0H1} = 1,03 \cdot 0,132 = 0,136.$$

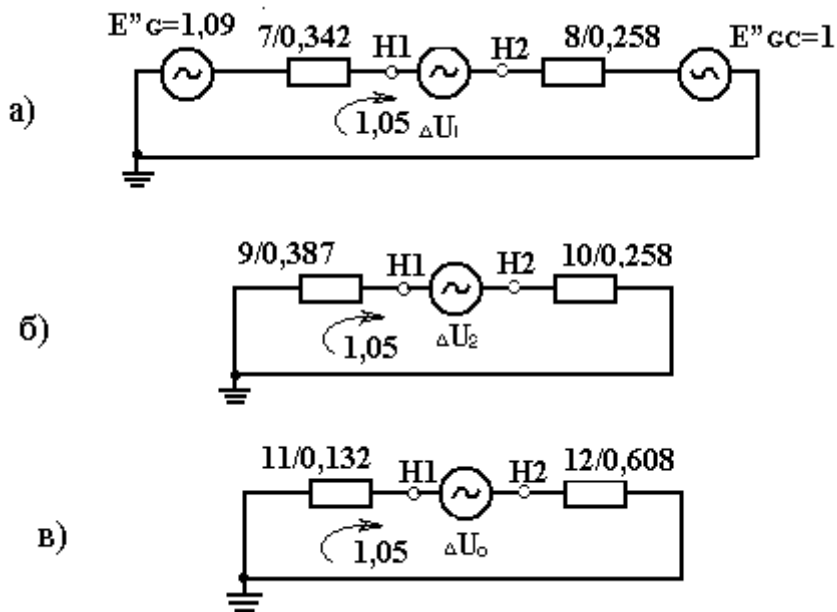
Точки Н2:

$$U_{0H2} = -1,03 \cdot 0,608 = -0,626.$$

Векторные диаграммы:



Разрыв двух фаз



Схемы замещения прямой (а), обратной (б) и нулевой (в) последовательностей.

Напряжение прямой последовательности:

Точки Н1:

$$U_{1H1} = 1,09 - I_1 \cdot X_1^{(H1)} = 1,09 - 1,05 \cdot 0,342 = 0,731.$$

Точки Н2:

$$U_{1H2} = -1 + I_1 \cdot X_1^{(H2)} = -1 + 1,05 \cdot 0,258 = -0,729;$$

$$\Delta U_1 = U_{1H1} + U_{1H2} = 0,731 - (-0,729) = 1,46;$$

$$\Delta U_{LA1} = I_{LA1} \cdot jX_{AL}^{(2)} = 1,05 \cdot j1,385 = 1,46.$$

Напряжение обратной последовательности:

Точки Н1:

$$U_{0H1} = -I_0 \cdot X_0^{(H1)} = -1,05 \cdot 0,132 = -0,139.$$

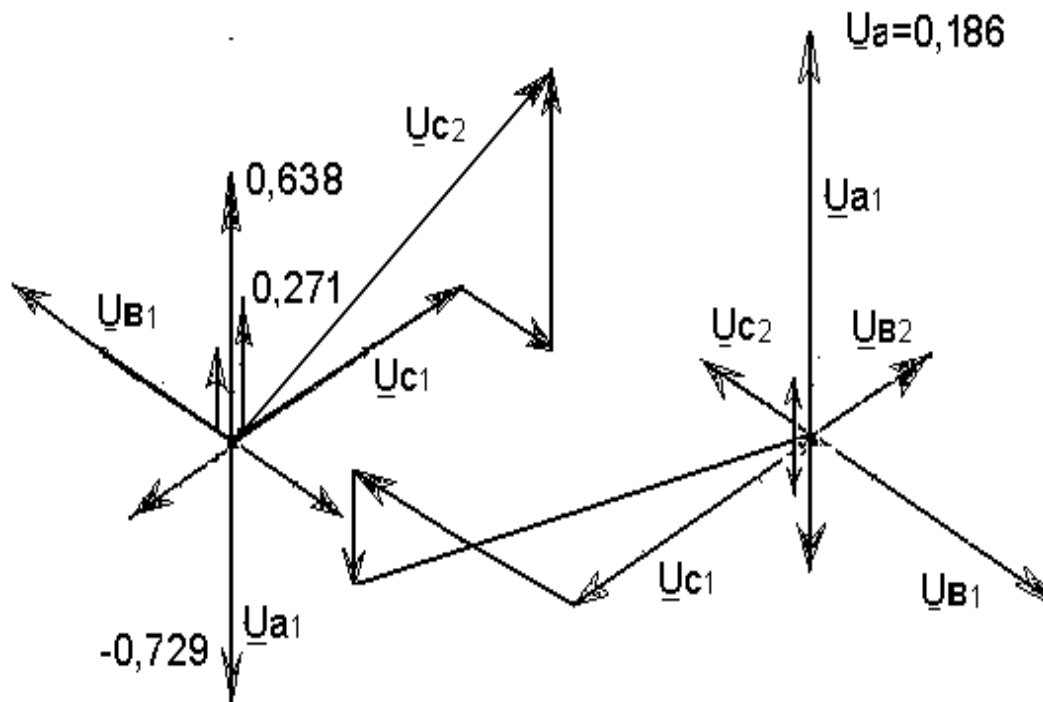
Точки Н2:

$$U_{0H2} = -I_0 \cdot X_0^{(H2)} = -1,05 \cdot 0,608 = -0,638;$$

$$\Delta U_0 = U_{0H1} + U_{0H2} = -0,139 + (-0,638) = -0,777;$$

$$\Delta U_1 = -(\Delta U_2 + \Delta U_0) = -(0,677 + 0,777) = -1,46.$$

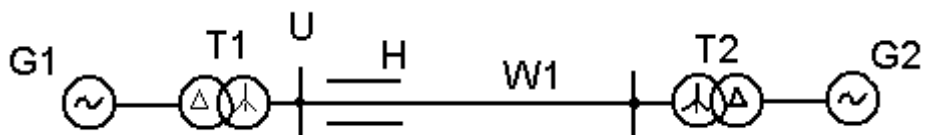
Векторные диаграммы:



Домашнее задание № 10

Для заданной системы электроснабжения при разрыве одной и двух фаз:

1. Определить токи в неповрежденных фазах;
2. Построить векторные диаграммы токов;
3. Построить векторные диаграммы напряжений.



№ вар	G1	T1	W1, км	T2	G2	U, кВ
1	ТВС-32У3 S=40 МВА X''d=0,153; X2=0,127	ТДЦ-40000 Uк=10,5 %	50	ТДЦ-40000 Uк=10,5 %	Нагрузка (ОН) S=40 МВА	110
2	- -	- -	60	-	Система Sкc=800 МВА X1=X2=X0=0,1	110
3	- -	- -	70	ТД-16000 Uк=10 %	Нагрузка (ОН) S=16 МВА	110
4	- -	- -	80	ТД-10000 Uк=10 %	Нагрузка(ОН) S=10 МВА	110
5	Т-12-2У3 S=15 МВА X''d=0,119; X2=0,145	ТД-16000 Uк=10 %	40	ТД-16000 Uк=10 %	Система Sкc=1000 МВА X1=X2=X0=0,12	110
6	- -	ТД-10000 Uк=10 %	80	ТД-10000 Uк=10 %	Нагрузка(ОН) S=100 МВА	220
7	- -	- -	60	- -	- -	110
8	Система Sкc=600 МВА *	- -	70	- -	- -	110
9	Система Sкc=700 МВА *	ТД-16000 Uк=10 %	40	ТД-16000 Uк=10 %	- -	110
0	Система Sкc=1500 МВА *	-	50	-	Система Sкc=700 МВА	220

Примечание. * – мощности S_{кc} приведены к напряжению U₁.

14. СЛОЖНЫЕ ВИДЫ ПОВРЕЖДЕНИЙ

14.1. Общие замечания

Сложные виды повреждений представляют собой совокупность нескольких несимметричных замыканий или нарушений продольной несимметрии отдельных участков системы. Возможны случаи, когда в системе одновременно возникают как поперечные, так и продольные несимметрии в самых различных комбинациях.

Практический интерес обычно представляет одновременное нарушение симметрии лишь в двух точках системы, так как более сложные повреждения являются редкими исключениями. Поэтому в дальнейшем рассмотрена лишь двукратная несимметрия, причем предполагается, что обе несимметрии возникают практически одновременно.

Рассмотрим основные принципы расчета таких повреждений. Их конкретное применение показано на двух наиболее часто встречающихся случаях: при двойных замыканиях на землю в сети с изолированной нейтралью и при однофазном КЗ с одновременным разрывом фазы.

14.2. Двойное замыкание на землю

Предположим в произвольных точках М и N сети, работающей с изолированной нейтралью, произошли одновременные замыкания на землю фаз В и С (рис. 14.1 а). При этом для упрощения примем, что оба замыкания являются металлическими, а все элементы сети – чисто индуктивными.

Граничные условия в общих точках замыкания будут:

$$\underline{I}_M A = 0; \underline{I}_M C = 0; \underline{U}_M B = 0; \underline{I}_N A = 0, \underline{I}_N B = 0, \underline{U}_N C = 0. \quad (14.1)$$

Дополнительным условием является равенство:

$$\underline{I}_M B = -\underline{I}_N C. \quad (14.2)$$

Приняв неповрежденную фазу А за основную, запишем через симметричные составляющие следствия, которые вытекают из этих граничных условий:

$$\begin{aligned} \underline{I}_M B_2 &= \underline{I}_M B_1 \text{ или } \underline{I}_M A_2 = a \underline{I}_M A_1, \\ \underline{I}_M 0 &= \underline{I}_M B_1 \text{ или } \underline{I}_M 0 = a^2 \underline{I}_M A_1, \\ \underline{U}_M B_1 + \underline{U}_M B_2 + \underline{U}_M 0 &= a^2 \underline{U}_M A_1 + a \underline{U}_M A_2 + \underline{U}_M 0 = 0, \\ \underline{I}_N C_2 &= \underline{I}_N C_1 \text{ или } \underline{I}_N A_2 = a^2 \underline{I}_N A_1, \\ \underline{I}_N 0 &= \underline{I}_N C_1 \text{ или } \underline{I}_N 0 = a \underline{I}_N A_1, \end{aligned} \quad (14.3)$$

$$\underline{U}_{NC1} + \underline{U}_{NC2} + \underline{U}_{N0} = a \underline{U}_{NA1} + a^2 \underline{U}_{NA2} + \underline{U}_{N0} = 0,$$

и, наконец, из (14.2) в соответствии с (14.3):

$$\underline{I}_{NA1} = -a \underline{I}_{MA1}. \quad (14.4)$$

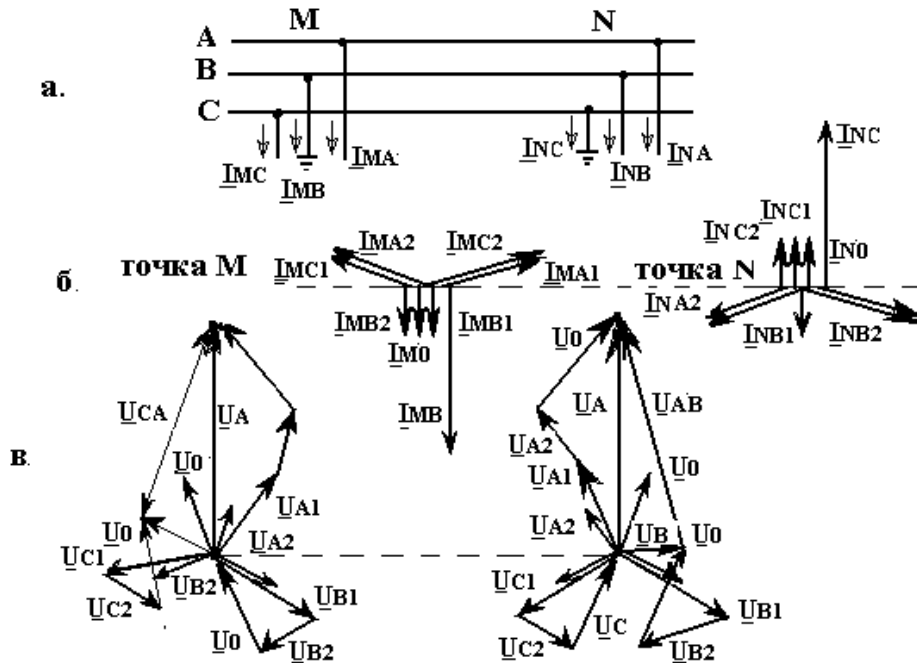


Рис. 14.1. Двойное замыкание на землю: а – принципиальная схема; б – векторные диаграммы токов в точках М и N; в – то же напряжений в точках М и N

Равенство (14.4) показывает, что симметричные составляющие токов в обоих местах замыкания не являются независимыми переменными, а находятся в жесткой связи между собой, как это наглядно иллюстрируют векторные диаграммы на рис. 14.2.

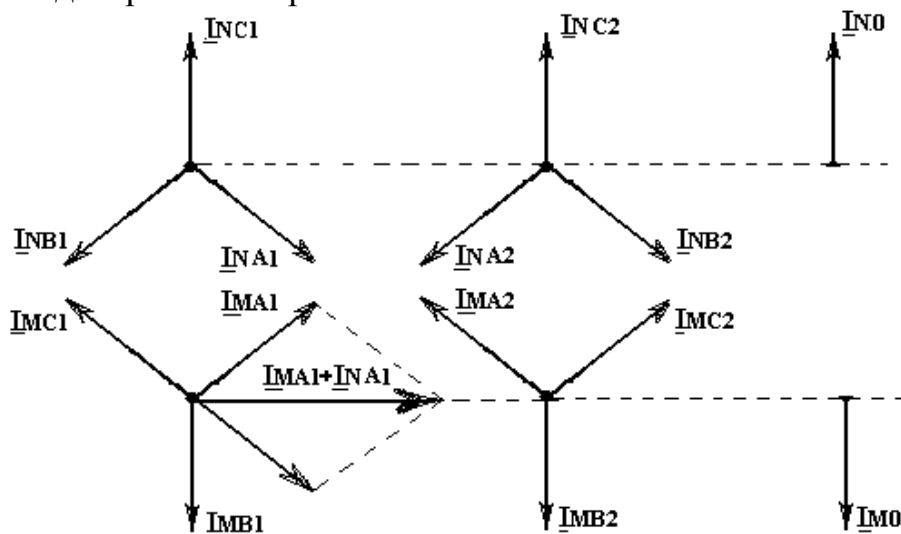


Рис. 14.2. Симметричные составляющие токов в местах двойного замыкания на землю

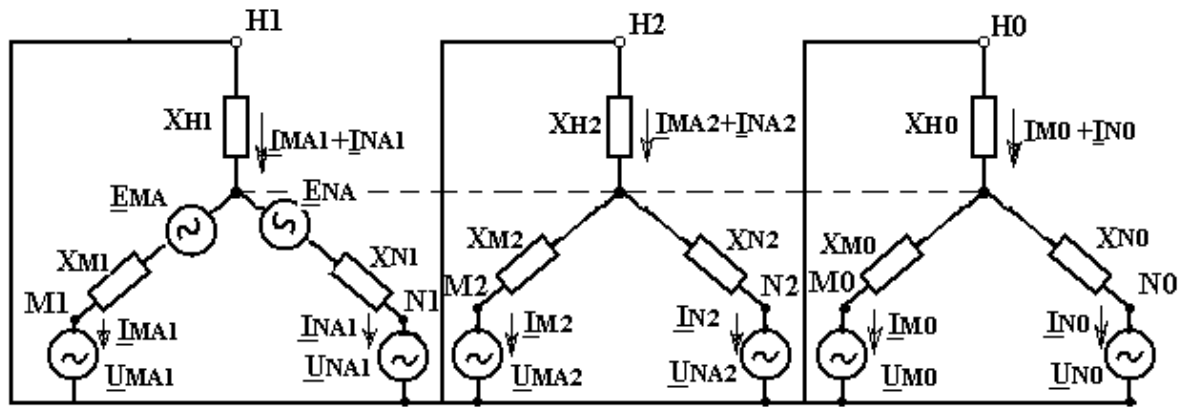


Рис. 14.3. Элементарные схемы прямой (а), обратной (б) и нулевой (в) последовательностей при двойном замыкании на землю

Электрические схемы замещения отдельных последовательностей для рассматриваемого случая приведены на рис. 14.3.

Уравнения связи между токами и напряжениями прямой и обратной последовательностей в точках М и N (рис. 14.1 а).

Для прямой последовательности (рис. 14.3 а):

$$\underline{U}_{MA1} = \underline{E}_{MA} - j\underline{I}_{MA1}(X_{M1} + X_{H1}) - j\underline{I}_{NA1}X_{N1}; \quad (14.5)$$

$$\underline{U}_{NA1} = \underline{E}_{NA} - j\underline{I}_{MA1}X_{N1} - j\underline{I}_{NA1}(X_{N1} + X_{H1}).$$

Для обратной последовательности (рис. 14.3 б):

$$\underline{U}_{MA2} = -j\underline{I}_{MA2}(X_{M2} + X_{H2}) - j\underline{I}_{NA2}X_{N2}; \quad (14.6)$$

$$\underline{U}_{NA2} = -j\underline{I}_{MA2}X_{N2} - j\underline{I}_{NA2}(X_{N2} + X_{H2}).$$

Для нулевой последовательности (рис. 14.3 в):

$$\underline{U}_{M0} = -j\underline{I}_{M0}(X_{M0} + X_{H0}) - j\underline{I}_{N0}X_{N0}; \quad (14.7)$$

$$\underline{U}_{N0} = -j\underline{I}_{M0}X_{N0} - j\underline{I}_{N0}(X_{N0} + X_{H0}).$$

Для схемы нулевой последовательности (рис. 14.3 в) имеется лишь одно уравнение:

$$\underline{U}_{N0} - \underline{U}_{M0} = j\underline{I}_{M0} \cdot X_{MN0}. \quad (14.8)$$

Благодаря простоте соотношений, вытекающих из граничных условий, решение полученной системы 12 уравнений сводится к замене всех неизвестных, например, через ток для его определения получаем следующее выражение:

$$\underline{I}_{MA1} = \frac{\underline{E} - a^2 \underline{E}_{H1}}{j(3X_{H1} + X_{M1} + X_{N1} + X_0)}, \quad (14.9)$$

где

$$\underline{X0} = 3\underline{X}_{H2} + \underline{X}_{M2} + \underline{X}_{N2} + \underline{X}_{MN0}. \quad (14.10)$$

Для тока поврежденных фаз в местах замыкания на землю имеем:

$$\underline{I}_{MB} = 3a^2 \cdot \underline{I}_{MA1} = -\underline{I}_{NC}. \quad (14.11)$$

Выражения для симметричных составляющих напряжений в точках М и N удобнее представить через ток $\underline{I}_{MB} = -\underline{I}_{N0}$ и при этом получить:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{MA1} &= \underline{E}_{MA} - j\underline{I}_{M0} \cdot [(a - a^2)\underline{X}_{H1} + a\underline{X}_{M1}]; \\ \underline{U}_{MA1} &= j\underline{I}_{M0} \cdot [(a^2 - a)\underline{X}_{H2} + a^2\underline{X}_{M2}]; \\ \underline{U}_{M0} &= -(a^2\underline{U}_{MA1} + a\underline{U}_{MA2}); \\ \underline{U}_{NA1} &= \underline{E}_{NA} - j\underline{I}_{M0} \cdot [(a - a^2)\underline{X}_{H1} - a^2\underline{X}_{N1}]; \\ \underline{U}_{NA2} &= -j\underline{I}_{M0} \cdot [(a^2 - a)\underline{X}_{H2} - a\underline{X}_{N2}]; \\ \underline{U}_{N0} &= -(a\underline{U}_{NA1} + a^2\underline{U}_{NA2}). \end{aligned} \quad (14.12)$$

На рис. 14.1 б, в, г приведены векторные диаграммы токов и напряжений в местах двойного замыкания на землю. Диаграммы напряжений показывают, что величина и сдвиги фазных напряжений зависят от соотношения между реактивными сопротивлениями элементарных схем отдельных последовательностей (рис. 14.3 б, в, г). Контролем правильности расчета может служить соблюдение условия, что в чисто индуктивной цепи угол между током \underline{I}_{M0} и разностью напряжений ($\underline{U}_{N0} - \underline{U}_{M0}$) должен быть 90 эл. град.

После того, как найдены симметричные составляющие токов и напряжений в местах двойного замыкания на землю, их распределение в схемах соответствующих последовательностей можно найти обычным путем. Поскольку симметричные составляющие одноименной последовательности в обеих точках несимметрии сдвинуты друг относительно друга (а в схеме прямой последовательности и по отношению к ЭДС), то, несмотря на однородный характер сопротивлений элементов схемы, расчет токораспределения требует операций с комплексными числами.

При данном виде двойной несимметрии токораспределение значительно проще найти, применяя наложения. Для этого, считая схемы всех последовательностей пассивными, следует найти распределение тока каждой последовательности \underline{I}_{MI} при $\underline{I}_{NI} = 0$ ($i = 1, 2, 0$), а затем, наоборот, распределение тока \underline{I}_{NI} при $\underline{I}_{MI} = 0$. Действительная величина тока каждой последовательности в произвольной ветви будет:

$$\underline{I}_i = C_i^{(M)} \cdot \underline{I}_{MI} + C_i^{(N)} \cdot \underline{I}_{NI}, \quad (14.13)$$

где $C_i^{(M)}$, $\tilde{N}_i^{(N)}$ – коэффициенты распределения, найденные для данной ветви, соответственно, при $\underline{I}M_i = 1$, когда $\underline{I}N_i = 0$, и при $\underline{I}N_i = 1$, когда $\underline{I}M_i = 0$.

Для получения тока прямой последовательности нужно к току, найденному по (14.13), прибавить ток, проходящий по этой ветви при отсутствии обеих несимметрий.

В большинстве практических расчетов двойного замыкания на землю принимают одинаковыми схемы прямой и обратной последовательностей, но в схеме обратной последовательности отсутствуют ЭДС. При этом выражения для фазных токов любой ветви могут быть приведены к простому виду:

$$\begin{aligned} \underline{I}A &= [C_0 - C(M) - C(N)] \underline{I}M_0; \\ \underline{I}B &= [C_0 + (2C(M) + C(N))] \underline{I}M_0; \\ \underline{I}C &= [C_0 - (C(M) + 2C(N))] \underline{I}M_0. \end{aligned} \quad (14.14)$$

где C_0 – коэффициент распределения для данной ветви в схеме нулевой последовательности (считая $\underline{I}M_0 = -\underline{I}N_0 = 1$).

$C(M)$, $C(N)$ – те же коэффициенты, которые указаны выше; при принятом условии в схеме прямой и обратной последовательностей они одинаковы, поэтому индекс последовательностей опущен.

В общем случае к этим фазным токам нужно прибавить ток в той же ветви при отсутствии двойного замыкания.

Для практического определения тока прямой последовательности (а по нему и полного тока) в месте двойного замыкания на землю удобно использовать приближенную схему, представленную на рис. 14.4. Здесь каждая из точек двойного замыкания в схеме прямой последовательности (M_1 и N_1) соединена с точкой нулевого потенциала через реактивность:

$$X_{(n)} = \frac{2 \cdot (3X_{H2} + X_{M2} + X_{N2} + X_{MN0})}{3} = \frac{2X_0}{3}. \quad (14.15)$$

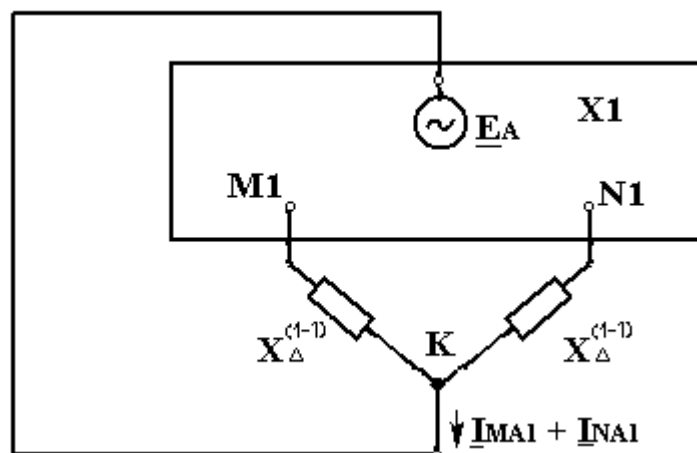


Рис. 14.4. Приближенная схема замещения для определения тока прямой последовательности при двойном замыкании на землю

При этом следует иметь в виду, что поскольку в такой схеме отсутствует сдвиг между токами \underline{I}_{MA1} и \underline{I}_{NA1} , она позволяет найти приближенное значение модуля суммы этих токов. Поэтому затем легко найти модули токов в каждом месте двойного замыкания, т. к. в соответствии с рис. 14.3 имеем:

$$\underline{I}_{M1} = \underline{I}_{N1} = \underline{I}_{MA1} + \underline{I}_{NA1}. \quad (14.16)$$

Ошибка, обусловленная применением указанной приближенной схемы, обычно не превышает 5...10 %. Преимуществом этой схемы при расчете двойного замыкания является возможность применения всех практических методов расчета переходного процесса КЗ в одной точке.

14.3. Однофазное КЗ с разрывом фазы

Рассмотрим случай, когда одновременно возникают поперечная и продольная несимметрия.

Пусть на каком-либо участке сети, нейтраль которой заземлена, произошел разрыв одного провода, причем один конец провода заземлился, а другой остался изолированным (рис. 14.5). Питание данного участка предполагается с обеих его сторон.

Граничные условия будут:

$$\underline{I}_{kB} = 0; \underline{I}_{LA} = 0; \underline{I}_{kC} = 0; \Delta \underline{U}_{LB} = 0; \underline{U}_{kA} = 0; \Delta \underline{U}_{LC} = 0. \quad (14.17)$$

Основные уравнения:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{LA1} &= \underline{E}_{LA} - j\underline{I}_{LA1}(\underline{X}_{L1} + \underline{X}_{H1}) - j\underline{I}'_{A1}\underline{X}_{H1}; \\ \underline{U}'_{A1} &= \underline{E}'_{A} - j\underline{I}_{LA1}\underline{X}_{H1} - j\underline{I}'_{A1}(\underline{X}_{L'} + \underline{X}_{H1}); \\ \underline{U}_{LA2} &= -j\underline{I}_{LA2}(\underline{X}_{L2} + \underline{X}_{H2}) - j\underline{I}'_{A2}\underline{X}_{H2}; \\ \underline{U}'_{A2} &= -j\underline{I}_{LA2}\underline{X}_{H2} - j\underline{I}'_{A2}(\underline{X}_{L'2} + \underline{X}_{H2}); \\ \underline{U}_{L0} &= -j\underline{I}_{L0}(\underline{X}_{L0} + \underline{X}_{H0}) - j\underline{I}'_{0}\underline{X}_{H0}; \\ \underline{U}'_{0} &= -j\underline{I}_{L0}\underline{X}_{H0} - j\underline{I}'_{0}(\underline{X}_{L'0} + \underline{X}_{H0}). \end{aligned} \quad (14.18)$$

Используя (14.17) и (14.18), получим дополнительную связь между неизвестными токами и напряжениями прямой последовательности в местах несимметрии:

$$\begin{aligned} \Delta \underline{U}_{LA1} &= j\underline{X}_{k}\underline{I}_{kA1} + j\underline{X}_{kL}\underline{I}_{LA1}; \\ \Delta \underline{U}'_{A1} &= j\underline{X}_{kL}\underline{I}_{kA1} + j\underline{X}_{L}\underline{I}_{LA1}, \end{aligned}$$

где $\underline{X}_k = \underline{X}_{k2} + \underline{X}_{k0} + (\underline{X}_{kL2} - \underline{X}_{kL0})^2 / (\underline{X}_{L2} + \underline{X}_{L0})$; (14.19)

$$X_L = X_{L2} X_{L0} / (X_{L2} + X_{L0});$$

$$X_{kL} = (X_{kL2} X_{L0} + X_{kL0} X_{L2}) / (X_{L2} + X_{L0}),$$

где X_{K2} , X_{K0} – реактивности схемы соответствующей последовательности относительно точки КЗ при полном разрыве схемы в точке L; X_{L2} , X_{L0} – то же относительно места разрыва при отсутствии КЗ; X_{KL2} , X_{KL0} – взаимные реактивности между точкой КЗ и местом разрыва в схемах соответствующих последовательностей.

Придадим уравнениям (14.18) несколько иной вид, введя в правую часть каждого уравнения два одинаковых, но противоположных по знаку слагаемых:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{kA1} &= jX_k \underline{I}_{kA1} + jX_{kL} \underline{I}_{LA1} \pm jX_{kL} \underline{I}_{kL1} = \\ &= j(X_k - X_{kL}) \underline{I}_{kA1} + jX_{kL} (\underline{I}_{kA1} + \underline{I}_{LA1}); \end{aligned} \quad (14.20)$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{LA1} &= jX_{kL} \underline{I}_{kA1} + jX_L \underline{I}_{LA1} \pm jX_{kL} \underline{I}_{LA1} = \\ &= jX_{kL} (\underline{I}_{kA1} + \underline{I}_{LA1}) + j(X_L + X_{k1}) \underline{I}_{LA1}. \end{aligned}$$

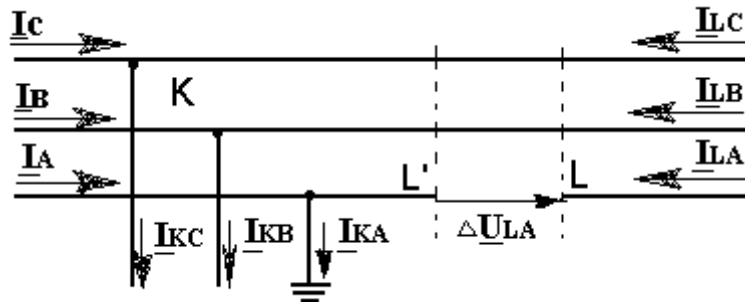


Рис. 14.5. Однофазное КЗ с одновременным разрывом той же фазы

Уравнениям (14.20) соответствует схема замещения, представленная на рис. 14.6, из которой следует, что при рассматриваемой двукратной несимметрии расчет токов и напряжений прямой последовательности (при ранее принятых допущениях) сводится к расчету эквивалентного КЗ в некоторой точке С, связанной с точками К1 и L1 схемы прямой последовательности реактивными сопротивлениями X_{KL} , $(X_K - X_{KL})$ и $(X_L - X_{KL})$, величины которых согласно (14.20) определяются реактивными сопротивлениями только схем обратной и нулевой последовательностей.

Таким образом, в данном случае соблюдается правило эквивалентности прямой последовательности со всеми вытекающими из него следствиями.

Нужно отметить, что на схеме рис. 14.6 за положительное направление тока \underline{I}_{LA1} принято направление от места замыкания. Чтобы увязать с

обычно принимаемым условием, что токи имеют положительное направление к точке КЗ, необходимо у найденного тока \underline{I}_{LA1} изменить знак.

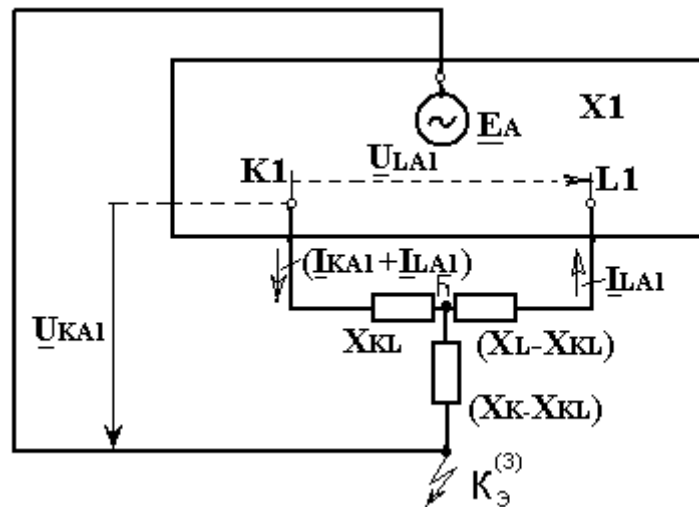


Рис. 14.6. Схема прямой последовательности для случая однофазного КЗ с одновременным разрывом той же фазы

Напряжение прямой последовательности в месте КЗ относительно нулевого провода и относительно оборванного конца фазы (ΔU_{LA1}) определяется суммой соответствующих падений напряжений в схеме рис.14.6.

Остальные симметричные составляющие токов и напряжений в местах несимметрии определяются из соотношений, которые вытекают из граничных условий и уравнений связи (14.5) и (14.6).

Распределение токов и напряжений находят обычными приемами или с использованием принципа наложения.

Если приведенные ЭДС источников равны между собой и параметры схем прямой и обратной последовательностей принять одинаковыми, то для определения тока прямой последовательности в месте КЗ при одновременном разрыве той же фазы с одной стороны можно получить расчетное выражение:

$$\underline{I}_{(A)} = \frac{\underline{E}_{A1}}{j(X_{(1)} + aX_{(L)})}, \quad (14.21)$$

где $X_{(1)} = 2X_1 + X_0$ – результирующая реактивная мощность при однофазном КЗ в точке К и отсутствии разрыва фазы в точке L;

$$a = \left(\frac{X_{L0}}{X_{L0}} + \frac{2X_{L1}}{X_{L1}} \right)^2$$

$$X_{(L)} = \frac{X_{L1} \cdot X_{L0}}{(X_{L1} + 2X_{L0})},$$

где X_{L1} и X_{KL1} – то же, что ранее X_{L2} и X_{KL2} .

Из структуры выражения (14.21) непосредственно видно уменьшение тока КЗ, вызванного одновременным разрывом поврежденной фазы с одной стороны.

Пример 14.1

При двойном замыкании на землю в точках М и N схемы рис. 14.7 а определить фазные токи линии и обеих трансформаторов (на стороне, где произошло замыкание), а также фазные напряжения в местах замыкания. Результаты представить векторными диаграммами. Расчет произвести для начального момента, считая, что генератор предварительно работал на холостом ходу с номинальным напряжением.

Генератор G 37,5 МВ·А; 6,3 кВ; $X''_d = 0,143 = X_1 = X_2$.

Трансформатор Т – 1 25 МВ·А; 37/6,3 кВ; $U_k = 8\%$; У/Д – 11.

Трансформатор Т – 2 40 МВ·А 115/37/10,5 кВ; $U_{BC} = 10,5\%$; У/До.

Линия W 12,5 км; $X_1 = 0,4$ Ом/км; $X_0 = 1,45$ Ом/км.

Система GС – источник бесконечной мощности ($X_1 = X_2 = X_0 = 0$) с напряжением 115 кВ.

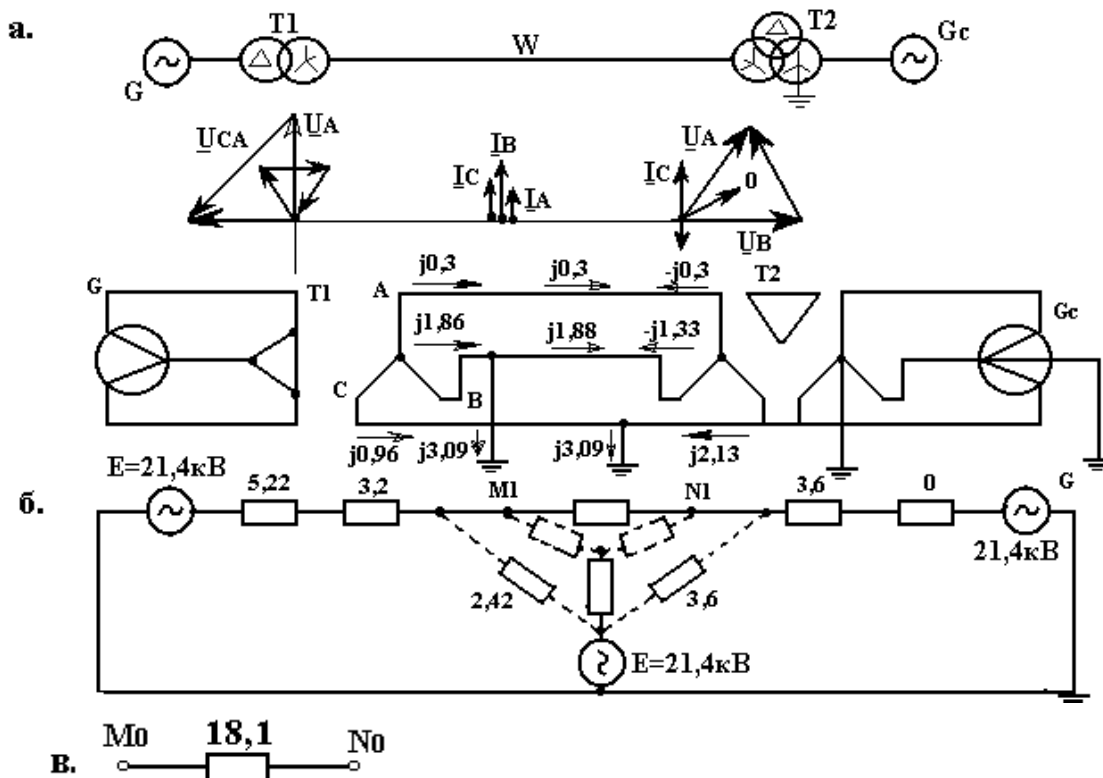


Рис. 14.7. К примеру 14.1: а) – исходная схема; распределение токов, векторные диаграммы токов и напряжений; б) – схема замещения прямой (обратной) последовательности; в) – то же нулевой последовательности

На рис. 14.7 б показана схема замещения прямой последовательности, где указаны реактивные сопротивления (Ом) всех элементов и ЭДС (кВ) источников. После исключения ЭДС, получившаяся схема является схемой замещения обратной последовательности. Схема нулевой последовательности (рис. 14.7 в) содержит только один элемент – линии.

Решение проведем в именованных единицах, относя все элементы к стороне линии.

Объединив начала генерирующих ветвей, получим треугольник, преобразование которого в звезду (пунктир на рис. 14.7 б) дает реактивные сопротивления схем прямой, обратной и нулевой последовательностей $X_{M1} = X_{M2} = 2,47 \text{ Ом}$, $X_{N1} = 2,47 \text{ Ом}$, $X_{N1} = X_{N2} = 1,06 \text{ Ом}$, $X_{N1} = X_{N2} = 1,78 \text{ Ом}$.

$$X_0 = 3 \cdot 1,78 + 2,47 + 1,06 + 1,81 = 27 \text{ Ом.}$$

Принимая $\underline{E}_a = j 21,4 \text{ кВ}$, для тока прямой последовательности имеем: $\underline{I}_{MA1} = (1-a^2)21,4/j(31,78 + 2,47 + 1,06 + 27) = 1,03 < 30 \text{ град}$ и для токов других последовательностей: $\underline{I}_{MA2} = a \underline{I}_{MA1} = 1,03 < 150 \text{ град, кА}$,

$$\underline{I}_{M0} = a^2 \underline{I}_{MA1} = -j 1,03 \text{ кА.}$$

Найдем распределение токов, для чего предварительно определим необходимые коэффициенты распределения:

$$C(M) = (3,6 + 5) / (8,42 + 3,6 + 5) = 0,505, \quad C(N) = 3,6 / 17,2 = 0,21,$$

и со стороны трансформатора Т – 2:

$$C(M) = 1 - 0,505 = 0,495;$$

$$C(N) = 1 - 0,211 = 0,789.$$

Эти коэффициенты справедливы и для схемы обратной последовательности. Поскольку при отсутствии замыканий тока в линии нет (пренебрегая емкостным током), фазные токи трансформатора Т–1 с учетом того, что здесь $I_0 = 0$, будут:

$$\underline{I}_A = - (0,505 - 0,211)(-j 1,03) = 0,3 \text{ кА};$$

$$\underline{I}_B = (2 \cdot 0,505 + 0,211)(-j 1,03) = -j 1,26 \text{ кА};$$

$$\underline{I}_C = - (0,505 + 2 \cdot 0,211)(-j 1,03) = j 0,96 \text{ кА.}$$

Для фазных токов линии имеем:

$$\underline{I}_A = j 0,3 \text{ кА}; \quad \underline{I}_B = -j 1,26 + j 3,09 = j 1,83 \text{ кА}; \quad \underline{I}_C = j 0,96 \text{ кА.}$$

Аналогично для фазных токов трансформатора Т–2 (учитывая принятое положительное направление токов, указанное стрелками на рис. 14.7 а):

$$\underline{I}_A = -0,3 \text{ кА}; \underline{I}_B = -j 1,83 \text{ кА}; \underline{I}_C = -j 0,96 + j 0,39 = j 2,13 \text{ кА}.$$

Для симметричных составляющих напряжений в точке М имеем:

$$\underline{U}_{MA1} = j21,4 + j1,03[(a-a^2)1,78 + a2,47] = 1,28 + j16 \text{ кВ},$$

$$\underline{U}_{MA2} = j1,03[(a^2-a)1,78 + a^22,47] = 1,28 + j6,23 \text{ кВ},$$

$$\underline{U}_{M0} = -[a^2(1,28 + j16) + a(1,28 + j5,23)] = -8,08 + j10,62 \text{ кВ}.$$

Аналогично для симметричных составляющих напряжений в точке N получаем: $\underline{U}_{NA1} = -0,55 + j 17,28 \text{ кВ}$; $\underline{U}_{NA2} = -0,55 + j 4,12 \text{ кВ}$; $\underline{U}_{N0} = 10,9 + j 4,12 \text{ кВ}$.

Требуемые векторные диаграммы токов и напряжений показаны на рис. 14.7 а.

Отметим, что $\underline{U}_{N0} - \underline{U}_{M0} = 10,9 + j10,7 + 8,08 - j10,62 = 18,98 + j0,08 = 18,99 \approx 19 \text{ кВ}$.

Пример 14.2

К генератору Г через трансформатор Т1 присоединена воздушная линия (рис. 14.8 а). Параметры элементов следующие:

Генератор G37,5 МВ·А; 6,3 кВ.

Трансформатор Т125 МВ·А; 37/6,3 кВ; $U_k = 8 \%$; Y/D.

Линия 12,5 км, $X_1 = 0,4 \text{ Ом/км}$, $X_0 = 45 \text{ Ом/км}$.

На линии произошло двойное КЗ на землю в точках М и N. Определить, в каком диапазоне изменится сверхпереходный ток в поврежденных фазах линии при перемещении точки N по линии, считая положение точки М неизменным (в начале линии). Составить величину этого тока с начальным сверхпереходным током при обычном двухфазном КЗ в точке N и отсутствии повреждения в точке М. Считать, что до возникновения КЗ генератор работал на холостом ходу с номинальным напряжением.

Проведем решение в именованных единицах, приведя сопротивления всех элементов к стороне линии:

для генератора:

$$X''_d = 0,143 \cdot 37^2 / 37,5 = 5,22 \text{ Ом},$$

$$E'' = 6,3 \cdot 37 / \sqrt{3} \cdot 6,3 = 21,4 \text{ кВ};$$

для трансформатора:

для линии $X_l = 0,4 \cdot 12,5 = 5 \text{ Ом}$, $X_0 = 1,45 \cdot 12,5 = 18,1 \text{ Ом}$.

Для схемы при равенстве реактивных сопротивлений генератора $X''_d = X_2$ решение задачи можно выполнить, не прибегая к методу симметричных составляющих. В самом деле, собственно реактивное сопротивление петли провод – земля определяются по заданным ее значениям X_1 и X_0 , т. е. $X_L = (X_0 + 2X_1)/3 = (18,1 + 2 \cdot 5)/3 = 9,35$ Ом.

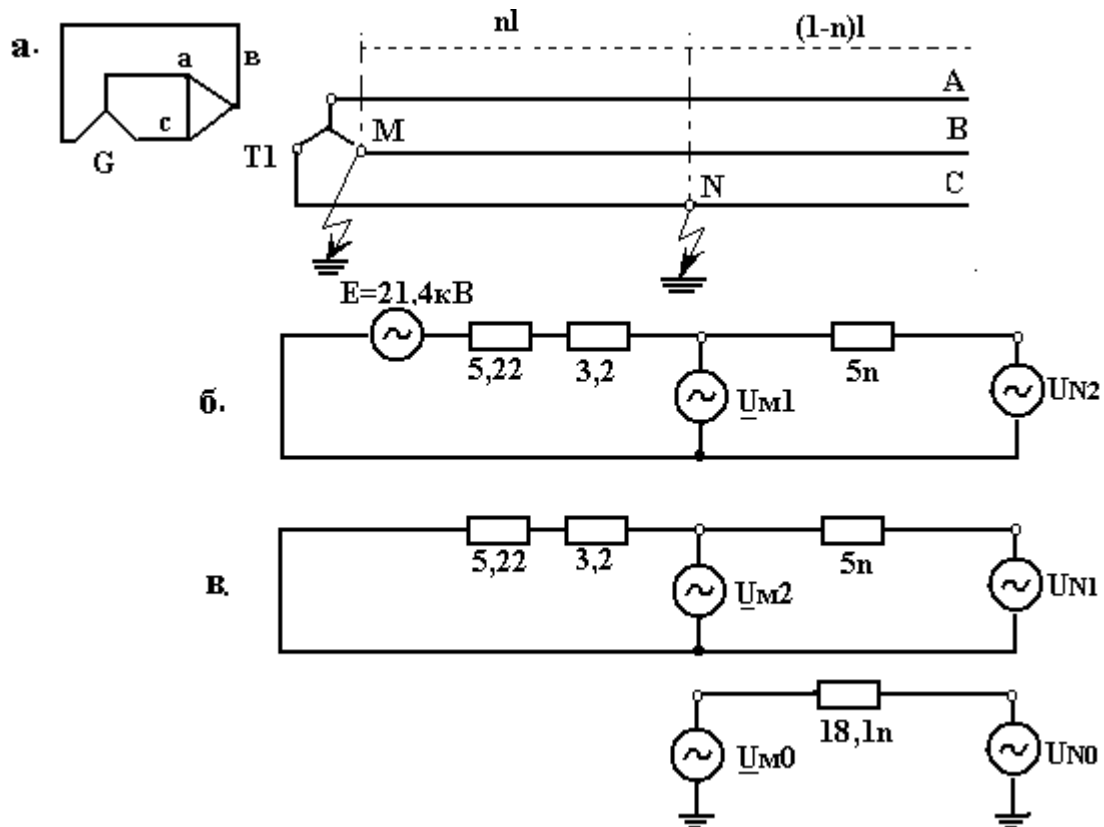


Рис. 14.8. К примеру 14.2: а – исходная схема; б, в и г – схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей

Суммарное реактивное сопротивление контура фаза генератора – трансформатора – линии с возвратом через землю и другие фазы трансформатора и генератора составляет:

$$X_c = 2(5,22 + 3,2) + 9,35n = 16,84 + 9,35n \text{ Ом,}$$

где n – относительное расстояние точки N от начала линии.

В указанном контуре действует линейная ЭДС $E'' = 37$ кВ и искомый ток будет: $I = 37/(16,84 + 9,35n)$ кА; его наибольшая величина имеет место при $n = 0$ (т. е. когда точки M и N совпадают) и составляет 2,2 кА, а наименьшая – при $n = 1$ (т. е. когда точка N расположена в конце линии) и составляет 1,41 кА.

При обычном двухфазном КЗ величина тока (как видно из сравнения с ранее полученным выражением) в данном случае немного меньше, чем двойном КЗ на землю; однако эта разница в пределе составляет только 7 %.

Как общий путь решения подобных задач покажем решение с использованием метода симметричных составляющих.

Схемы замещения отдельных последовательностей для рассматриваемой задачи показаны на рис. 14.8 б, в и г.

Для тока прямой последовательности в месте замыкания имеем:

$$I_1 = \frac{\sqrt{3} \cdot E}{3X_{H1} + X_{M1} + X_{N1} + X_D} = \frac{\sqrt{3} \cdot 21,4}{3 \cdot 8,42 + 5n + 25,26 + 23,1n},$$

где в данном случае

$$X_{H1} = 5,22 + 3,2 = 8,42 \text{ Ом};$$

$$X_{M1} = 0; X_{N1} = 5n;$$

$$\begin{aligned} X_D &= 3X_{H2} + X_{M2} + X_{N2} + X_{MN0} = 38,42 + 0 + 5n + 18,1n = \\ &= 25,26 + 23,1n. \end{aligned}$$

Для периодической составляющей тока (или сверхпереходного тока) в месте замыкания имеем:

$$I = 3I_1 = \frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot 21,4}{50,52 + 28,1n} = \frac{37}{16,84 + 9,35n},$$

т. е. то же выражение, которое было получено раньше без применения симметричных составляющих.

15. РАСЧЕТ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ НА СТОРОНЕ ВЫПРЯМЛЕННОГО ТОКА

15.1. Общие положения

Потребителям необходим выпрямленный ток по двум причинам:

1. Многие энергоемкие технологические процессы требуют постоянного тока (электролиз, электрохимические процессы и т. д.).
2. Постоянный ток обеспечивает большие удобства в управлении электродвигателями в тяговом и промышленном приводе.

По этим причинам около одной трети всей вырабатываемой электроэнергии используется потребителями постоянного тока.

В системах электроснабжения наибольшее распространение получили трехфазные схемы выпрямления тока с соединением вентилей в мостовую схему и схему с уравнительным реактором (рис. 15.1).

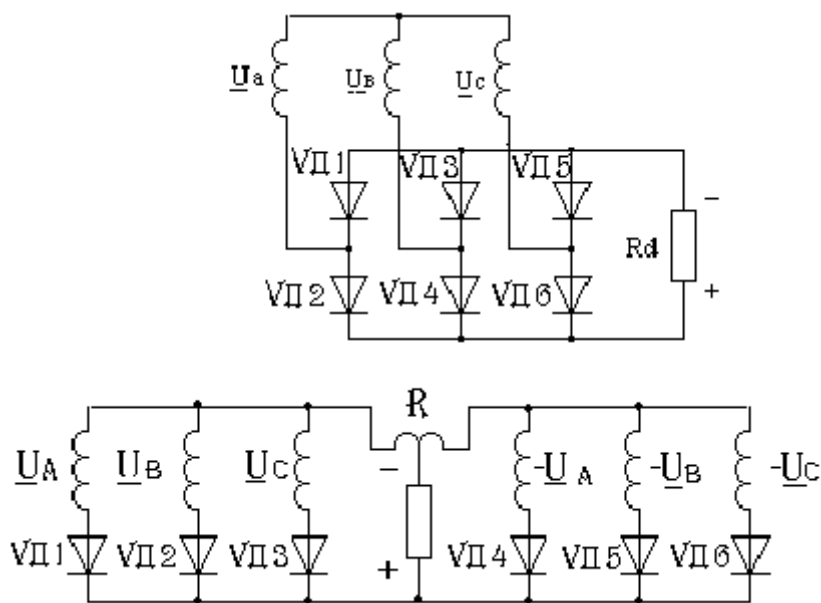


Рис. 15.1. Трехфазные схемы выпрямления; а) – мостовая схема (схема Ларионова); б) – схема с уравнительным реактором LR

Для удобства использования основные соотношения между переменными и выпрямленными токами и напряжениями промышленных схем выпрямления сведены в таблицу 15.1.

Таблица 15.1

Схема	Мостовая схема	Схема с уравнильным реактором
m	6	6
U _d /U ₂	2,34	1,17
U _{обр.макс} /U _d	1,045	2,09
I ₂ /I _d	0,815	0,289
I ₁ *w ₁ /I _d *w ₂	0,816	0,408
S ₁ /P _d	1,045	1,045
S ₂ /P _d	1,045	1,485
S _T /P _d	1,045	1,26

Примечание. U_i – фазное напряжение вторичной обмотки трансформатора; U_d/U₂ – коэффициент выпрямленного напряжения; U_{обр макс}/U_d – коэффициент обратного напряжения; m – число фаз выпрямления; U_d – среднее значение выпрямленного напряжения; I_d – среднее значение выпрямленного тока; U_{обр макс} – максимальное значение обратного напряжения; U₁, U₂, I₁, I₂ – действующие значения фазных напряжений и токов трансформатора; S₁, S₂, S – расчетные – первичная, вторичная и типовая мощности трансформатора; P_d – мощность на стороне выпрямленного тока; I_{d макс} – максимальное значение прямого анодного тока вентиля; W₁, W₂ – число витков первичной и вторичной обмотки трансформатора

15.2. Расчет тока КЗ на стороне выпрямленного тока

Для расчета принимается наиболее тяжелый режим, когда угол управления при КЗ равен нулю.

Среднее значение установившегося тока КЗ равно сумме средних значений токов в n вентилях, питающих место КЗ:

$$Idk = n \Gamma dk = \frac{n}{2\pi} \int_0^{\pi} \frac{\sqrt{2}U_2}{x_2} \sin \theta d\theta = \frac{n\sqrt{2}U_2}{\pi x_2},$$

где U₂ – фазное напряжение активной цепи; X₂ – индуктивное сопротивление цепи коммутации.

Для схемы с уравнильным реактором число вентилях, через которые протекает ток КЗ, n=6:

$$Idk = 6 \frac{\sqrt{2}U_2}{\pi x_2} = 2,7 \frac{U_2}{x_2}.$$

Для мостовой схемы n=3:

$$Idk = 3 \frac{\sqrt{2}U_2}{\pi x_2} = 1,35 \frac{U_2}{x_2}.$$

Если сопротивления выражены в ОЕ и приведены к базисной мощности, за которую принята номинальная мощность трансформатора, то ток в схеме с уравнительным реактором:

$$Idk_{yd} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi U_2} \cdot \frac{S_{HT}}{x_2} = 0,9 \frac{S_{HT}}{U_2 \cdot x_2};$$

ток в мостовой схеме:

$$Idk_{mdk_m} = \frac{\sqrt{2}}{\pi U_2} \cdot \frac{S_{HT}}{x_2} = 0,45 \frac{S_{HT}}{U_2 \cdot x_2}.$$

С учетом активных сопротивлений

$$Idk_{yd} = 2,7 \frac{U_2}{\sqrt{Rk^2 + xk^2}},$$

$$Idk_{mdk_m} = 1,35 \frac{U_2}{\sqrt{Rk^2 + xk^2}}.$$

Установившийся ток КЗ имеет пульсирующий характер. Максимальное значение этого тока

$$Idk_{\max} = \frac{\pi}{3} Idk = 1,045 Idk.$$

В переходный период максимальное значение тока КЗ значительно превосходит установившееся значение за счет присутствия в анодных токах свободных составляющих:

$$Idk_{\max} = k_t Idk,$$

где k_t – коэффициент, определяемый из графика рис. 15.2.

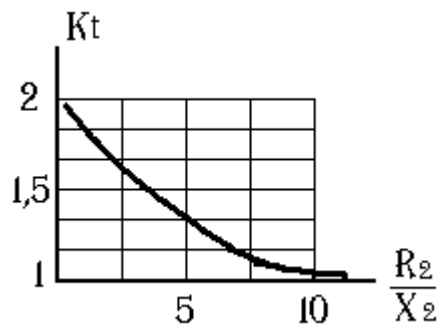


Рис. 15.2. Зависимость k_t от соотношения R_2 и X_2

Пример 15.1

Рассчитать ток КЗ на стороне выпрямленного тока полупроводниковых преобразовательных агрегатов с $U_d = 515$ В.

Номинальный выпрямленный ток $I_d = 2000$ А; номинальная мощность трансформатора выпрямительного агрегата по данным завода-изготовителя $S_{HT} = 1210$ кВ·А; напряжение КЗ трансформатора $U_k = 6,6$ %; мощность потерь КЗ $P_k = 20$ кВт; напряжение питающей сети 6 кВ и мощность КЗ питающей системы $S_{kc} = 157$ МВ·А, схема соединения вторичных обмоток трансформатора – с уравнительным реактором. Сопротивление выражено в Ом.

Расчет токов КЗ:

1. Фазное напряжение вторичной обмотки трансформатора (табл. 15.1)

$$U_{2\phi} = \frac{U_d}{1,17} = \frac{515}{1,17} = 440 \text{ В.}$$

2. Базисное напряжение $U_b = U_{2\phi} = 440$ В.

3. Индуктивное сопротивление питающей системы, приведенное к U_b :

$$x_{bc} = \frac{(\sqrt{3} \cdot U_b)^2}{S_{kc}} = \frac{(\sqrt{3} \cdot 0,44)^2}{157} = 0,0037 \text{ Ом.}$$

4. Индуктивное сопротивление одного трансформатора, приведенное к U_b :

$$x_{bT1} = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{(\sqrt{3} U_b)^2}{S_{HT}} = \frac{6,6 \cdot (\sqrt{3} \cdot 0,44)^2}{100 \cdot 1,21} = 0,032 \text{ Ом.}$$

5. Индуктивное сопротивление четырех трансформаторов, работающих параллельно:

$$x_{bT4} = \frac{x_{bT1}}{4} = 0,008 \text{ Ом.}$$

6. Активное сопротивление трансформатора (P_k , кВт; S_{HT} , кВ·А):

$$R_{bT} = \frac{P_k}{S_{HT}} \cdot \frac{U_b^2}{S_{HT}} = \frac{20}{1210} \cdot \frac{440^2}{1210 \cdot 1000} = 0,0264 \text{ Ом.}$$

7. Активное сопротивление ошиновки, аппаратуры, переходных и разъёмных контактов и переходного сопротивления в месте КЗ:

$$R_n = 0,015 \text{ Ом.}$$

8. Суммарное индуктивное сопротивление до точки К:

$$x_c = x_{\delta c} + x_{\delta T4} = 0,0037 + 0,008 = 0,0117 \text{ Ом.}$$

9. Суммарное активное сопротивление:

$$R_c = \frac{R_{\delta T}}{4} + R_n = \frac{0,0264}{4} + 0,015 = 0,0066 + 0,015 = 0,0216 \text{ Ом.}$$

10. Ток КЗ в точке К:

$$Idk = 2,7 \frac{U_{2\delta}}{\sqrt{R_n^2 + x_c^2}} = 2,7 \frac{440}{\sqrt{0,0216^2 + 0,0117^2}} = 2,7 \frac{440}{0,0245} = 48,9 \text{ êÀ.}$$

Домашнее задание № 11

Рассчитать ток КЗ на стороне выпрямленного тока, определить ток при этом на первичной и вторичной сторонах трансформатора, если номинальный выпрямленный ток равен I_d ; номинальная мощность трансформатора T равна $S_{нТ}$; напряжения короткого замыкания равно U_k ; мощность потерь КЗ равна P_k ; напряжение питающей сети равно U_c ; мощность питающей системы равна $S_{кС}$ (табл. 15.2).

Таблица 15.2

№ вар.	I_d , А	U_d , В	$S_{нТ}$, кВА	U_k , %	P_k , кВт	U_c , кВ	$S_{кС}$, МВА	Схема выпрямления
1	1000	440	1216	5,5	12	10	500	Мостовая
2	1500	440	1400	6,0	22	10	1000	Мостовая
3	2000	600	2400	6,7	40	10	600	С уравнил. реактором
4	1600	900	3200	6,6	40	10	750	Мостовая
5	1600	600	3200	6,6	40	10	500	С уравнил. реактором
6	2000	3300	4600	6,6	150	10	800	Мостовая
7	1000	3300	5000	6,6	100	35	900	С уравнил. реактором
8	2000	3300	8600	6,0	120	35	800	Мостовая
9	1000	900	2200	5,5	80	10	560	Мостовая
0	1000	900	2500	5,0	60	10	750	С уравнил. реактором

16. РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ 6...35 КВ

16.1. Общие указания

Под распределительными сетями (РС) понимают воздушные и кабельные сети на промышленных предприятиях, городах и сельской местности напряжением 0,4...35 кВ, по которым электроэнергия передается потребителям от питающих центров – электростанций и главных понижающих подстанций (ГПП). Таким образом, в РС входят линии 6 – 35 кВ от шин ГПП, трансформаторы, воздушные и кабельные линии низкого напряжения 0,4 кВ.

Основной особенностью РС является значительное преобладание сопротивлений линий и трансформаторов над сопротивлениями линий и трансформаторов питающей их энергосистемы, что позволяет путем преобразования все генераторы и сети энергосистемы привести к простейшей схеме замещения, в которой все генераторы заменяются одним эквивалентным генератором с электродвижущей силой E_c , а сопротивления всех линий, трансформаторов и генераторов до шин ГПП заменяются сопротивлением ЭЭС Z_c . Сопротивления линий и трансформаторов РС от шин питающей подстанции до места КЗ суммируются и заменяются одним сопротивлением Z_{pc} . Даже для мощных энергосистем суммарное сопротивление $Z_k = Z_c + Z_{pc}$ оказывается очень велико, а ток КЗ мал. В результате КЗ сопровождается понижением напряжения генераторов и работой их регуляторов возбуждения, что позволяет ток трехфазного КЗ определить по закону Ома как для источника с неизменной фазой ЭДС E_c :

$$I_k^{(3)} = \frac{E_c}{Z_c + Z_{pc}}, \quad (16.1)$$

где величины Z_c и Z_{pc} определены для одной фазы, Ом.

Такая схема позволяет не учитывать переходные процессы в генераторах, что значительно упрощает все расчеты. В практических расчетах фазная ЭДС генераторов E_c пересчитывается и заменяется линейным напряжением холостого хода U_x вторичной обмотки трансформатора, питающего распределительную сеть. Уравнение (1) приводится к расчетному виду:

$$I_k^{(3)} = \frac{U_x}{\sqrt{3} \cdot (Z_c + Z_{pc})}. \quad (16.2)$$

Величина Z_c определяется довольно сложными расчетами. В результате для всех подстанций и электростанций энергосистемы определяется ток КЗ на шинах, питающих распределительную сеть $I_{uu}^{(3)}$, а по нему определяется Z_c для расчетов токов КЗ в самой РС.

$$I_{\kappa}^{(3)} = \frac{U_x}{\sqrt{3} \cdot I_{uu}^{(3)}}. \quad (16.3)$$

Иногда вместо тока трехфазного КЗ задается мощность КЗ $S_{\kappa}^{(3)}$, равная $S_{\kappa}^{(3)} = \sqrt{3} \cdot U_x \cdot I_{uu}^{(3)}$. Сопротивление системы в этом случае определяется:

$$Z_c = \frac{U_{\kappa}^2}{S_{\kappa}^{(3)}}. \quad (16.4)$$

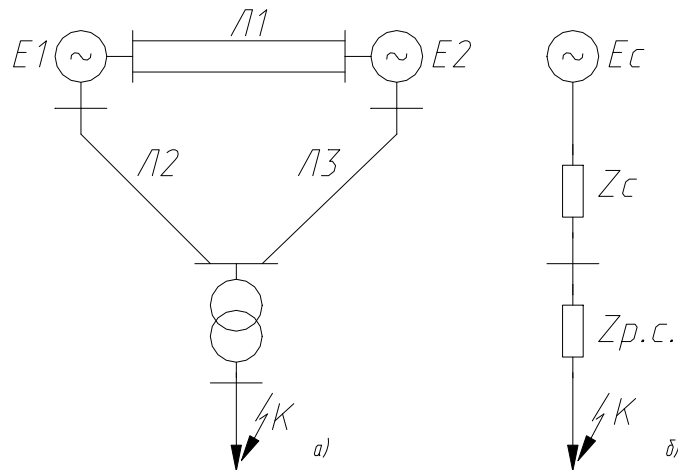


Рис. 16.1. Схема для расчетов токов КЗ в РС: а) – расчетная; б) – схема замещения

Таким образом, исходными данными для расчетов токов КЗ в РС являются величины U_x ; Z_c . Величина Z_{pc} определяется для каждого случая по данным рассчитываемой сети: длине, сечению и расположению проводов линий; паспортным данным трансформаторов; длине, сечению и конструкции кабелей и т. д.

Упрощением для расчетов в РС является возможность не вычислять особо ток двухфазного КЗ, а определять его по току трехфазного КЗ:

– при трехфазном КЗ ток определяется фазным напряжением U_{ϕ} и сопротивлением Z_{κ} одной фазы $I^{(3)} = \frac{U_{\phi}}{Z_{\kappa}}$;

– при двухфазном КЗ поврежденная цепь питается линейным напряжением $U_{л}$, а полное сопротивление цепи состоит из последовательно включенных сопротивлений Z_{κ} двух фаз:

$$I_{\text{к}}^{(2)} = \frac{U_{\text{л}}}{2 \cdot Z_{\text{к}}} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ф}}}{2 \cdot Z_{\text{к}}} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\text{к}}^{(3)} = 0,866 \cdot I_{\text{к}}^{(3)}. \quad (16.5)$$

В ряде случаев сопротивление $Z_{\text{с}}$ по сравнению с $Z_{\text{рс}}$ настолько мало, что им можно пренебречь и принять $Z_{\text{с}}=0$. Такой случай считается питанием от системы бесконечной мощности, и ток трехфазного КЗ определяется по выражению (16.2), в котором $Z_{\text{с}}=0$.

$$I_{\text{к}}^{(3)} = \frac{U_{\text{x}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\text{рс}}}. \quad (16.6)$$

При практических расчетах важно определить, можно ли энергосистему, питающую РС, считать системой бесконечной мощности и вместо уравнения (2) пользоваться уравнением (16.5). Для ориентировочной оценки энергосистему можно считать системой бесконечной мощности, если выполняются условия:

$$\frac{S_{\text{с}}}{U_{\text{x}}^2} \leq \frac{3}{Z_{\text{с}}}; \quad (16.7)$$

$$\frac{S_{\text{с}}}{S_{\text{к}}^{(3)}} \leq 3, \quad (16.8)$$

где $S_{\text{с}}$ – суммарная мощность всех генераторов энергосистемы, МВ·А; $S_{\text{к}}^{(3)}$ – мощность трехфазного КЗ на шинах подстанции, питающей РС, МВ·А; U_{x} – вторичное линейное напряжение трансформаторов, питающих РС, МВ·А; $Z_{\text{с}}$ – сопротивление системы приведенное к шинам питающей подстанции, Ом.

Особенность при расчете КЗ в РС – необходимость учета активных сопротивлений. В современных сетях напряжение 110 кВ и выше активные сопротивления настолько малы по сравнению с индуктивными, что ими обычно пренебрегают и считают полное сопротивление чисто индуктивным: $Z=X$. Такое допущение практически не сказывается на точности расчетов, но серьезно облегчает их. Считается, что активным сопротивлением можно пренебрегать, если $\frac{x}{r} \geq 3$. При этом определении ток КЗ без учета активного сопротивления дает ошибку не более 5 %.

В РС индуктивное сопротивление воздушных линий X составляет 0,3...0,4 Ом/км, активное сопротивление r для алюминиевых проводов сечением 16 мм² колеблется в пределах 2...0,5 Ом/км, отношение $\frac{x}{r}$ при этом значительно меньше 3 и колеблется в пределах 0,15...0,6.

Для кабелей индуктивное сопротивление составляет 0,08 Ом/км и отношение $\frac{x}{r}$ еще меньше. Поэтому одним из основных требований является обязательный учет активных сопротивлений сети. В этом случае уравнение (16.2) приводится к виду:

$$I_{\kappa}^{(3)} = \frac{U_x}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(x_c + x_{pc})^2 + r_{pc}^2}}. \quad (16.9)$$

Результаты расчетов по выражениям (16.2) и (16.8) могут дать значительные различия, что вынуждает учитывать активные сопротивления не только кабелей, но и трансформаторов РС.

16.2. Приведение к расчетному напряжению

При наличии в РС трансформаторных связей необходимо привести все сопротивления, находящиеся на разных сторонах трансформатора, к одному напряжению – расчетному. За расчетное напряжение обычно принимается напряжение точки КЗ:

$$Z_1 = Z \cdot \left(\frac{U_5}{U_6} \cdot \frac{U_3}{U_4} \cdot \frac{U_1}{U_2} \right)^2. \quad (16.10)$$

Существует два способа приведения: приближенное и точное. При приближенном способе пользуются средними номинальными напряжениями каждой ступени: 0,23; 0,4; 0,525; 6,3; 10,5; 13,8; 15,75; 20; 37 кВ. При этом считается, что действительные номинальные напряжения равны средним. При использовании средних номинальных напряжений вычисления упрощаются. Так в уравнении (6.10) $U_3=U_2$; $U_5=U_4$, то

$$Z_1 = Z \cdot \left(\frac{U_1}{U_6} \right)^2. \quad (16.11)$$

При расчетах действительных сетей этот способ не допустим, т. к. может вызвать значительные ошибки из-за того, что действительные напряжения могут значительно отличаться от средних номинальных. По этим причинам необходимо пользоваться при расчете токов КЗ в РС точным приведением с учетом реальных коэффициентов трансформации.

16.3. Расчетные условия

В РС напряжением 6...35 кВ, работающих с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов, возможны трехфазные, двухфазные КЗ, а также однофазные замыкания на землю. Расчетным для таких се-

тей является трехфазное КЗ, а ток двухфазного КЗ определяется по току трехфазного КЗ (16.5).

Сети напряжением ниже 1000 В выполняются с изолированной нейтралью 690/400 В или четырехпроводными с заземленной нейтралью 400/230 В. В таких сетях выполняют расчет токов трехфазного и однофазного КЗ. Все расчеты токов выполняются обычно для КЗ в относительных или именованных единицах. Для РС обычно определяют активные и индуктивные сопротивления линий и трансформаторов и других элементов системы электроснабжения.

16.4. Особенности определения сопротивлений

а) линии.

Для воздушных и кабельных линий из цветных металлов активное сопротивление определяют по справочным данным. Пользоваться выражением $r = \rho \cdot \frac{L}{S}$ не рекомендуется, т. к. действительные сечения проводов отличаются от номинального сечения. Индуктивное сопротивление ВЛ рассчитывается, а при неизвестных конструктивных данных пользуются некоторыми средними значениями сопротивлений:

для линий 0,4 – 10 кВ $X_0 = 0,3$ Ом/км;

для линий 35 кВ $X_0 = 0,4$ Ом/км;

б) реакторы.

В технической информации реакторов указываются их номинальное линейное напряжение U_n (кВ), номинальный ток I_n (А), реактивность X_p (%).

Сопротивление реактора определяется:

$$X_p = \frac{X_p \cdot U_n}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot I_n}, \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление реакторов настолько мало, что не учитывается;

в) трансформаторы.

Полное сопротивление двухобмоточных трансформаторов определяется по выражению:

$$Z_T = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}}, \text{ Ом,}$$

где U_k – напряжение КЗ трансформатора, %; $U_{\text{НОМ}}$ – номинальное напряжение трансформатора, кВА; $S_{\text{НОМ}}$ – номинальная мощность трансформатора, кВА.

Активное сопротивление определяется по потерям КЗ:

$$R_T = \frac{P_k \cdot U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}^2}, \text{ Ом,}$$

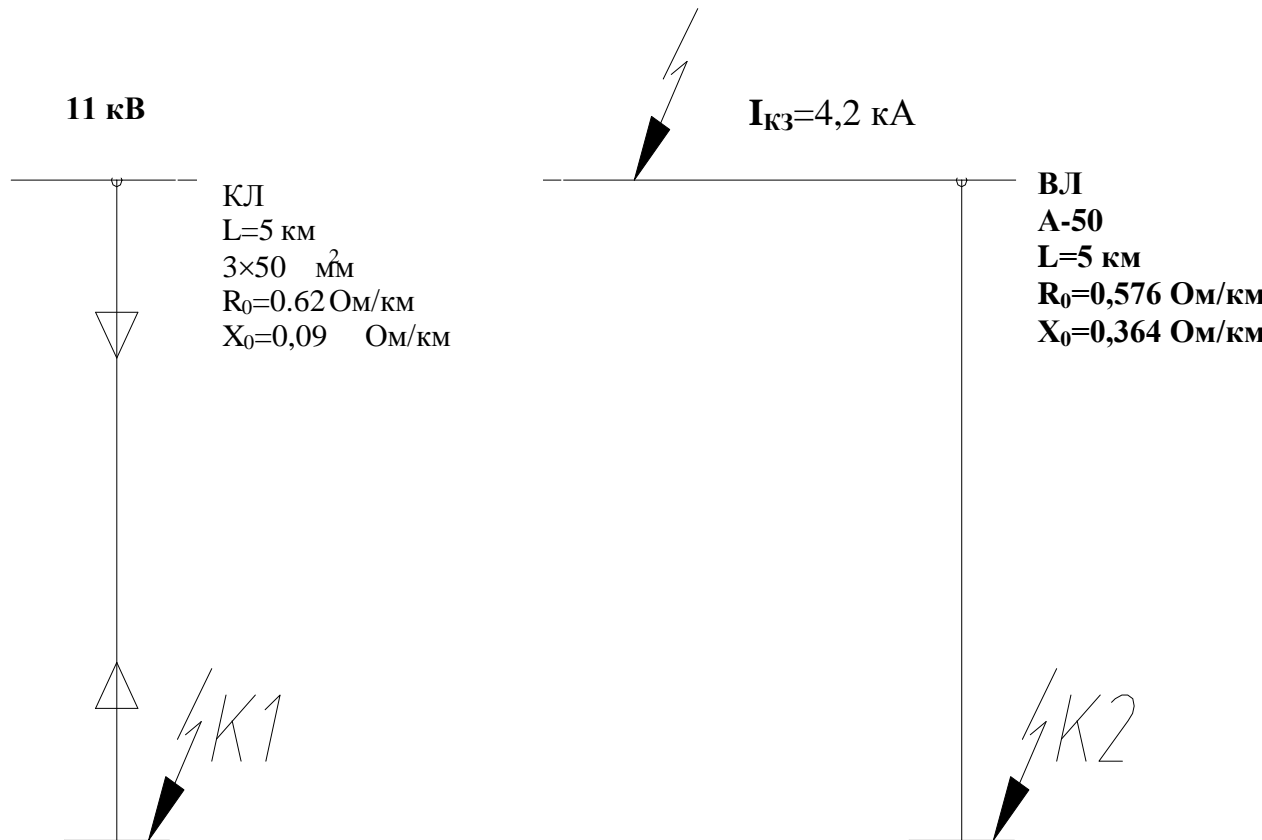
где P_k – потери КЗ, Вт.

Индуктивное сопротивление трансформатора определяется по выражению:

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \text{ Ом.}$$

Пример 16.1

Определить ток КЗ в точках К1 и К2.



1. Сопротивление системы, приведенное к шинам 11 кВ:

$$X_c = \frac{11}{\sqrt{3} \cdot 3} = 2,12 \text{ Ом.}$$

2. Сопротивление КЛ (приложение П6):

$$R_k = 0,62 \cdot 5 = 3,1 \text{ Ом,}$$

$$X_k = 0,09 \cdot 5 = 0,45 \text{ Ом.}$$

3. Ток КЗ в точке К1:

$$I_{к1} = \frac{11}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(2,12 + 0,45)^2 + 3,1^2}} = 0,158 \text{ кА.}$$

4. Сопротивление ВЛ, выполненной проводом А-50:

$$R_{ВЛ} = 0,364 \cdot 5 = 1,82 \text{ Ом,}$$

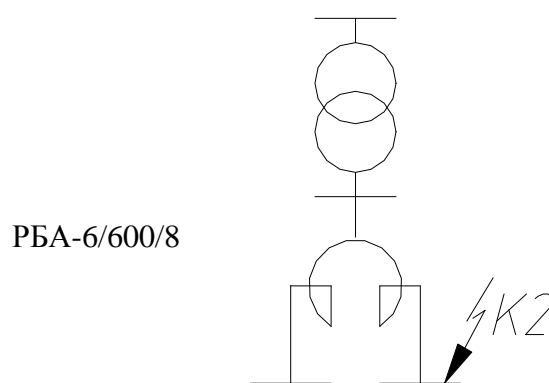
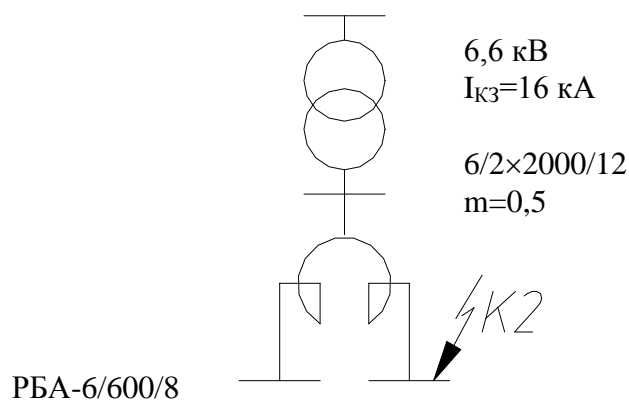
$$X_{ВЛ} = 0,576 \cdot 5 = 2,88 \text{ Ом.}$$

5. Ток КЗ в точке К2:

$$I_{к2} = \frac{11}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(2,12 + 1,82)^2 + 2,88^2}} = 0,131 \text{ кА.}$$

Пример 16.2

Определить ток КЗ за линейным реактором РБА и за групповым реактором.



1. Сопротивление линейного реактора:

$$X_p = \frac{10 \cdot U_p \cdot U}{\sqrt{3} \cdot I_p} = \frac{10 \cdot 6 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 600} = 0,448 \text{ Ом.}$$

2. Сопротивление системы до выводов 6,6 кВ питающего трансформатора:

$$X_c = \frac{6,6}{\sqrt{3} \cdot 16} = 0,238 \text{ Ом.}$$

3. Ток КЗ за линейным реактором (К1):

$$I_k^{(3)} = \frac{6,6}{\sqrt{3} \cdot (0,238 + 0,448)} = 5,64 \text{ кА.}$$

4. Сопротивление одной ветви группового реактора:

$$X_p = \frac{10 \cdot 12 \cdot 6}{2000} = 0,36 \text{ Ом.}$$

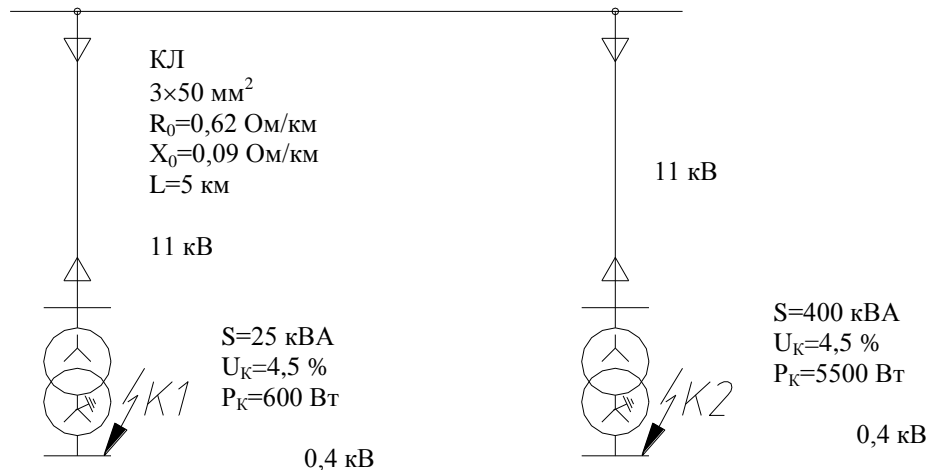
5. Ток КЗ за реактором:

$$I_k^{(3)} = \frac{6,6}{\sqrt{3} \cdot (0,36 + 0,238)} = 6,4 \text{ кА.}$$

Примечание. Хотя реакторы имеют номинальное напряжение 6,0 кВ, включены они на вторичное напряжение питающего трансформатора 6,6 кВ, приведение к одному расчетному напряжению производить не требуется.

Пример 16.3

Определить ток КЗ на выводах 0,4 кВ трансформаторов.



Активное сопротивление трансформаторов:

$$R_{25} = \frac{600 \cdot 10^2}{25^2} = 96 \text{ Ом,}$$

$$R_{400} = \frac{5500 \cdot 10^2}{400^2} = 3,44 \text{ Ом.}$$

1. Полные сопротивления трансформаторов:

$$Z_{25} = \frac{10 \cdot 4,5 \cdot 10^2}{25} = 180 \text{ Ом},$$

$$Z_{400} = \frac{10 \cdot 4,5 \cdot 10^2}{400} = 11,25 \text{ Ом}.$$

2. Индуктивные сопротивления трансформаторов:

$$X_{25} = \sqrt{180^2 - 96^2} = 152 \text{ Ом},$$

$$X_{400} = \sqrt{11,25^2 - 3,44^2} = 10,7 \text{ Ом}.$$

3. Пренебрегая сопротивлением сети, ток переходного КЗ на выводах 0,4 кВ равен:

$$I_{25} = \frac{11000}{\sqrt{3} \cdot 180} = 35,3 \text{ А},$$

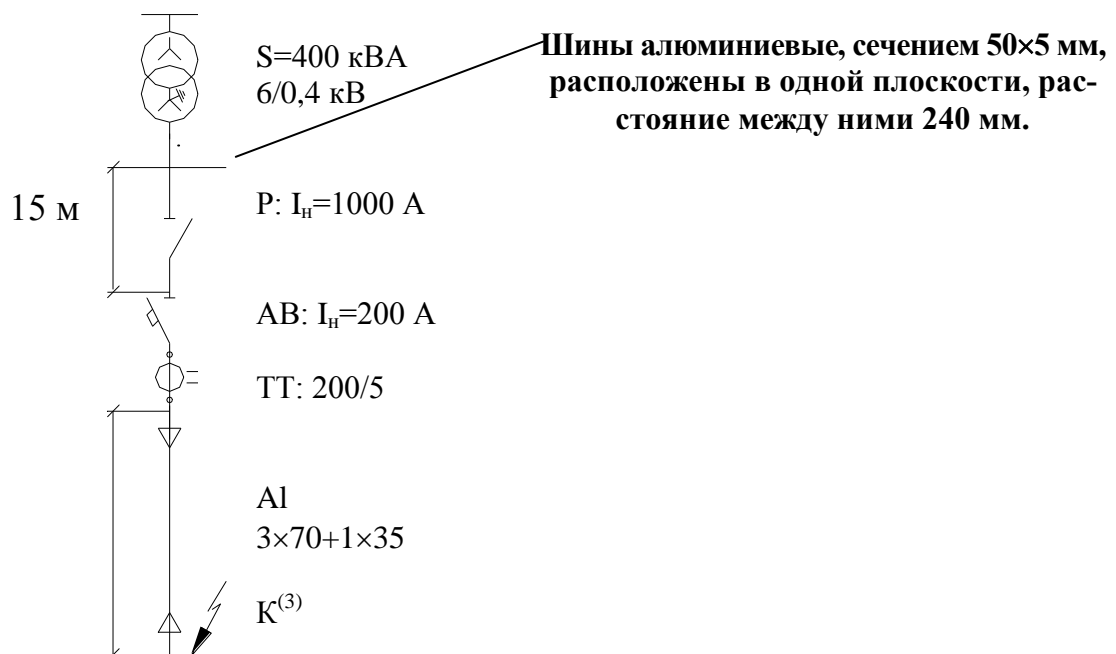
$$I_{400} = \frac{11000}{\sqrt{3} \cdot 11,25} = 565 \text{ А}.$$

4. С учетом активного и индуктивного сопротивлений кабельной электропередачи, ток КЗ будет:

$$I_{25}^{(3)} = \frac{11000}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(2,12 + 0,45 + 152)^2 + (3,1 + 96)^2}} = 34,8 \text{ А},$$

$$I_{400}^{(3)} = \frac{11000}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(2,12 + 0,45 + 10,7)^2 + (3,1 + 3,44)^2}} = 433 \text{ А}.$$

Пример 16.4



200 м

Определяем сопротивления шин:

$$R_{ш} = 0,142 \cdot 15 = 2,12 \text{ мОм},$$

$$X_{ш} = 0,2 \cdot 15 = 3 \text{ мОм}.$$

Активное сопротивление контактов рубильника:

$$R_p = 0,06 \text{ мОм}.$$

Активное сопротивление контактов автомата и обмоток расцепителей:

$$R_A = 0,36 + 0,6 = 0,96 \text{ мОм},$$

$$X_A = 0,28 \text{ мОм}.$$

Активное сопротивление обмотки одного трансформатора тока: 0,19 мОм.

Активное сопротивление обмоток трансформатора, отнесенное к 0,4 кВ: 5,55 мОм, индуктивное: 17,1 мОм.

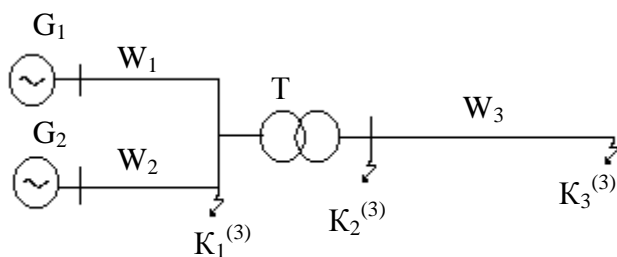
Активное сопротивление фазы кабеля 3×70+1×35: $0,433 \cdot 0,2 = 0,0886$ Ом, индуктивное: $0,08 \cdot 0,2 = 0,016$ Ом = 16 мОм.

Ток КЗ в конце кабельной линии:

$$I_k^{(3)} = \frac{400 \cdot 1000}{\sqrt{3} \sqrt{(5,5 + 2,12 + 0,08 + 0,96 + 0,19 + 88,6)^2 (17,1 + 3 + 0,28 + 0,17 + 16)^2}} = 2220 \text{ А}.$$

Пример 16.5

Определить токи трехфазного КЗ в точках К₁, К₂ и К₃.



x₆ x₁ r₁

x₅ x₃ r₃ x₄

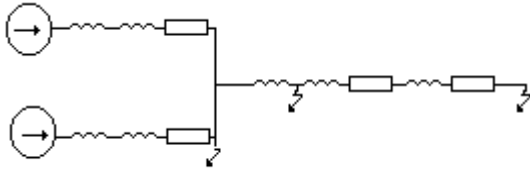
148

x₇ x₂ r₂

K₂⁽³⁾

K₃⁽³⁾

K₁⁽³⁾



Исходные данные:

Линия W1 воздушная длиной $L=50$ км, $x_0=0,4$ Ом/км, $r_0=0,34$ Ом/км.

Линия W2 воздушная $L=30$ км, $x_0=0,4$ Ом/км, $r_0=0,36$ Ом/км.

Линия W3 воздушная, состоит из двух участков, выполненных проводом AC-50 ($L=2$ км, $x_0=0,4$ Ом/км, $r_0=0,64$ Ом/км) и AC-35 ($L=8$ км, $x_0=0,4$ Ом/км, $r_0=0,92$ Ом/км).

Трансформатор $S_H=6,8$ мВА, 110/11 кВ, $U_K=10,5$ %.

Система G_1 неограниченной мощности с неизменным напряжением на шинах 115 кВ, $S_c=800$ мВА.

Система G_2 неограниченной мощности. Ток КЗ на шинах системы $I_K^{(3)}=8,5$ кА.

Схема замещения приведена на рис. 10 б. Решение проведем в относительных базисных единицах при $S_{\bar{0}}=100$ мВА, $U_{\bar{01}}=115$ кВ, $I_{\bar{01}}=0,5$ кА и $U_{\bar{02}}=10,5$ кВ, $I_{\bar{02}}=5,5$ кА.

Сопротивления элементов схемы (индекс * (б) не указывается):

$$W1; x_1 = x_0 L \frac{S_{\bar{0}}}{U_{\bar{01}}^2} = 0,4 * 50 * \frac{100}{115^2} = 0,15,$$

$$r_1 = r_0 L \frac{S_{\bar{0}}}{U_{\bar{01}}^2} = 0,4 * 50 * \frac{100}{115^2} = 0,13.$$

$$W2; x_2 = x_0 L \frac{S_{\bar{0}}}{U_{\bar{01}}^2} = 0,4 * 30 * \frac{100}{115^2} = 0,09,$$

$$r_2 = r_0 L \frac{S_{\bar{0}}}{U_{\bar{01}}^2} = 0,46 * 30 * \frac{100}{115^2} = 0,1.$$

$$W3; x_{31} = x_0 L \frac{S_{\bar{0}}}{U_{\bar{01}}^2} = 0,4 * 2 * \frac{100}{115^2} = 0,726, r_3=1,16,$$

$$x_4 = x_0 L \frac{S_{\bar{a}}}{U_{\bar{a}2}^2} = 0,4 * 8 * \frac{100}{10,5^2} = 2,9; r_4=6,68,$$

$$r; x_5 = \frac{U_K}{100} * \frac{S_{\bar{0}}}{S_H} = \frac{10,5}{100} * \frac{100}{6,3} = 1,67,$$

$$C_1; x_5 = \frac{S_{\bar{c}}}{S_c} = \frac{100}{800} = 0,125,$$

$$C_2; x_7 = \frac{I_{\bar{c}1}}{I_{\kappa}^{(3)'''}} = \frac{0,5}{3,5} = 0,142.$$

Расчет тока КЗ в точке К₁.

Результирующие сопротивления систем до точки К₁:

$$Z_1 = \sqrt{r_1 + (x_1 + x_6)^2} = \sqrt{0,13^2 + 0,275^2} = 0,305,$$

$$Z_2 = \sqrt{r_2 + (x_{21} + x_7)^2} = \sqrt{0,1104^2 + 0,232^2} = 0,254,$$

$$Z = \frac{Z_1 * Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{0,305 * 0,253}{0,558} = 0,139.$$

Ток КЗ

$$I_{\hat{e}1}^{(c)} = \frac{I_{\hat{a}1}}{Z_{\Sigma 1}} = \frac{0,5}{0,139} = 3,60 \text{ кА.}$$

Ударный коэффициент найдем из кривой (рис. 3 б) по отношению x_{Σ}/r_{Σ} :

$$r_{\Sigma} = \frac{r_1 * r_2}{r_2 + r_2} = \frac{0,129 * 0,104}{0,233} = 0,058,$$

$$x_{\Sigma 1} = \frac{(x_1 + x_6) * (x_2 + x_7)}{x_1 + x_2 + x_6 + x_7} = 0,126,$$

$$\frac{x_{\Sigma 1}}{r_{\Sigma 1}} = \frac{0,126}{0,058} = 2,17, \text{ что соответствует } K_{y1} = 1,22.$$

Тогда ударный ток

$$i_{y\kappa 1} = \sqrt{2} * K_{y1} * I_{\kappa 1}^{(3)''} = 1,41 * 1,22 * 3,6 = 6,2 \text{ кА.}$$

Расчет тока КЗ в точке К₂.

Результирующее сопротивление до точки К₂:

$$Z_{\Sigma 2} = Z_{\Sigma 1} + x_5 = 0,139 + 1,67 = 1,81.$$

Ток КЗ:

$$I_{\hat{e}2}^{(c)} = \frac{I_{\hat{a}2}}{Z_{\Sigma 2}} = \frac{5,5}{1,81} = 3,04 \text{ кА.}$$

Ударный коэффициент:

$$K_{y2} = 1,9 \text{ при } \frac{x_{\Sigma 2}}{r_{\Sigma 2}} = \frac{x_{\Sigma 1} + x_5}{r_{\Sigma 2}} = \frac{1,8}{0,058} = 31.$$

Ударный ток

$$i_{\sigma \ell 2} = \sqrt{2} * \hat{E}_{\sigma 2} * I_{\ell 2}'' = 1,41 * 1,9 * 3,04 = 8,17 \text{ кА.}$$

Расчет тока КЗ в точке К₃.

Результирующее сопротивление до точки К₃:

$$\begin{aligned} Z_{\Sigma 3} &= Z_{\Sigma 2} + Z_{\bar{E}3} = Z_{\Sigma 2} + \sqrt{(r_3 + r_4)^2 + (x_3 + x_4)^2} = \\ &= 1,81 + 7,84 + 3,626 = 10,445. \end{aligned}$$

Ток КЗ:

$$I_{\ell 3}^{(\varphi)} = \frac{I_{\bar{a}2}}{Z_{\Sigma 3}} = \frac{5,5}{10,45} = 0,526 \text{ кА.}$$

Ударный коэффициент: $K_{y2} = 1$ при $\frac{x_{\Sigma}}{r_{\Sigma}} = 0,7$.

Ударный ток

$$i_{\sigma \ell 3} = \sqrt{2} * \hat{E}_{\sigma 3} * I_{\ell 3}'' = 1,41 * 0,526 = 0,74 \text{ кА.}$$

17. РАСЧЕТ ТОКОВ КЗ В СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ 0,4 кВ

Расчет токов трехфазного и двухфазного КЗ в сетях 0,4 кВ выполняется по методике, изложенной в теме 16. При этом необходимо учитывать не только активные и индуктивные сопротивления всех элементов цепи, но и активные сопротивления всех переходных контактов в этой цепи (на шинах, вводах и выводах аппаратов, разъемные контакты аппаратов, сопротивление дуги в месте КЗ, а также сопротивления катушек расцепителей автоматов и первичных обмоток трансформаторов тока).

Для расчетов рекомендуется пользоваться приложениями П8 и П9, в которых приведены сопротивления элементов аппаратов по данным заводов-изготовителей.

Испытания показали, что реально имеющие место величины токов при КЗ значительно меньше расчетных величин токов, найденных без учета сопротивлений контактных соединений (на 60 ... 80 %).

При определении сопротивления необходимо учитывать сопротивление дуги в месте КЗ, значения которого принимается 10 МОм.

При отсутствии достоверных данных о контактах и их переходных сопротивлениях рекомендуется при расчете токов КЗ в сетях, питаемых трансформаторами мощностью до 1600 кВ·А включительно, учитывать их суммарное сопротивление введением в расчет активного сопротивления:

1. Для распределительных устройств на станциях и подстанциях – 15 мОм.
2. Для первичных цеховых распределительных пунктов, как и на зажимах аппаратов, питаемых радиальными линиями от щитов подстанций или от главных магистралей – 2 мОм.
3. Для вторичных цеховых распределительных пунктов, как и на зажимах аппаратов, питаемых от первичных распределительных – 25 мОм.
4. Для аппаратуры, установленной непосредственно у электроприемников, получающих питание от вторичных распределительных пунктов – 3 мОм.

Однако как показывают результаты расчетов для конкретных примеров, вышеприведенные значения переходных сопротивлений контактов являются завышенными, особенно для сетей, питающихся от трансформаторов мощностью выше 1000 кВ·А.

Значительное электрическое удаление систем электроснабжения от питающих центров позволяет считать, что при КЗ за понижающим трансформатором напряжение в точке сети, где он присоединен, практически остается неизменным и равным своему номинальному значению.

Сопротивления трансформаторов, кабелей, шинопроводов аппаратов берутся из справочников или по приложениям.

Расчет ведут в именованных единицах, принимая в качестве средних номинальных напряжений: 690 В, 400 В, 230 В.

Для проверки аппаратов и проводников по условиям КЗ производят расчет $K^{(3)}$, т. к. ток при этом часто достигает наибольшей величины. При расчете тока однофазного КЗ необходимо определить полное сопротивление цепи фаза-нуль по найденным результирующим сопротивлениям прямой и нулевой последовательностей. Начальное значение периодической составляющей:

$$\text{Ток трехфазного КЗ: } I(3)_{\kappa} = U_{\text{ср}} / \sqrt{3} \sqrt{(R^2 + X^2)}.$$

$$\text{Ток однофазного КЗ: } I(1)_{\kappa} = \sqrt{3} U_{\text{ср}} / \sqrt{((2R_1 + R_0)^2 + (2X_1 + X_0)^2)}.$$

Пример 17.1

Определить ток трехфазного КЗ для схемы на рис. 17.1. Питающий трансформатор 400 кВ·А, 6/0,4 кВ, У/Ун, соединен со сборкой 400 В алюминиевыми шинами сечением 50х5 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 ТКФ-3 200/5. Кабельная линия W1 длиной 200 м выполнена алюминиевым кабелем сечением 3х70+1х35. Воздушная линия W2 длиной 200 м выполнена алюминиевыми проводами сечением 3х70+1х35 и соединена со сборкой 0,4 кВ алюминиевым кабелем длиной 20 м, сечением 3х70+1х25 мм² в алюминиевой оболочке.

Решение

Среднее геометрическое расстояние между шинами $1,26 \cdot 240 = 300$ мм. По приложению П6 активное сопротивление шин $R = 0,142 \cdot 15 = 2,12$ мОм; индуктивное – $X = 0,2 \cdot 15 = 3$ мОм.

Активное сопротивление контактов рубильника по П8 0,08 мОм.

Активное сопротивление контактов и обмоток расцепителей автоматических выключателей по П8 $0,36 + 0,6 = 0,96$ мОм; индуктивное 0,28 мОм. Активное сопротивление обмотки одного трансформатора тока (ТКФ-3) по П9 0,19 мОм; индуктивное 0,17 мОм. Активное сопротивление обмоток трансформатора 400 кВ·А, отнесенное к 0,4 кВ по П10, 5,55 мОм; индуктивное 17,1 мОм. Активное сопротивление фазы кабеля 3х70+1х25 по П4 $44,3 \cdot 2 = 88,6$ мОм; индуктивное по П4 $8 \cdot 2 = 16$ мОм.

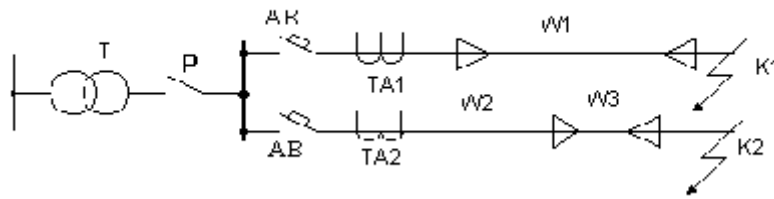


Рис. 20. Схема к примеру 17.1

Для воздушной линии: активное сопротивление по П2 $0,412 \times 0,2 = 0,824$ мОм; индуктивное при $D_{ср} \approx 800$ мм $0,33 \cdot 0,2 = 64$ мОм. Сопротивления кабеля длиной 20 м равны: активное 8,86 мОм и индуктивное 1,6 мОм.

Ток трехфазного КЗ в конце воздушной линии

$$I_K^3 = \frac{400 \cdot 1000}{\sqrt{3} \sqrt{(5,5 + 2,12 + 0,08 + 0,96 + 0,19 + 82,4 + 8,86)^2 + (17,1 + 3 + 0,23 + 0,17 + 64 + 1,6)^2}} = 1690 \text{ A.}$$

Если пренебречь сопротивлениями шин и аппаратуры, то ток КЗ будет равен:

$$I_K^3 = \frac{400 \cdot 1000}{\sqrt{3} \sqrt{(5,5 + 82,4 + 8,86)^2 + (17,1 + 64 + 1,6)^2}} = 1740 \text{ A.}$$

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.

Если пренебречь и сопротивлением трансформатора, то ток КЗ будет равен:

$$I_K^3 = \frac{400 \cdot 1000}{\sqrt{3} \sqrt{(82,4 + 8,86)^2 + (64 + 1,6)^2}} = 1920 \text{ A (ошибка около 13 \%)}.$$

Для трансформаторов меньшей мощности ошибка будет еще больше. Так, если вместо трансформатора 400 кВ·А взять трансформатор 40 кВ·А, у которого активное сопротивление составляет 88 мОм, то действительный ток будет равен:

$$I_K^3 = \frac{400 \cdot 1000}{\sqrt{3} \sqrt{(88 + 2,12 + 0,08 + 0,96 + 0,19 + 82,4 + 8,86)^2 + (157 + 3 + 0,23 + 0,17 + 64 + 1,6)^2}} = 785 \text{ A.}$$

Если в этом случае пренебречь сопротивлением трансформатора, то ошибка будет 250 %.

Ток КЗ в конце кабельной линии будет равен:

$$I_K^3 = \frac{400 \cdot 1000}{\sqrt{3} \sqrt{(88 + 2,12 + 0,08 + 0,96 + 0,19 + 8,86)^2 + (17,1 + 3 + 0,23 + 0,17 + 1,6)^2}} = 2220 \text{ А.}$$

Если пренебречь сопротивлениями трансформатора и аппаратуры, то ток КЗ будет равен:

$$I_K^3 = \frac{400 \cdot 1000}{\sqrt{3} \sqrt{88,2^2 + 16^2}} = 1920 \text{ А (ошибка около 17 \%)}.$$

Сопротивлениями линий высшего напряжения и энергосистемы, питающих трансформаторы 6-35/0,4 кВ, можно пренебрегать не всегда.

Так, если в данном примере трансформатор питается по линии 6 кВ длиной 10 км, выполненной проводом А-35 на опорах при $D_{ср} = 1150$ мм, то ее сопротивления будут: 8,3 Ом активное и 3,77 Ом индуктивное. Эти сопротивления, приведенные к напряжению 0,4 кВ, будут равны:

$$\frac{8,3 \cdot 0,4^2}{6^2} = 0,037 \text{ Ом и } \frac{3,77 \cdot 0,4^2}{6^2} = 0,0168 \text{ Ом.}$$

Ток КЗ составит:

$$I_K^3 = \frac{400 \cdot 1000}{\sqrt{3} \sqrt{(5,75 + 2,12 + 0,08 + 0,96 + 0,19 + 82,4 + 8,86 + 37)^2 + (17,2 + 3 + 0,28 + 0,17 + 64 + 1,6 + 16,8)^2}} = 1330 \text{ А.}$$

Если сопротивлением питающей линии 6 кВ пренебречь, то ошибка составит 13 %.

Для оценки возможности упрощения расчетов можно руководствоваться требованиями ПУЭ по чувствительности релейных защит. Для предохранителей и автоматических выключателей с зависимой характеристикой чувствительность должна быть не менее 3: при этом ошибку в вычислении токов порядка 10-15 % можно допустить.

Для автоматических выключателей с мгновенным расцепителем ПУЭ требуют чувствительность не менее 1,1, вследствие чего для расчетов таких защит ошибка в 10-15 % уже недопустима, так как может вызвать отказ автоматического выключателя.

Обычно можно не учитывать сопротивления шин и аппаратуры, недопустимо пренебрегать сопротивлением трансформаторов, а возможность не учитывать сопротивления питающей линии устанавливается сравнением их с сопротивлениями трансформаторов и линий 0,4 кВ.

Для расчета токов однофазного КЗ ПУЭ рекомендуется следующее выражение:

$$I_{k1} = U_{\phi} / ((Z_{T1} / 3) + Z_{\Sigma}). \quad (17.1)$$

Здесь допускается арифметическое сложение полных сопротивлений, что дает преуменьшение значения тока КЗ. Величина Z_{T1} – полное сопротивление трансформатора при однофазном КЗ – очень сильно зависит от схемы соединений его обмоток. При схемах соединений Δ/Y_n и Y/Z_n величина $Z_{T1} / 3$ равна сопротивлению трансформатора при трехфазном или двухфазном КЗ и определяется по выражению: $Z_{T1} = 10 U_k U^2 / S$.

В этом случае выражение (17.1) превращается в $I_{k1} = U_{\phi} / (Z_T + Z_{\Sigma})$ и при питании от системы бесконечной мощности ток однофазного КЗ на выводах трансформатора равен току трехфазного КЗ $I_{k1} = I_{k3}$.

При соединении Y/Y_n Z_{T1} не равно $3 Z_T$; величина Z_{T1} в ГОСТ не нормирована и в информациях заводов-изготовителей не указывается. Эта величина в большинстве случаев определена опытным путем и приведена в приложениях П10.

Полное сопротивление петли КЗ Z_{Σ} состоит из сопротивлений фазного и линейного проводов. Рекомендуется принимать $X = 0,6$ Ом/км для воздушных линий всех конструкций, R – по приложениям П1-П3. Для других конструкций линий 0,4 кВ: трех- и четырехжильных кабелей, проводок проводом в трубах, на изоляторах и прочих ПУЭ рекомендаций не дают. Поэтому для облегчения расчетов в приложениях П2-П5 даны расчетные значения полных сопротивлений для разных конструкций линий 0,4 кВ. Для воздушных линий 0,4 кВ, выполненных на крюках и траверсах, транспозиция проводов не применяется, расстояния между фазными и нулевым проводом разные.

Поэтому и индуктивные сопротивления разных фаз различны. В приложениях приведены величины для случая при наибольшем расстоянии между фазными и нулевым проводами (рис. 17.1). Это расстояние определяется по чертежам опор. Для линий на крюках это расстояние обычно колеблется в пределах 500-1000 мм, для линий на траверсах в пределах 1250-1650 мм. Активные сопротивления проводов в приложениях приняты при максимально допустимой по ПУЭ температуре: 80 °С для кабелей с бумажной изоляцией; 70 °С для неизолированных проводов воздушных линий; 65 °С для кабелей и проводов с резиновой и пластмассовой изоляцией; 80 °С для алюминиевой оболочки трехжильных кабелей, используемой в качестве нулевого провода. Нагрев проводов от тока КЗ не учитывался. Удельные сопротивления при 20 °С приняты: 31,4 Ом мм²/км для алюминия и 18,4 Ом мм²/км для меди.

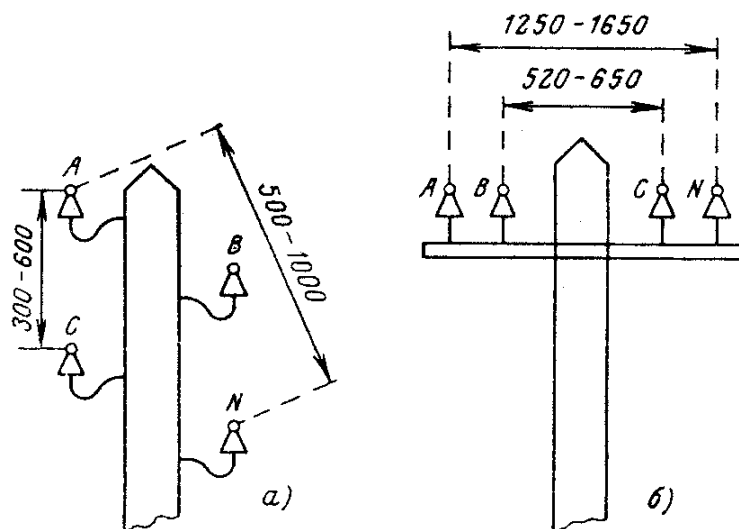


Рис. 17.1. Конструкции линий 0,4 кВ: а) – на крюках; б) – на траверсах

При всех расчетах следует учитывать требование ПУЭ – проводимость (при одинаковых материалах – сечение) нулевого провода должна быть не менее 50 % проводимости (сечения) фазного провода.

Для трехжильных кабелей с резиновой или пластмассовой оболочкой в качестве нулевого провода обычно используются металлические конструкции зданий и механизмов, соединяемые между собой и с нулевой точкой трансформатора. Если проводимость такой системы недостаточна, то вблизи кабельной линии прокладывается стальная полоса, используемая как нулевой провод.

Для трехжильных кабелей с алюминиевой оболочкой в качестве нулевого провода используется алюминиевая оболочка.

Для четырехжильных кабелей в алюминиевой оболочке нулевая жила соединяется с оболочкой и в расчете принимается их суммарная проводимость для невзрывоопасных помещений. Для взрывоопасных помещений алюминиевая оболочка не учитывается, считается только сопротивление нулевой жилы кабеля. У трехжильных кабелей со свинцовой оболочкой и бумажной изоляцией использовать свинцовую оболочку в качестве четвертой жилы допускается только при реконструкции существующих сетей при напряжении не более 220/127 В.

В сетях 380/220 В свинцовую оболочку при расчете однофазных КЗ включать в расчетную схему запрещается и в качестве четвертой жилы используется стальная полоса, проложенная вблизи кабеля или металлические конструкции зданий и механизмов. При прокладке трехпроводных линий в трубах в качестве заземляющего проводника учитываются сами трубы; соседние металлические конструкции не учитываются; при четырехпроводных линиях учитываются и труба, и четвертый нулевой провод. Исключением являются взрывоопасные помещения, где учитывается только четвертый провод, а труба не учитывается.

Пример 17.2

Для схемы, представленной на рис. 17.2, определить наибольшие и наименьшие величины токов при КЗ поочередно в точках К1 и К2.

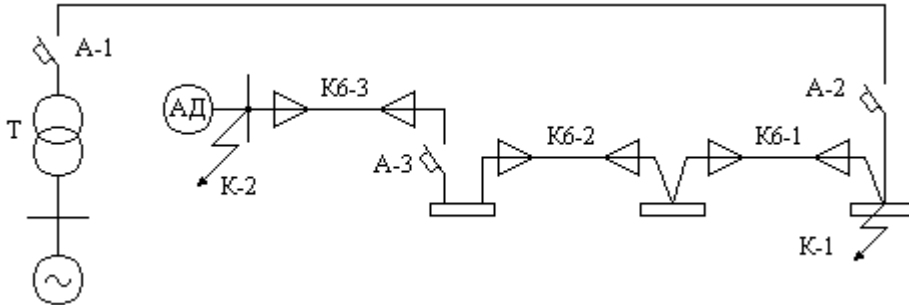


Рис. 17.2. Схема к примеру 17.2

Трансформатор Т 1000 кВ·А; 10/0,4 кВ, Y/Y0-0.

Шины Ш 3,5 м; А-2(80x8), расстояние между фазами 200 мм.

Шинопровод магистральный ШМ 50 м, $I_n=1600$ А.

Шинопровод распределительный ШР 4 м, $I_n=600$ А.

Кабели: Кб-1 10 м, А(3x50+1x25); Кб-28 м, А(3x35+1x16).

Кб-3 11 м, А(3x16+1x10); все кабели с алюминиевой оболочкой.

Автоматы: А-1 1500 А; А-2 600 А; А-3 50 А.

Используя справочный материал приложений, находим сопротивления элементов заданной схемы.

Для трансформатора $T_1=1,7$ мОм; $X_1=8,6$ м; $R_0=0,9$ мОм.

Шины Ш $r_1=3,5$ $0,034=0,12$ мОм.

$X_1=3,5$ $0,145 \lg[1,26 \cdot 200 / 0,23(80+24)]=0,51$ мОм.

$r_0=10$ $0,12 = 1,2$ мОм; $X_0 = 8,5$ $0,51 = 4,4$ мОм.

Шинопровод ШР $r_1=4$ $0,1=0,4$ мОм; $X_1=4$ $0,1=0,4$ мОм; для нулевой последовательности аналогично предыдущему $r_0=4$ мОм $=X_0$.

Кабели: Кб1 $r_1=10$ $0,77=7,7$ мОм; $X_1=10$ $0,068=0,68$ мОм.

$r_0=10$ $1,4=14$ мОм; $X_0=10$ $0,19=1,9$ мОм.

Кб2 $r_1=8$ $1,1=8,8$ мОм; $X_1=8$ $0,065=0,52$ мОм.

$r_0=8$ $1,8=14,4$ мОм; $X_0=8$ $0,23=1,84$ мОм.

Кб3 $r_1=11$ $2,4=26,4$ мОм; $X_1=11$ $0,084=0,92$ мОм.

$r_0=11$ $3,5=38,5$ мОм; $X_0=11$ $0,33=3,63$ мОм.

Автоматы А-1 $r=X=0$; А-2 $r=0,12$ мОм; $X=0,09$ мОм.

А-3 $r=5,5$ мОм, $X=2,7$ мОм.

При КЗ в точке К1 примем сопротивление контактных соединений $r=20$ мОм. Следовательно, результирующие сопротивления схемы относительно точки К1 будут:

$$r_{1c} = 1,7 + 0,12 + 1,7 + 0,4 + 0,12 + 20 = 24 \text{ мОм.}$$

$$X_{1c.} = 8,6 + 0,51 + 1,15 + 0,4 + 0,09 = 10,75 \text{ мОм.}$$

$$X_{r0c.} = 0,9 + 1,2 + 17 + 4 + 0,12 + 20 = 43,22 \text{ мОм.}$$

$$X_{0c.} = 80 + 4,4 + 11,5 + 4 + 0,09 = 100 \text{ мОм.}$$

Ток при трехфазном КЗ

$$I_K^3 = \frac{400}{\sqrt{3} \sqrt{24^2 + 10,75^2}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 26,5} = 8,7 \text{ êА.}$$

Ток при однофазном КЗ

$$I_K^1 = \frac{3 \cdot 400}{\sqrt{3} \sqrt{(2 \cdot 24 + 43,22)^2 + (2 \cdot 10,75 + 100)^2}} = \frac{3 \cdot 400}{152} = 4,55 \text{ êА.}$$

Без учета сопротивлений контактных соединений эти токи соответственно были бы: $I_{K3} = 20 \text{ кА}$ и $I_{K1} = 5,5 \text{ кА}$.

При $x/r = 10,75/24 = 0,45$ ударный коэффициент $K_u = 1$ и ударный ток составляет: $i_{уд} = 2 \cdot 8,7 = 12,3 \text{ кА}$.

При КЗ в точке К2 результирующие сопротивления будут (считая здесь сопротивления контактных соединений $r = 30 \text{ мОм}$):

$$r_{1c.} = 24 + 7,7 + 8,8 + 26,4 + (30 - 20) + 5,5 = 82,4 \text{ мОм.}$$

$$X_{1c.} = 10,75 + 0,68 + 0,52 + 0,92 + 2,7 = 15,57 \text{ мОм.}$$

$$r_{0c.} = 43,22 + 14 + 14,4 + 38,5 + (30 - 20) + 5,5 = 125,5 \text{ мОм.}$$

$$X_{0c.} = 100 + 1,9 + 1,84 + 3,63 + 2,7 = 110 \text{ мОм.}$$

Величины токов:

– при трехфазном КЗ

$$I_K^3 = \frac{400}{\sqrt{3} \sqrt{82,4^2 + 15,75^2}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 83,8} = 2,75 \text{ êА.}$$

– при однофазном КЗ

$$I_K^1 = \frac{3 \cdot 400}{\sqrt{3} \sqrt{(2 \cdot 82,4 + 125,5)^2 + (2 \cdot 15,75 + 110)^2}} = \frac{3 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 24} = 2,14 \text{ êА.}$$

Без учета сопротивления контактных соединений эти токи были бы: $I_{K3} = 4,05 \text{ кА}$ и $I_{K1} = 2,08 \text{ кА}$.

Домашнее задание № 12

Для схемы определить наибольший и наименьший токи трехфазного и однофазного КЗ в точке К.

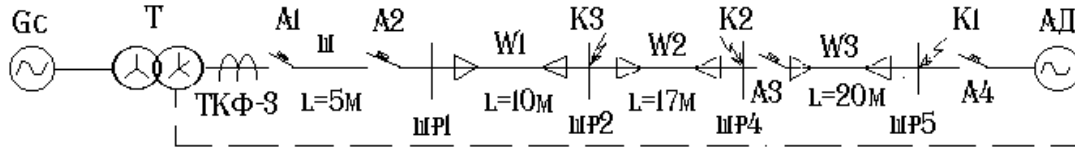


Таблица 17.1

N вар.	S _г , КВА	A1, А	Шины, Мм	A2, А	W1, S, мм ²	W2, S, мм ²	A3, А	W3, S, мм ²	A4, А
1	40	70	25X3	—	3 X 25+1 X 16	3 X 16+1 X 10	50	4 X 10	50
2	63	70	30 X3	—	4 X 25	4 X 16	50	4 X 25	50
3	100	70	30 X4	—	4 X 25	4 X 16	50	4 X 16	50
4	160	100	40 X4	80	3 X 35+1 X 16	3 X 25+1 X 16	70	4 X 25	50
5	180	140	40 X5	100	4 X 35	4 X 25	100	4 X 25	70
6	250	200	40 X5	120	4 X 35	4 X 25	140	4 X 25	100
7	320	250	40 X5	200	4 X 35	4 X 25	140	4 X 25	100
8	400	300	50 X6	250	4 X 50	3 X 35+1 X 16	200	4 X 35	140
9	630	400	60 X8	300	4 X 50	4 X 35	200	4 X 35	140
0	1000	400	80 X8	300	3 X 70+1 X 25	3 X 50+1 X 25	200	4 X 50	140

18. ОГРАНИЧЕНИЕ ТОКОВ КЗ

18.1. Способы ограничения токов КЗ

По уровню токов и мощностей КЗ осуществляют выбор сечения шин, токопроводов, проводов и кабелей, отключающую и коммутационную способность аппаратов, электродинамическую и термическую стойкость токоведущих частей и конструкций электрооборудования. Выбор электрооборудования по факторам аварийного режима не только означает предъявление более жестких требований к его техническим характеристикам, но и свидетельствует о соответствующем росте его стоимостных показателей.

При проектировании ЭЭС решается техникоэкономическая задача ограничения уровней токов и мощностей КЗ до значений, допустимых параметрами электрооборудования, которые экономически целесообразно применять. В процессе эксплуатации ЭЭС, сопровождающейся их развитием с включением новых источников электрической энергии, возникает задача ограничения уровней токов и мощностей КЗ, если они превышают параметры установленного электрооборудования. При ее решении используют различные меры, связанные с увеличением токов КЗ и направленные на увеличение сопротивления цепи КЗ, локализацию в аварийном режиме источников ее питания и отключение поврежденной электрической сети за время $t < 5$ мс.

К таким методам относятся: выбор структуры и схемы электрических соединений элементов ЭЭС; стационарное и автоматическое деление электрической сети; выбор режима ее эксплуатации; выбор схем коммутации; применение оборудования с повышенным электрическим сопротивлением; использование быстродействующих коммутационных аппаратов; изменение режима нейтрали элементов сети.

Структура и схемы электрических соединений элементов ЭЭС выбираются на стадии ее проектирования и реконструкции. В основу принимаемых решений при этом должны быть положены следующие принципы:

1. Максимальное приближение источников питания к электроприемникам. В длительных режимах используется централизованное электропитание от ЭЭС через один или несколько приемных пунктов. Для СЭС промышленных предприятий характерным является наличие нескольких источников питания цепи КЗ: собственные источники электрической энергии в виде генераторов ТЭС; подстанции связи с районной энергетической системой; синхронные компенсаторы, а также синхронные и асинхронные двигатели. Долевое участие каждого источника в питании места КЗ зависит от их мощности и электрической удаленности. Приближение основного источника питания означает уменьшение количества промежуточных пунктов трансформации в СЭС; увеличение количества элементов сети,

рассчитываемых на более высокие напряжения, а следовательно, на меньшие рабочие токи и токи КЗ.

2. Секционирование всех ступеней распределения электрической энергии в СЭС. Это требование тесно связано с выбором количества и мощности трансформаторов главных понижающих подстанций (ГПП) и трансформаторных пунктов (ТП), количества и пропускной способности питающих линий. Такое построение СЭС позволяет увеличить электрическое сопротивление сети протеканию тока КЗ, предотвратить развитие аварии и локализовать место КЗ.

3. Построение и выбор конфигурации электрической сети (радиальной, магистральной, радиально-магистральной) должны обосновываться (наряду с такими основными факторами, как надежность, потери мощности и энергии, расход цветного металла и др.) также степенью использования сечений проводников, выбранных по току КЗ.

4. Использование токоограничителя в схеме электроснабжения, при котором токоограничивающие устройства устанавливаются на нескольких последовательных ступенях распределения электрической энергии.

Стационарное или автоматическое деление сетей выполняется обычно в системах внешнего электроснабжения в связи с увеличением числа и мощности источников электрической энергии как в энергетической системе, так и на собственных ТЭЦ. Необходимость деления сети получается в тех случаях, когда уровень токов КЗ в узлах нагрузки превышает допустимый уровень по параметрам электрооборудования, находящегося в эксплуатации. Заметим, что деление сети существенно влияет на эксплуатационные режимы, устойчивость и надежность работы электрической системы, а также на потерю мощности и энергии в сетях.

Стационарное деление исходной схемы сети (рис. 18.1 а) выполняют в нормальном режиме таким образом, чтобы максимальный уровень тока КЗ в конкретном узле нагрузки не превышал допустимый по параметрам установленного электрооборудования (рис. 18.1 б, в).

Автоматическое деление сети осуществляют в аварийных режимах последовательной локализацией места КЗ (рис. 18.1 г). При КЗ на присоединении А производится отключение части источников питания места повреждения (выключателем QS2, QS3), а затем выключателем QS1 отключается присоединение.

Последовательное отключение источников питания цепи тока КЗ позволяет применять коммутационные аппараты с меньшей отключающей способностью. Выбор режима эксплуатации сети тесно связан со схемными решениями. В СЭС рекомендуется отдельная работа силовых трансформаторов ГПП и ТП. Совместно с отдельной работой источников электрической энергии разукрупнение подстанции и секционирование ступеней распределения энергии дают возможность получить в нормальном режиме наибольшее сопротивление цепи тока КЗ. В нормальном режиме все

секции РУ работают независимо, а необходимая степень бесперебойности электроснабжения обеспечивается включением секционных выключателей оперативным обслуживающим персоналом с использованием АВР.

Схемы питания СЭС при проектировании внешнего электроснабжения выбираются на основе фактической мощности КЗ, поступающей от энергетической системы, требуемой степени бесперебойности электроснабжения, состава и территориального размещения электроприемников. При этом необходимо также оценивать токи КЗ, генерируемые синхронными и асинхронными двигателями, а также возможности дальнейшего развития СЭС.

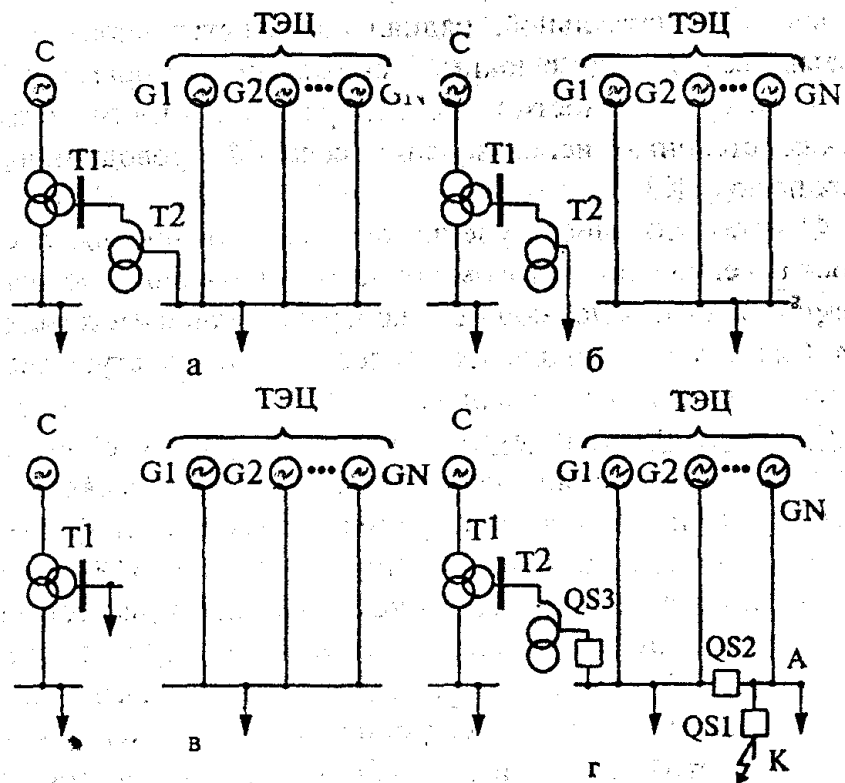


Рис. 18.1. Деление исходной схемы сети (а) на стационарное (б, в) и автоматическое (г)

Схемы электрических соединений должны отвечать требованиям надежности, простоты и экономичности.

Определяющим для уровней токов КЗ в СЭС является выбор схемы электрических соединений ГПП как узла связи между ЭЭС и распределительной сетью СЭС. Чем больше мощность понижающего трансформатора связи ЭЭС, тем больше токи КЗ на шинах ГПП.

Для их уменьшения следует разукрупнять по мощности подстанции СЭС или применять схемы электрических соединений, ограничивающие уровень токов КЗ на шинах вторичного напряжения. На 18.2 показаны варианты схем электрических соединений, которые рекомендуется использо-

вать в связи с повышением единичной установленной мощности трансформаторов.

При выборе схем электрических соединений необходимо обращать внимание на построение сетей, подключаемых к шинам вторичного напряжения ГПП. Через распределительную сеть питается место КЗ от асинхронных и синхронных двигателей. Секционирование на всех ступенях распределения электрической энергии уменьшает значение тока КЗ, генерируемого местными источниками. При этом следует учитывать изменение схемы электрических соединений в эксплуатационных режимах, при которых допускается работа с включенными секционными аппаратами для наиболее тяжелого режима.

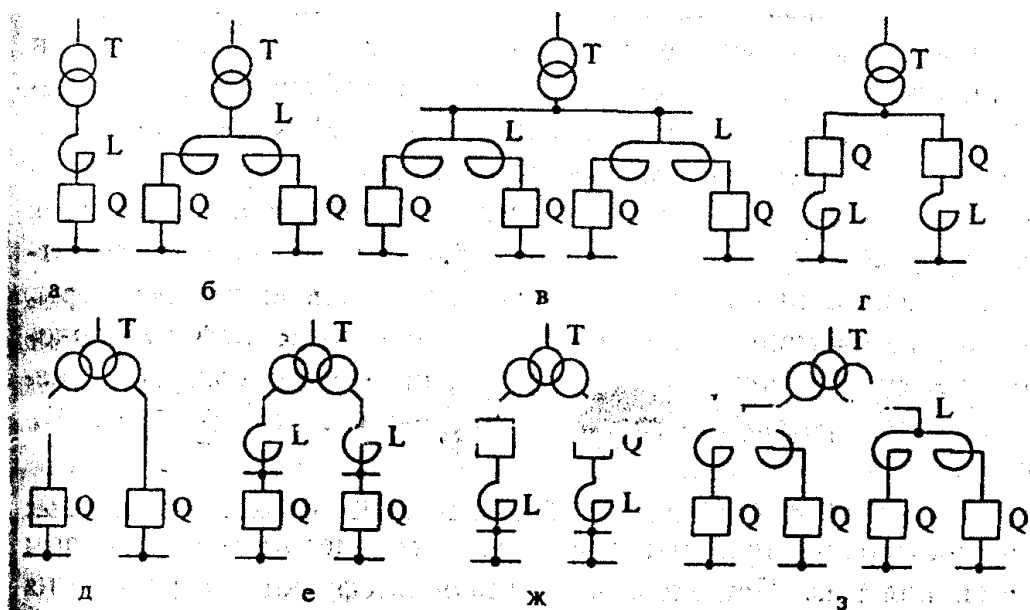


Рис. 18.2. Варианты схем электрических соединений ГПП с ограничением токов КЗ на шинах вторичного напряжения при единичной мощности трансформаторов: а – 25-40 МВ·А; б – 32-63 МВ·А; в – 63-80 МВ·А; г – 63-100 МВ·А; д – 25-80 МВ·А; е – 40-80 МВ·А; ж – 63-80 МВ·А; з – 100 МВ·А

Применение электрооборудования с повышенным электрическим сопротивлением предусматривает установку как общесетевых, так и специальных элементов. При проектировании СЭС можно целенаправленно выбирать элементы сети с большим реактивным и активным сопротивлениями, изменяя количество и мощность трансформаторов, применяя трансформаторы с повышенным относительным напряжением КЗ, ВЛ и токопроводы с увеличенным расстоянием между фазами, протяженные токопроводы и т. п. К специальному электрооборудованию относятся трансформаторы и автотрансформаторы с расщепленными обмотками низшего напряжения, одноцепные и сдвоенные реакторы.

Токоограничивающее действие коммутационных аппаратов проявляется при быстродействии, соизмеримом с периодом изменения тока. При

этом они выполняют функции ограничения воздействия по амплитуде и длительности отключения тока КЗ. Электродинамическое действие тока КЗ уменьшается при использовании аппаратов, время срабатывания которых менее 5 мс (рис. 18.3). В качестве таких аппаратов могут применяться безынерционные предохранители, тиристорные выключатели с принудительной коммутацией, ограничители ударного тока взрывного действия, а также некоторые типы автоматов на напряжение до 1 кВ.

При продолжительности КЗ более 5 мс проявляется тепловое действие тока, которое может быть уменьшено ускорением отключения поврежденной цепи.

Весьма существенным фактором изменения значений токов КЗ, которые протекают в контурах проводники – земля, является изменение режима нейтрали электрической сети. Заземление нейтралей элементов через цепи с дополнительными сопротивлениями приводит к изменению эквивалентного сопротивления нулевой последовательности. Эту же цель достигают заменой автотрансформаторов в узловых точках сети трансформаторами такой же мощности с соединением фазных обмоток по схеме «звезда – звезда». Заземление нейтрали облегчает решение других важных задач проектирования (уровней изоляции, требований безопасности, уровней перенапряжений, надежности), но повышает значение тока КЗ на землю. Поэтому выбор и изменение режима нейтрали сети или ее элементов должны решаться комплексно путем технико-экономического обоснования.

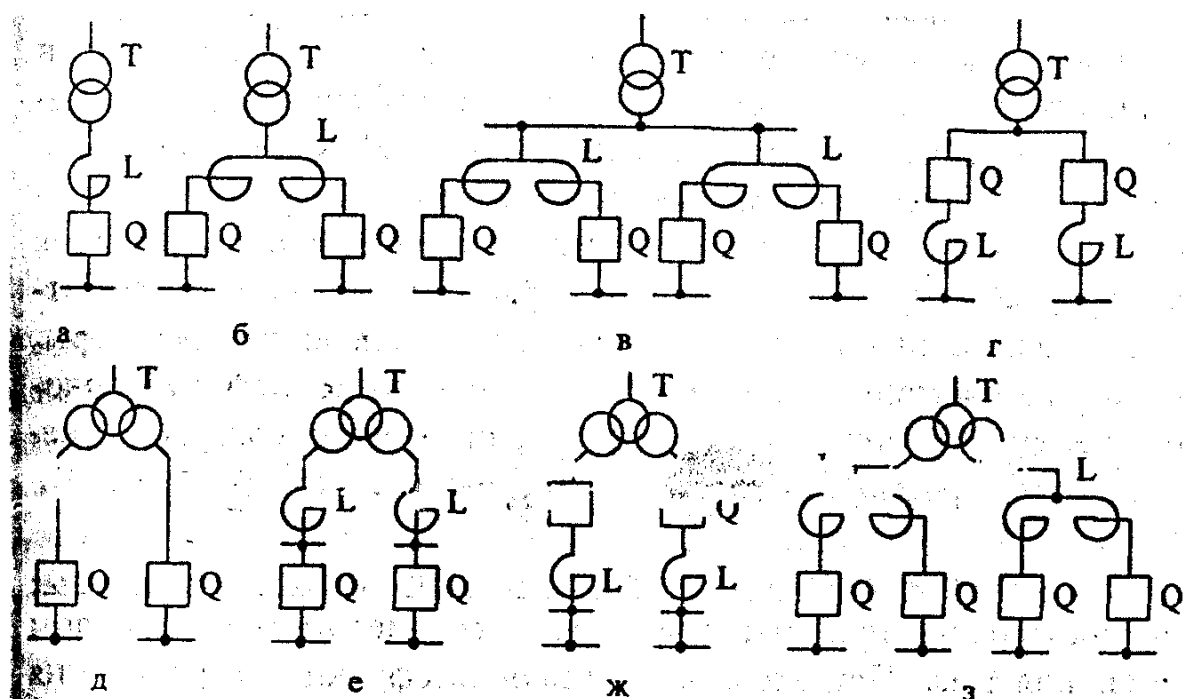


Рис. 18.3. Ограничение коммутационным аппаратом Q электродинамического воздействия тока КЗ со значения i_{y1} до значения i_{y2}

Таким образом, ограничение мощностей токов КЗ в ЭЭС производится правильным проектированием схем их подстанций и электрических сетей.

18.2. Применение технических средств ограничения токов КЗ

Реализация различных способов ограничения токов КЗ предусматривает применение специальных технических средств, которые непосредственно, благодаря своему конструктивному исполнению, ограничивают значение или продолжительность воздействия тока КЗ либо используются в схемах соединения элементов, выполняющих в совокупности эту функцию. К таким средствам относятся:

- аппараты и устройства, реализующие автоматическое деление сети;
- силовые трансформаторы и автотрансформаторы с особым исполнением конструкции и соединения фазных обмоток;
- токоограничивающие элементы и устройства;
- токоограничивающие коммутационные аппараты;
- устройства изменения режима работы нейтрали силовых трансформаторов.

Автоматическое деление сети может использоваться во внешнем электроснабжении предприятий в сетях напряжением 35 кВ и выше. Такая операция реализуется с применением устройств противоаварийной автоматики и коммутационных аппаратов, устанавливаемых на мощных присоединениях, между секциями РУ и на вводах.

Средства противоаварийной автоматики включают в себя: релейную защиту, реагирующую на появление КЗ; устройства автоматического выполнения последовательного отключения коммутационных аппаратов (рис. 18.1 г); устройства автоматической частотной разгрузки, АПВ и АВР. Эта система последовательного отключения токов КЗ должна обладать высокими надежностью и быстродействием как при отключении КЗ, так и при восстановлении исходного режима. Ее коммутационные аппараты должны выдерживать полный сквозной ток КЗ и включение без повреждения на КЗ в данном присоединении.

Силовые трансформаторы и автотрансформаторы могут создаваться с учетом необходимости ограничения токов КЗ. Для ограничения уровня мощности КЗ на шинах вторичного напряжения может быть использована конструктивная особенность трансформатора. Известно, что напряжение КЗ определяется номинальным напряжением и проходной мощностью трансформатора, которые обуславливают геометрические размеры его обмоток. При концентрированном размещении обмоток у двухобмоточных трансформаторов обмотка низшего напряжения располагается внутри, а высшего напряжения – снаружи; у трехобмоточных трансформаторов об-

мотка среднего напряжения помещается между обмотками низшего и высшего напряжения.

Снижение уровня мощности КЗ на выводах понижающих трансформаторов (рис. 18.4) определяется выражениями:

для двухобмоточных трансформаторов

$$S''_{k2} / S''_{k1} = 1 / (1 + U_k S''_{k1} / (100 S_{\delta\delta .\tilde{m}})); \quad (18.1)$$

для трехобмоточных трансформаторов

$$\begin{aligned} S''_{k2} / S''_{k1} &= 1 / (1 + 2U_{rd-y} S''_{k1} / (100 S_{\delta\delta\tilde{m}})), \\ S''_{k3} / S''_{k1} &= 1 / (1 + 2U_{\hat{a}-\tilde{n}} S''_{k1} / (100 S_{\delta\delta\tilde{m}})). \end{aligned} \quad (18.2)$$

Из (18.1) и (18.2) следует, что снижение мощности КЗ зависит от напряжения КЗ между соответствующими обмотками трансформатора, их единичной мощности и мощности КЗ, поступающей от ЭЭС. Понижающие двух- и трехобмоточные трансформаторы по напряжению КЗ имеют некоторый диапазон варьирования. Например, для двухобмоточных трансформаторов на напряжения 35/6-10 кВ и мощность 1-80 МВ·А он лежит в пределах 6,5-14,4 %, на напряжения 110/6-10 кВ и мощность 2,5-400 МВ·А – в пределах 10,5-13,5 %, на напряжения 220/6-10 кВ и мощность 31,5-125 МВ·А – в пределах 10,6-14 %. Поэтому для ограничения токов КЗ на шинах вторичного напряжения, согласно (18.1) и (18.2), следует выбирать трансформаторы с повышенным для соответствующих обмоток напряжением КЗ, разукрупнять по мощности понижающие подстанции на связях с мощной ЭЭС, использовать разделительную работу трансформаторов.

Трансформаторы и автотрансформаторы могут выполняться с расщепленными обмотками низшего напряжения. Части расщепленной обмотки размещаются симметрично относительно обмотки высшего напряжения, имеют самостоятельные выводы и допускают произвольное распределение нагрузки между обмотками. Ограничение токов КЗ конструктивно достигается большим значением напряжения КЗ между частями расщепленной обмотки.

Для ограничения несимметричных токов КЗ существенную роль играет схема соединения фазных обмоток трансформаторов и автотрансформаторов. Так как в схему замещения нулевой последовательности включаются только те ветви, по которым циркулируют токи нулевой последовательности, то она не содержит участков электрической сети, находящихся за обмотками, соединенными в треугольник.

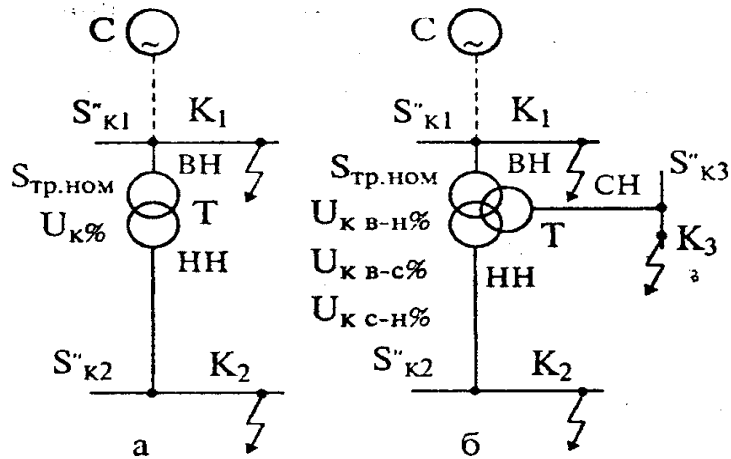


Рис. 18.4. К ограничению уровня мощности КЗ выбором параметров двухобмоточных (а) и трехобмоточных (б) трансформаторов

Токоограничивающие реакторы представляют собой дополнительные реактивные сопротивления, включаемые в различных точках электрической сети напряжением 6-220 кВ. Их назначение – снижение тока КЗ за реактором и сохранение требуемого уровня остаточного напряжения в узловых точках сети перед реактором. В зависимости от места включения различают реактирование присоединений (рис. 18.5 а), вводов (рис. 18.2 и 18.5 б), секции (18.5 в) и их сочетания (рис. 18.5 г). По схеме включения различают одноцепные и сдвоенные (расщепленные). Отличие сдвоенного реактора от одноцепного заключается в наличии среднего вывода обмотки, в связи с чем возможны различные схемы его включения и использования.

Для уменьшения затрат следует стремиться к применению групповых реакторов вместо индивидуальных в цепях присоединений, вводов и схем коммутации ГПП. Вместе с тем, в схемах, содержащих групповые реакторы на большие номинальные токи и с большим реактивным сопротивлением, возможны колебания напряжения, вызываемые изменением их нагрузки. Этот недостаток устраняется установкой сдвоенных реакторов с обеспечением равномерной загрузки их ветвей.

Первоначальным действием при выборе реактора является определение его индуктивного сопротивления. Исходя из необходимого уровня мощности КЗ за реактором $S_{к2} = S_{к.необх.}$, требуемое сопротивление в процентах или в омах рассчитывают, соответственно, по формулам:

$$x_p \% = ((S_{\bar{6}}/S_{к2})x_{с\bar{6}})100IU_{\bar{6}}/(I_s U_c); \quad (18.3)$$

$$x_p = (x_p \% / 100)U_c / (\sqrt{3} I), \quad (18.4)$$

где $x_{с\bar{6}}$ – сопротивление связи данного узла цепи с источником электрической энергии, приведенное к базисным условиям; I , U_c – рабочий ток и напряжение сети, соответствующие длительному режиму работы реактора.

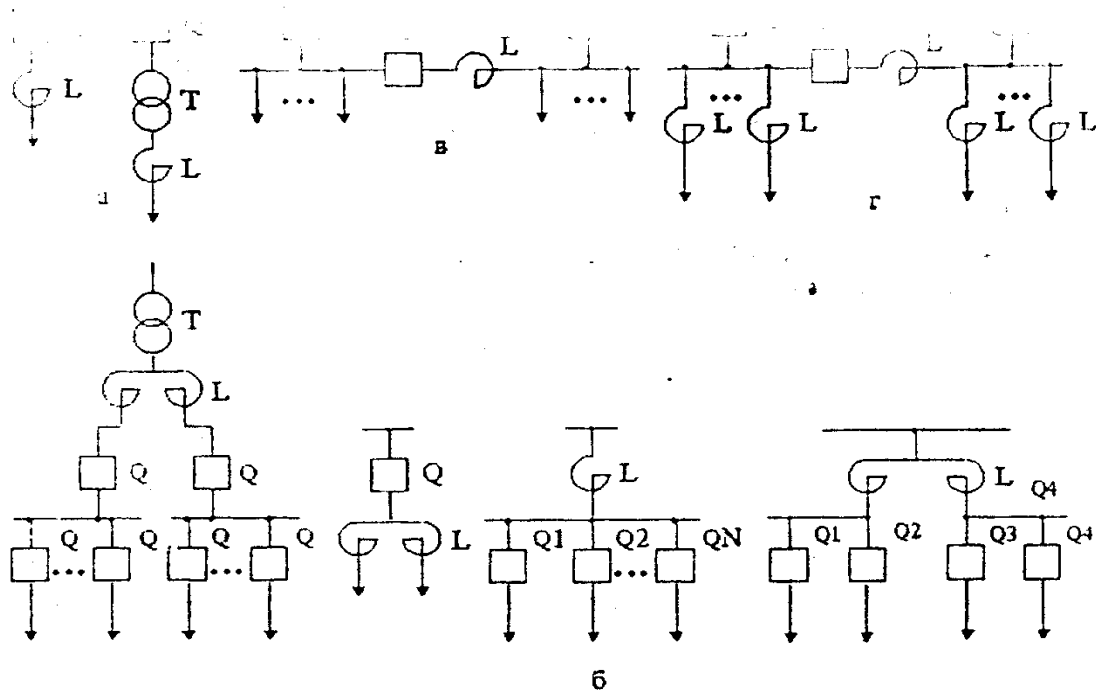


Рис. 18.5. Схемы реактирования присоединений (а), вводов (б), секций (в) и их сочетаний

По току, напряжению сети, индуктивному сопротивлению выбирают реактор с ближайшим большим стандартным значением x_p , который проверяют (при необходимости) по значению остаточного напряжения $U_{ост.} \geq 0,6U_c$.

Секционные реакторы ограничивают ток КЗ на сборных шинах и присоединениях. По сравнению с линейными реакторами они оказывают меньшее токоограничивающее действие, так как рассчитываются на большие номинальные токи, протекающие между секциями при нарушении нормального режима работы.

Секционные реакторы выбирают по номинальному напряжению, наибольшему из рабочих токов секций и индуктивному сопротивлению. Сопротивлением реактора в начале задаются и путем проверочных расчетов: изменяют его до значения, допустимого параметрами устанавливаемого электрооборудования.

Сдвоенные реакторы конструктивно подобны обычным реакторам, но от средней точки обмотки имеется дополнительный вывод. В случае применения сдвоенных реакторов источник может быть присоединен к средней точке, а потребители – к крайним, или наоборот.

Преимуществом сдвоенного реактора является то, что в зависимости от схемы включения и направления токов в обмотках индуктивное сопротивление его может увеличиваться и уменьшаться. Это свойство сдвоенного реактора обычно используется для уменьшения падения напряжения в нормальном режиме и ограничения токов при КЗ.

Ветви реактора выполняют на одинаковый номинальный ток $I_{\text{ном.}}$, а средний вывод – на удвоенный номинальный ток ветви $2I_{\text{ном.}}$. За номинальное сопротивление сдвоенного реактора принимают относительное сопротивление ветви обмотки при отсутствии тока в другой ветви $x_p = x_b = \omega L$, или

$$x_p \% = x_b \% = (x_b \sqrt{3} I_{\text{ном.}} * 100) / U_{\text{ном.}}, \quad (18.5)$$

где L – индуктивность ветви реактора (индуктивности ветвей в реакторе обычно равны между собой).

Выбор сдвоенного реактора аналогичен выбору одноцепного реактора. Значение тока каждой ветви сдвоенного реактора должно быть не менее **0,675** номинального тока обмотки трансформатора либо суммарного тока нагрузки. При этом предполагается равномерное распределение нагрузки между ветвями реактора.

Наличие сопротивления у токоограничивающих реакторов приводит к дополнительным потерям напряжения, мощности и энергии.

Токоограничивающие коммутационные аппараты совмещают функции ограничения наибольших значений токов КЗ и защиты от воздействия сверхтоков путем их отключения. К ним относятся быстродействующие токоограничивающие предохранители, ограничители ударного тока и специальные автоматические выключатели на напряжение до 1 кВ.

Токоограничивающие предохранители обеспечивают защиту электроустановки при условии, если $I_{y.ckв} < I_{y.ожид}$.

Токоограничивающие предохранители применяются в сетях напряжением до 35 кВ. Они характеризуются следующими показателями: номинальными напряжениями, током патрона и током плавкой вставки, который не должен превышать номинального тока патрона предохранителя, а также наибольшим и наименьшим токами отключения, зависимостями времени плавления вставки $t_{пл}$, времени отключения $t_{откл}$ и тока ограничения $I_{y.ckв}$ от периодической составляющей $I_{п.к}$ ожидаемого тока КЗ.

Токоограничивающее действие предохранителей определяется номинальным током плавкой вставки $I_{\text{ном.пл}}$, а также значениями периодической составляющей и ударного тока КЗ при отсутствии в сети предохранителя. Если степень токоограничения оценивать по коэффициенту ограничения $K_{огр} = I_{y.ckв} / I_{y.ожид}$, то значение последнего уменьшается с увеличением номинального тока плавкой вставки и становится наименьшим при номинальном токе патрона предохранителя.

Как средство токоограничения предохранители сравнительно дешевы и просты, но имеют ряд недостатков: одноразовое использование плавких вставок и патронов, нестабильность токовременных характеристик, плохая совместимость действия с устройствами релейной защиты и с системой автоматики, а также недостаточная эксплуатационная надежность.

Ограничители ударного тока, как и предохранители, являются коммутационными аппаратами одноразового действия. В них используется принцип отключения цепи взрывом токоведущего проводника пиропонроном. Сигнал на срабатывание ограничителя поступает от внешних устройств релейной защиты, контролирующих ток КЗ и его первую производную. Ток КЗ ограничивается за время около 0,5 мс при полном отключении сети за 5 мс.

Недостатком ограничителей ударного тока являются высокая стоимость и сложность управления.

Автоматические выключатели, применяемые в сетях напряжением до 1 кВ, срабатывают при токах КЗ за время 0,2 – 0,6 с. Это время достаточно для обеспечения защиты электрооборудования от теплового воздействия токов КЗ, благодаря чему электрические сети, защищаемые такими выключателями, на термическую стойкость не проверяются.

Известны конструкции специальных автоматических выключателей (токоограничивающие выключатели, выключатели с ограничителями) для снижения амплитуды тока КЗ в течение времени отключения. В них ограничение сверхтоков достигается введением в электрическую цепь больших сопротивлений. Для этой цели используется сопротивление электрической дуги, образующейся между размыкающимися контактами выключателя или в специальных элементах (ограничителях). Быстрое нарастание сопротивления электрической дуги реализуется отбросом контактов выключателя под действием электродинамических сил, вызываемых протекающим током КЗ, или в результате срабатывания быстродействующих электромагнитных элементов. В ограничителях сопротивления дуги уровень тока КЗ снижается до такого значения, при котором электрическую цепь может разомкнуть выключатель, работающий совместно с ограничителем.

Устройства, включаемые в цепь заземления нейтрали силовых элементов, могут иметь различное целевое назначение, так как режим нейтрали сети влияет на решение многих вопросов электроснабжения: обеспечение условий работы релейной защиты; выбор класса рабочей изоляции проводников; снижение уровня атмосферных и коммутационных перенапряжений и др. К ним относятся также вопросы ограничения токов наиболее распространенных однофазных КЗ на землю. По данным исследований ток однофазных КЗ превышает ток трехфазного КЗ на 25 %, поэтому их необходимо рассчитывать с целью принятия мер для ограничения однофазного КЗ.

Режим работы нейтралей сетей в СЭС зависит от уровня напряжения, значения емкостных токов КЗ на землю, требований безопасности и рабочей среды предприятий. С глухозаземленной нейтралью работают сети напряжением до 1 кВ. В условиях рабочей среды, где определяющим фактором является требование электро- и взрывобезопасности, сети напряжением до 1 кВ выполняют с изолированной нейтралью. С изолированной

или заземленной через дугогасящие реакторы нейтралью работают сети напряжением 6-35 кВ. С эффективно заземленной нейтралью эксплуатируются сети напряжением 110 кВ и выше с большими токами КЗ на землю, когда коэффициент замыкания на землю

$$K_3 = U_{ф.з} / U_{ф.ном} \leq 1,4, \quad (18.6)$$

где $U_{ф.з}$ – разность потенциалов между неповрежденной фазой и землей в точке КЗ на землю другой или двух других фаз; $U_{ф.ном}$ – разность потенциалов между фазой и землей в этой точке до КЗ.

Неравенство (18.11) выполняется при соотношении параметров сети

$$Z_{орез} / Z_{1рез} \leq 3 \div 4 \text{ или } x_{орез} / x_{1рез} \leq 5, \quad (18.7)$$

где $Z_{орез}$, $x_{орез}$ – результирующее полное и реактивное сопротивление прямой последовательности; $Z_{1рез}$, $x_{1рез}$ – то же нулевой последовательности.

Для ограничения токов КЗ на землю разземляют нейтраль части силовых трансформаторов (рис. 18.6 а), включают в цепь нейтрали элементов сети реакторы с линейной характеристикой (рис. 18.6 б), насыщающиеся реакторы (рис. 18.6 в), дугогасящие реакторы и резисторы (18.6 г), нелинейные сопротивления (18.6 д); гальванически разделяют сеть установкой трансформаторов или заменой автотрансформаторов трансформаторами, что расширяет возможности изменения режима нейтрали ее участков.

Эти устройства могут включаться постоянно в нейтраль, вводиться в цепь ее рабочего заземления при КЗ на землю (рис. 18.6 е) с помощью коммутационных аппаратов или изменять результирующее сопротивление при появлении КЗ на землю путем срабатывания пороговых элементов (насыщающихся реакторов); индуктивно-емкостных контуров, настроенных в резонанс напряжений.

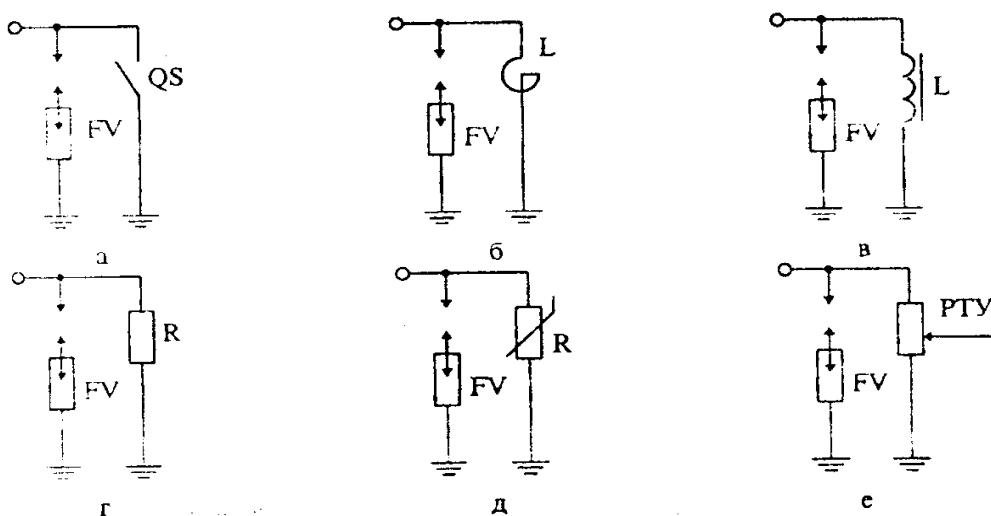


Рис. 18.6. Схемы, поясняющие выполнение рабочего заземления нейтрали

Наибольшие токи КЗ на землю наблюдаются в сети с глухозаземленной нейтралью. При заземлении нейтрали элементов сети через резистор или нелинейное активное сопротивление периодическая составляющая тока однофазного КЗ снижается на **20-30 %**, при этом резко уменьшается время воздействия его апериодической составляющей. Одновременно облегчаются условия работы релейной защиты и предотвращается появление перемещающихся дуговых КЗ на землю, хотя напряжения на нейтрали и неповрежденных фазах при КЗ увеличиваются.

При атмосферных и коммутационных перенапряжениях заземление нейтрали через резистор равносильно ее глухому заземлению. Заземление нейтрали через реакторы или резонансные токоограничивающие устройства преследует цель ввести при КЗ в цепь заземления нейтрали индукционное сопротивление. Оно ограничивает ток КЗ в большей степени, чем при заземлении через устройства с активным сопротивлением того же значения, снижает напряжение на нейтрали, но менее эффективно при атмосферных перенапряжениях.

В сетях напряжением 110 кВ для ограничения тока КЗ эффективнее использовать резисторы, чем реакторы. Степень снижения тока при этом ограничивается допустимым повышением напряжения на неповрежденных фазах (до $1,4 U_{ф.ном}$). В сетях напряжением 220 кВ (в зависимости от параметров сети) эффективным может быть применение как резисторов, так и реакторов. Заземление нейтрали трансформаторов через резистор или реактор позволяет снизить установившийся ток КЗ до 50-80 % значения тока КЗ при глухозаземленной нейтрали без превышения допустимых уровней напряжений на нейтрали и неповрежденных фазах.

В сетях с изолированной или заземленной через дугогасящие реакторы нейтралью ток замыкания на землю наименьший. Он обуславливается активной проводимостью на землю и степенью компенсации емкостного тока дугогасящим реактором электрически связанной части сети. Поэтому в данном случае наиболее просто ограничить токи неполнофазных замыканий сети на землю путем разземления нейтрали ее силовых элементов.

Степень снижения тока КЗ с помощью рассмотренных средств ограничивается допустимым повышением напряжения на нейтрали и неповрежденных фазах в процессе КЗ, а также классом применяемой изоляции. Так как трансформаторы на напряжение 110 кВ и выше имеют низкий класс изоляции нейтрали, то степень токоограничения уменьшается с повышением номинального напряжения сети. Разземление нейтралей трансформаторов на напряжение 330 кВ и выше не допускается.

Выбор схемы и устройств цепи рабочего заземления нейтралей силовых элементов для снижения токов неполнофазных КЗ на землю зависит от режима нейтрали всей сети, ее параметров и ограничений по уровням перенапряжений, которые определяются шкалой номинальных напряжений. При этом весомыми являются следующие факторы: удобство эксплуатации, тре-

бования надежности и бесперебойности электроснабжения, стремление найти экономически выгодную границу между снижением токов КЗ на землю и допустимым повышением уровня различных видов перенапряжений.

18.3. Координация уровней токов КЗ

Координация уровней токов КЗ – это согласование их значений в различных узлах СЭС. По своей постановке она представляет собой важную технико-экономическую задачу, от решения которой зависят энергетические и стоимостные характеристики СЭС.

Что касается централизованного электроснабжения промышленных предприятий, городов и сельского хозяйства, то эта задача возникает при значительных токах КЗ на границе раздела с питающей энергетической системой. Ее решение заключается в ступенчатом снижении токов КЗ, даваемых источниками электрической энергии, при проектировании СЭС, ее эксплуатации и дальнейшем развитии либо реконструкции.

При проектировании СЭС исходными данными для решения задачи координации токов КЗ являются сведения об источниках питания и о составе электроприемников. На основе намеченного территориального размещения потребителей известными считаются предполагаемые источники энергии и их характеристики для узла подключения СЭС:

- установление мощности генерирующих источников промышленного района с перспективой их развития на 8-10 лет;
- мощности или токи КЗ, генерируемые источниками с учетом их развития не менее чем на 5 лет с момента ввода в эксплуатацию СЭС;
- рабочее напряжение районной ЭЭС;
- параметры ЛЭП между ЭЭС и СЭС.

Состав электроприемников обуславливает требования к бесперебойности электроснабжения, качеству электрической энергии, допустимой продолжительности в электропитании и др. По этим исходным данным могут быть сформулированы необходимые свойства проектируемой СЭС по надежности, потерям напряжения, мощности и энергии, безопасности, гибкости, жесткости и устойчивости, а также намечены варианты и параметры предполагаемого к применению электрооборудования.

На основе количественных показателей этих свойств и характеристик электрооборудования для узлов распределения электрической энергии могут быть определены оптимальные значения токов КЗ. С их учетом следует обосновывать структуру схемы электроснабжения – число приемных пунктов связи с ЭЭС, размещение подстанций глубокого ввода, выбор рабочих напряжения и количества ступеней распределения энергии.

На этапе эксплуатации СЭС необходимость решения вопросов координации токов КЗ возникает при изменениях схемы электроснабжения, повышении мощности генерирующих источников, мощности или пропускной способности основных элементов, при введении ограничений на режим

работы основного электрооборудования, увеличения плотности нагрузки и сетей. При этом новые уровни токов КЗ должны быть согласованны с параметрами установленного оборудования и сетей.

Координация достигается:

- стационарным или автоматическим делением сети;
- установкой токоограничивающих одноцепных и сдвоенных реакторов;
- применением различных токоограничивающих устройств;
- установкой коммутационных аппаратов повышенной стойкости к воздействию токов КЗ;
- разукрупнением трансформаторных подстанций по мощности трансформаторов и секций путем установки трансформаторов с расщепленными обмотками или сдвоенных реакторов;
- изменением режима нейтрали сети путем разземления части нейтралей трансформаторов, заземления нейтралей через резисторы, реакторы и токоограничивающие устройства;
- электрическим делением сети путем установки разделительных трансформаторов.

В условиях последующего расширения и развития СЭС согласованием токов КЗ преследуют такие же цели, как при эксплуатации СЭС. Дополнительной рациональной мерой здесь является строительство новых приемных пунктов связи с ЭЭС и подстанции глубокого ввода для покрытия увеличения электрических нагрузок с использованием разделения сетей.

На всех этапах координации токов КЗ анализ их на разных ступенях распределения энергии используется для обоснования технической необходимости создания нового и модернизации существующего электрооборудования. Контроль токов КЗ в узлах нагрузки и анализ динамики их изменения являются важным фактором обеспечения надежности электроснабжения.

Примеры расчетов

Пример 18.1

Сравнить режимы параллельной и раздельной работ трансформаторов ГПП (рис. 18.7 а) по значениям начального и ударного токов трехфазного КЗ на шинах низшего напряжения в точке К.

Решение

Принимаем за базисные следующие условия:

$$S_6 = S_k = 2000 \text{ МВ} \cdot \text{А}, U_6 = 10,5 \text{ кВ}. \text{ Тогда } I_6 = 2000 / (\sqrt{3} \cdot 10,5) = 110 \text{ кА}.$$

Сопротивления схем замещения (рис. 18.7 б, в) в о.е.:

$$x_1 = S_6 / S_k = 2000 / 2000 = 1;$$

$$x_2 = x_3 = x_4 = U_k S_6 / (100 S_{\text{нр.ном}}) = 11 \cdot 200 / (100 \cdot 125) = 1,76.$$

Токи КЗ:

при параллельной работе трансформаторов (рис. 18.7 б)

$$I_n'' = I_a / (x_1 + x_2 / 2) = 110 / (1 + 1,76 / 2) = 58,5 \text{ кА};$$

$$i_{y.n} = \sqrt{2} K_y \cdot I_n'' = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 58,5 = 149 \text{ кА};$$

при раздельной работе трансформаторов (рис. 18.7 в)

$$I_p'' = I_a / (x_1 + x_2) = 110 / (1 + 1,76) = 36,2 \text{ êÀ};$$

$$i_{y.p} = \sqrt{2} K_y \cdot I_p'' = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 36,2 = 92,2 \text{ êÀ}.$$

Переход с разделительной на параллельную работу трансформаторов ГПП вызывает повышение токов КЗ на шинах низшего напряжения на

$$(I_n'' / I_p'' - 1)100 = (58,5 / 36,2 - 1)100 = 62 \text{ \%}.$$

Пример 18.2

Рассчитать сопротивление реактора напряжением 10 кВ (рис. 18.8 а) для ограничения мощности КЗ на шинах до 200 МВ·А.

Решение

Принимаем за базисные условия: $S_6 = 3000 \text{ МВ·А}$, $U_6 = 10,5 \text{ кВ}$. Тогда $I_6 = 3000 / (\sqrt{3} \cdot 10,5) = 165 \text{ кА}$.

Сопротивление схемы замещения (рис. 18.8 б) в ОЕ:

связи с системой $x_1 = S_6 / S_k = 3000 / 3000 = 1$;

трансформатора $x_2 = U_k S_6 / (100 S_{\text{тр.ном}}) = 7,8$.

При номинальных параметрах сети в месте включения реактора ($U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ}$; $I_{\text{ном}} = 40 / (\sqrt{3} \cdot 10) = 2,31 \text{ кА}$) его сопротивление должно быть

$$x_p \% = [S_6 / S_{k2} - (x_1 - x_2)] I_{\text{ном}} U_6 100 / (I_6 U) = \\ = [3000 / 200 - (1 + 7,8)] \cdot 2,31 \cdot 10,5 \cdot 100 / (165 \cdot 10) = 9,11, \text{ или}$$

$$x_p = 9,11 \cdot 10 / (100 \sqrt{3} \cdot 2,31) = 0,227 \text{ Ом}.$$

Этим данным соответствует РБА 10-3000-12 с параметрами $U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ}$; $I_{\text{ном}} = 3000 \text{ А}$; $x_p \% = 12$ ($x_p = 0,23 \text{ Ом}$).

Фактическая мощность КЗ за реактором с сопротивлением, приведенным к базисным условиям,

$$x_{*p.6} = x_p \% \cdot I_6 \cdot U_c / (100 I_{\text{ном}} U_6) = 12 \cdot 165 \cdot 10 / (100 \cdot 3 \cdot 10,5) = 6,29 \text{ составляет}$$

$$S_k = S_6 / x_{*рез.6} = 3000 / (1 + 7,8 + 6,29) = 199 \text{ МВ·А}.$$

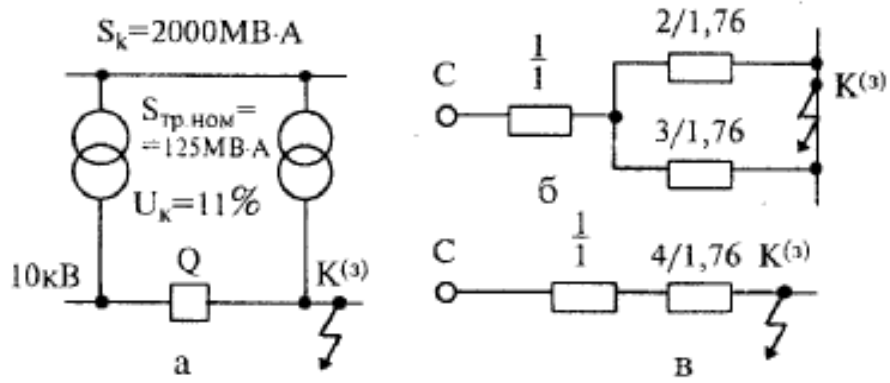


Рис. 18.7. К примеру 18.1

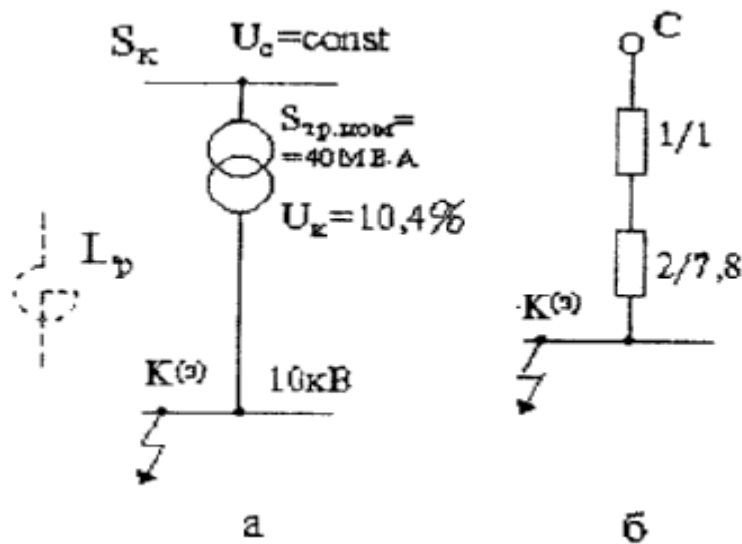


Рис. 18.8. К примеру 18.2

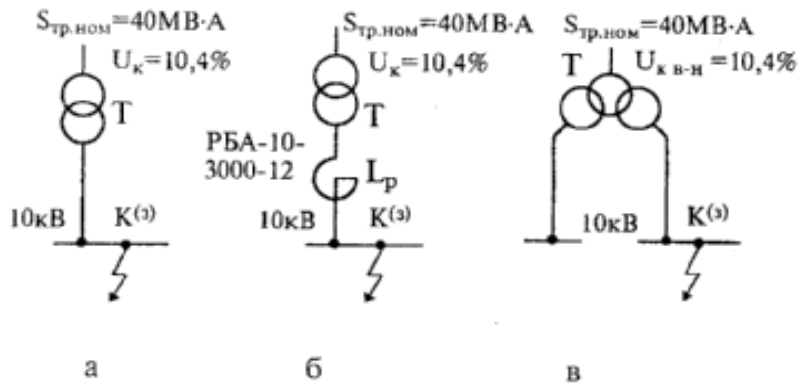


Рис. 18.9. К примеру 18.3

Пример 18.3

При реконструкции подстанции глубокого ввода (рис. 18.9 а) предполагается снизить мощность КЗ на шинах напряжением 10 кВ. Установить степень снижения мощности КЗ для вариантов ее ограничения, показанных на рис. 18.9 б и в. Мощность КЗ на стороне высшего напряжения равна 3000 МВ·А.

Решение

Принимаем за базисные следующие условия: $S_{\text{б}}=3000$ МВ·А, $U_{\text{б}}=10,5$ кВ. Тогда $I_{\text{б}}=3000/(\sqrt{3} \cdot 10,5)=165,15$ кА.

Используя результаты вычислений, полученные в предыдущем примере, находим:

для исходного варианта (рис. 18.9 а)

$$S_{\text{ка}} = S_{\text{б}} / x_{*\text{рез.б}} = 3000 / (1 + 7,8) = 341 \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

для варианта, показанного на рис. 18.9 б,

$$S_{\text{кб}} = 3000 / (1 + 7,8 + 6,29) = 199 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Сопротивление обмоток трансформатора для варианта, соответствующего рис. 14.9 в, при отсутствии данных $U_{\text{кн1-н2}}$ %, следующие:

$$x_{\text{в}} = 0,125 U_{\text{к в-н}} S_{\text{б}} / (100 S_{\text{тр.ном}}) = 0,125 \cdot 10,4 \cdot 3000 / (100 \cdot 40) = 0,975;$$

$$x_{\text{н1}} = x_{\text{н2}} = 1,75 U_{\text{к в-н}} S_{\text{б}} / (100 S_{\text{тр.ном}}) = 1,75 \cdot 10,4 \cdot 3000 / (100 \cdot 40) = 13,65.$$

Мощность КЗ на одной из секций шин напряжением 10 кВ

$$S_{\text{кв}} = 3000 / (1 + 0,975 + 13,65) = 192 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Ограничение мощности КЗ в обоих вариантах реконструкции подстанции глубокого ввода практически одинаковое, поскольку при использовании реактора она уменьшается на 41,6 %, а при установке трансформатора с расщепленной обмоткой – на 43,7 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила устройств электроустановок. – 6 изд. – М.: Атомиздат, 1985, 1999.
2. ГОСТ 27514-87. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ. – М.: Издательство стандартов, 1989.
3. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей. – М.: Энергия, 1977.
4. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. – М.: Энергия, 1970.
5. Ульянов С.А. Сборник задач по электромагнитным переходным процессам. – М.: Энергия, 1968.
6. Силюк С.М., Свита Л.М. Электромагнитные переходные процессы: Учебное пособие для ВУЗов. – Мн.: Технопринт, 2000.
7. Рекомендации по расчету сопротивлений цепи фаза-нуль. Приложение 1 к руководящему материалу А05-32/85. – М., 1988.
8. Семчинов А.М. Токопроводы промышленных предприятий. – Л.: Энергоиздат, 1982.
9. Руководящие указания по расчету коротких замыканий и проверке аппаратов и проводников по условиям короткого замыкания. – Изд. МЭИ, 1980.
10. Голубев М.Л. Расчет токов короткого замыкания в электрических сетях 0,4-35 кВ. – М.: Энергия, 1980.
11. Бойченко А.И., Дзекцер Н.Н. Контактные соединения токоведущих шин. – Л.: Энергия, 1978.
12. Карпов Ф.Ф., Козлов В.Н. Справочник по расчету проводов и кабелей. – 3-е изд. – М.: Энергия, 1969.
13. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110-750 кВ. Руководящие указания по релейной защите. Выпуск 11. – М.: Энергия, 1979.
14. Евминов Л.И. Короткие и простые замыкания в распределительных сетях. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2002.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Таблица П1.1

Провода стальные

Номинальное сечение, мм ²	Действительное сечение, мм ²	Расчетный диаметр d_p , мм
Провода стальные марки ПСО		
7,1	7,1	3
9,6	9,6	3,5
12,6	12,6	4
19,6	19,6	5
Провода стальные многопроволочные марок ПС и ПМС		
25	24,6	5,6
35	37,2	7,8
50	49,8	9,2
70	78,9	11,5
95	94,0	12,6

Приложение 2

Таблица П2.1

Провода медные марки М

Номинальное сечение, мм ²	Действительное сечение, мм ²	Расчетный диаметр d_p , мм	Сопротивление постоянному току при +20 °С, Ом/км
4	3,94	2,2	4,52
6	5,85	2,7	3,03
10	8,9	3,6	1,79
16	15,9	5,1	1,13
25	24,9	6,4	0,72
35	34,61	7,5	0,515
50	44	0	0,361
70	67,7	10,7	0,267
95	94,0	12,6	0,191
120	117,0	14,0	0,154
150	148,0	15,8	0,122
175	183,0	17,6	0,099
240	234,0	19	0,077

Таблица П2.2

Провода алюминиевые марок А и АКП

Номинальное сечение, мм ²	Действительное сечение, мм ²	Расчетный диаметр др, мм	Сопротивление постоянному току при +20 °С, Ом/км
1,0			32,5
1,5			21,7
2,5			13,0
4			8,13
6			5,42
10			3,25
16	15,9	5,1	1,8376
25	24,9	6,4	1,165
35	34,3	7,5	0,8502
50	45	0	0,588
70	62	10,7	0,4204
95	92,4	12,3	0,3147
120	117,0	14,0	0,251
150	148,0	15,8	0,1978
185	183,0	17,5	0,1611
240	239	20,0	0,123
300	238,3	22,1	0,1017

Таблица П2.3

Провода сталеалюминиевые марок АС, АСКС, АСКП, АСК

Номинальное сечение, мм ²	Действительное сечение, мм ²		Расчетный диаметр др, мм	Сопротивление постоянному току при +20 °С, Ом/км
	алюминия	стали		
10/1,8	10,6	1,77	4,5	2,695
16/2,7	16,1	2,69	5,6	1,772
25/4,2	24,9	4,15	6,9	1,146
35/6,2	36,9	6,15	8,4	0,773
50/8,0	48,2	8,04	9,6	0,592
70/11	68,0	11,3	11,4	0,420
70/12	68,4	12,2	15,4	0,420
95/16	95,4	15,9	13,5	0,299
95/15	91,7	15,0	13,5	0,314
95/14	91,2	14,1	19,8	0,316
120/19	118	18,8	15,2	0,245
120/27	116	26,6	15,5	0,249
150/19	148	18,8	16,8	0,195
150/24	149	24,2	17,1	0,194
150/34	147	34,3	17,5	0,196
185/24	187	24,2	18,9	0,154
185/29	181	29,0	18,8	0,159
185/128	187	128,0	23,1	0,155
205/27	205	26,6	19,8	0,14

Таблица П2.4

Средние значения сопротивлений стальных проводов

Марка провода	Сопротивление, Ом/км	
	активное	внутреннее индуктивное
ПС-95	1,7	0,2
ПС-70	2,1	0,5
ПС-50	3,4	0,8
ПС-35	4,5	1,2
ПС-25	6,2	1,4
ПСО-5	11,0	5,6
ПСО-4	13,0	5,6
ПРО-3,5	17,0	5,6

Приложение 3

Таблица П3.1

Сопротивление стальных полос

Размер, мм	Сопротивление, Ом/км											
	Плотность тока, А/мм ²											
	0,5			1,0			1,5			2,0		
	Rw	X'	Z	Rw	X'	Z	Rw	X'	Z	Rw	X'	Z
20*4	5,24	3,14	6,1	4,2	2,52	4,9	3,48	2,09	4,05	2,97	1,78	3,46
30*4	3,66	2,2	4,25	2,91	1,75	3,39	2,38	1,43	2,78	2,04	1,22	2,38
30*5	3,38	2,03	3,94	2,56	1,54	2,99	2,08	1,25	2,42	--	--	--
40*3	3,05	1,83	3,56	2,54	1,52	2,96	2,12	1,27	2,48	1,81	1,08	2,11
40*4	2,8	1,68	3,26	2,24	1,34	2,61	1,81	1,09	2,11	1,54	0,92	1,8
50*4	2,28	1,37	2,66	1,79	1,07	2,09	1,45	0,87	1,69	1,24	0,74	1,45
50*5	2,1	1,26	2,45	1,6	0,96	1,87	1,28	0,77	1,49	--	--	--
60*4	1,91	1,15	2,22	1,5	0,9	1,75	1,22	0,73	1,42	1,04	0,62	1,22
60*5	1,77	1,06	2,06	1,34	0,8	1,56	1,08	0,65	1,26	--	--	--
80*5	1,34	0,81	1,56	1,04	0,62	1,22	0,82	0,49	0,96	--	--	--
80*6	1,26	0,76	1,47	0,91	0,55	1,06	0,75	0,45	0,87	--	--	--
100*6	1,02	0,61	1,19	0,73	0,44	0,85	0,6	0,36	0,7	--	--	--
100*8	0,9	0,54	1,05	0,62	0,37	0,72	--	--	--	--	--	--

Приложение 4

Таблица П4.1

Сопротивление круглых стальных проводников

Диам., мм	Площадь сеч., мм ²	Сопротивление, Ом/км								
		Плотность тока, А/мм ²								
		0,5			1,0			2,0		
		Rw	X`	Z	Rw	X`	Z	Rw	X`	Z
5	20	17,0	10,2	18	14,4	8,6	16,75	10,7	6,40	12,5
6	28	13,7	8,2	16,0	11,2	6,7	13,1	8,0	4,80	3
8	50	6	5,75	11,2	7,5	4,5	8,74	5,3	3,2	6,2
10	79	7,2	4,32	8,4	5,4	3,2	6,3	--	--	--
12	113	5,6	3,36	6,54	4,0	2,4	4,66	--	--	--
14	154	4,56	2,73	5,3	3,2	1,92	3,7	--	--	--
16	201	3,72	2,23	4,34	2,7	1,6	3,1	--	--	--
18	256	3,18	1,91	3,71	--	--	--	--	--	--
20	314	2,68	1,61	3,12	--	--	--	--	--	--

Таблица П4.2

Сопротивление профильной стали

Размер, мм	Сопротивление, Ом/км											
	100 А			200 А			400 А			600 А		
	Rw	X`	Z	Rw	X`	Z	Rw	X`	Z	Rw	X`	Z
Угловая												
40*40*4	1,60	1,04	1,91	1,50	0,92	1,76	1,12	0,7	1,32	0,92	0,59	
45*45*4	1,46	0,86	1,69	1,32	0,78	1,53	1,0	0,56	1,15	0,86	0,47	
50*50*5	1,42	0,68	1,57	1,27	0,68	1,43	0,98	0,54	1,1	0,78	0,44	
63*63*5	0,68	0,38	0,78	0,92	0,56	1,07	0,8	0,46	0,9	0,66	0,36	
Двутавровая												
N 12	0,34	0,16	0,38	0,57	0,32	0,65	0,53	0,29	0,58	0,44	0,24	0,5
N 18	0,21	0,09	0,25	0,35	0,18	0,39	0,45	0,29	0,54	0,33	0,24	0,45

Таблица П4.3

Сопротивление стальных электросварных труб

Размер, мм	Площ. сеч., мм ²	Сопротивление, Ом/км								
		Плотность тока, А/мм ²								
		1,0			2,0			3,0		
		Rw	X`	Z	Rw	X`	Z	Rw	X`	Z
20*1,6	92,5	3,38	2,03	3,94	2,42	1,45	2,82	2,14	1,29	2,52
26*1,8	136	2,47	1,48	2,88	1,73	1,04	2,01	1,64	0,98	1,91
22*2	170,5	1,99	1,19	2,32	1,40	0,84	1,63	--	--	--
47*2	282,6	1,30	0,78	1,51	0,95	0,57	1,10	--	--	--
69*2	358	1,02	0,62	1,19	0,75	0,45	0,87	--	--	--

Таблица П4.4

Сопротивление водогазопроводных труб

Условный проход, мм	Площадь сеч., мм ²	Сопротивление, Ом/км								
		Плотность тока, А/мм ²								
		0,5			1,0			1,5		
		Rw	X'	Z	Rw	X'	Z	Rw	X'	Z
ЦМ15	160	3,41	2,05	3,98	2,55	1,53	2,97	2,06	1,24	2,40
ЦМ20	207	2,67	1,6	3,11	2,02	1,21	2,35	1,59	0,95	1,85
ЦМ25	309	2,02	1,2	2,36	1,45	0,87	1,69	1,14	0,68	1,33
ЦМ32	399	1,58	0,95	1,84	1,12	0,67	1,31	--	--	--
ЦМ40	489	1,32	0,78	1,54	0,93	0,56	1,08	--	--	--
ЦМ50	625	1,07	0,64	1,25	0,76	0,45	0,89	--	--	--
ЦМ70	845	0,84	0,5	0,95	0,59	0,35	0,69	--	--	--
ЦМ80	1120	0,67	0,4	0,78	0,48	0,29	0,56	--	--	--

Таблица П4.5

Активные и индуктивные сопротивления проводов и кабелей с алюминиевыми и медными жилами при номинальной нагрузке (U_н=1000В)

Сечение, мм ²	Сопротивление, Ом/км			
	Активное r		Индуктивное x	
	алюминий	медь	открыто	в трубах
1,5	22,2	13,35	--	0,11
2,5	13,3	8,0	--	0,09
4	8,35	5,0	0,33	0,10
6	5,55	3,33	0,32	0,09
10	3,33	2,0	0,31	0,07
16	2,08	1,25	0,29	0,07
25	1,33	0,80	0,27	0,07
35	0,95	0,57	0,26	0,06
50	0,67	0,4	0,25	0,06
70	0,48	0,29	0,24	0,06
95	0,35	0,21	0,23	0,06
120	0,28	0,17	0,22	0,06
150	0,22	0,13	0,21	0,06
185	0,18	0,11	0,21	0,06
240	--	0,08	0,20	--
300	0,12	0,12	0,19	0,06

Таблица П4.5

Активные сопротивления медных и алюминиевых проводов кабелей с резиновой и пластмассовой изоляцией

Сечение жилы, мм ²	Активное сопротивление жилы, Ом/км	
	алюминиевой	медной
1,0	--	21,8
1,2	--	18,9
1,5	--	14,5
2	18,4	10,94
2,5	14,75	8,73
3	12,3	7,28
4	9,2	5,47
5	7,38	4,37
6	6,15	3,64
8	4,6	2,74
10	3,68	2,17
16	2,30	1,37
25	1,47	0,873
35	1,05	0,625
50	0,74	0,436
70	0,527	0,313
95	0,388	0,23
120	0,308	0,181
150	0,246	0,146
185	0,20	0,122
240	0,153	0,09

Таблица П4.6

Сопротивление трехжильных кабелей с поясной изоляцией

Сечение, мм ²	Активное сопротивление жилы при 20 °С, Ом/км		Активное сопротивление жилы при 80 °С, Ом/км	
	алюминия	меди	алюминия	меди
1,0	--	--	--	23,0
1,5	20,6	12,3	--	15,3
2,5	12,4	7,35	15,5	9,18
4	7,75	4,6	9,6	5,75
6	5,17	3,07	6,46	3,83
10	3,1	1,84	3,87	2,28
16	1,94	1,15	2,42	1,44
25	1,24	0,74	1,55	0,918
35	0,89	0,52	1,11	0,657
50	0,62	0,37	0,775	0,458
70	0,443	0,26	0,555	0,329
95	0,326	0,194	0,408	0,242
120	0,258	0,153	0,324	0,191
150	0,206	0,122	0,258	0,154
85	0,167	0,099	0,21	0,124
240	0,129	0,077	0,16	0,095
300	0,103	0,061	--	--

Таблица П4.7

Индуктивное сопротивление кабелей, Ом/км

Сечение, мм ²	Напряжение, кВ			
	6	10	20	35
10	0,11	0,122		
16	0,102	0,113		--
25	0,091	0,099	0,135	0,137
35	0,087	0,095	0,129	0,126
50	0,083	0,09	0,119	0,12
70	0,08	0,086	0,116	0,116
95	0,078	0,083	0,11	0,113
120	0,076	0,08	0,107	--
150	0,074	0,079	0,104	
185	0,079	0,077	0,101	
240	0,071	0,075	--	

Таблица П4.8

Полное сопротивление цепи фаза-ноль четырехжильных кабелей
в пластмассовой оболочке

Сечение жил кабеля, мм ²	Сопротивление, Ом/км					
	Материал жилы					
	алюминий			медь		
	Р фазы	Р нуля	Z	Р фазы	Р нуля	Z
4*2,5	14,75	14,75	29,5	8,73	8,73	17,4
3*4+1*2,5	9,2	14,75	23,9	5,47	8,73	14,2
4*4	9,2	9,2	18,4	5,47	5,47	10,9
3*6+1*4	6,15	9,2	15,3	3,64	5,47	9,11
4*6	6,15	6,15	12,3	3,64	3,64	7,28
3*10+1*6	3,68	6,15	9,83	2,17	3,64	5,81
4*10	3,68	3,68	7,36	2,17	2,17	4,34
3*16+1*10	2,3	3,68	5,98	1,37	2,17	3,54
4*16	2,3	2,3	4,6	1,37	1,37	2,74
3*25+1*16	1,47	2,3	3,77	0,87	1,37	2,24
4*25	1,47	1,47	2,94	0,87	0,87	2,74
3*35+1*16	1,05	2,3	3,36	0,63	1,37	1,99
4*35	1,05	1,05	2,1	0,62	0,62	1,25
3*50+1*25	0,74	1,47	2,21	0,43	0,87	1,3
4*50	0,74	0,74	1,48	0,43	0,44	0,87
3*70+1*25	0,527	0,74	1,99	0,31	0,87	1,18
3*70+1*35	0,527	1,5	1,57	0,31	0,62	0,94
4*70	0,527	0,527	1,05	0,31	0,31	0,62
3*95+1*35	0,388	1,06	1,44	0,23	0,62	0,85
3*95+1*50	0,388	0,74	1,13	0,23	0,436	0,66
4*95	0,388	0,388	0,77	0,23	0,23	0,46
3*120+1*35	0,308	1,05	1,36	0,18	0,625	0,8
3*120+1*70	0,308	0,527	0,83	0,18	0,313	1,49
4*120	0,308	0,308	0,62	0,18	0,181	0,36
3*150+1*50	0,246	0,74	0,98	0,14	0,436	0,58
4*150	0,246	0,246	0,49	0,14	0,146	0,29
3*185+1*50	0,2	0,74	0,94	0,12	0,436	0,55
4*185	0,2	0,2	0,4	0,12	0,122	0,24
4*240	0,153	0,153	0,3	0,09	0,09	0,18

Таблица П4.9

**Сопrotивление цепи фаза-нуль для трехжильных кабелей при использовании
алюминиевой оболочки в качестве нулевого проводника**

Сечение жил кабеля, мм ²	Сопrotивление, Ом/км					
	Материал жилы					
	алюминий			медь		
	Р фазы	Р нуля	Z	Р фазы	Р нуля	Z
3*6	6,46	1,045	7,50	3,83	0,985	4,815
3*10	3,87	1,038	4,71	2,28	0,876	3,156
3*16	2,42	0,775	3,2	1,44	0,748	2,188
3*25	1,55	0,691	2,24	0,92	0,679	1,597
3*35	1,11	0,616	1,73	0,697	0,610	1,267
3*50	0,775	0,498	1,279	0,558	0,492	0,952
3*70	0,555	0,410	0,97	0,33	0,405	0,734
3*95	0,408	0,321	0,73	0,24	0,357	0,609
3*120	0,324	0,328	0,65	0,19	0,325	0,516
3*150	0,258	0,268	0,53	0,16	0,264	0,418
3*185	0,21	0,241	0,45	0,12	0,239	0,363
3*240	0,160	0,215	0,38	0,10	0,212	0,307

Таблица П4.10

**Полное сопротивление цепи фаза-нуль для четырехжильных кабелей
с учетом проводимости алюминиевой оболочки**

Сечение жил кабеля, мм ²	Сопrotивление, Ом/км					
	Материал жилы					
	алюминий			медь		
	Р фазы	Р нуля	Z	Р фазы	Р нуля	Z
3*6+1*4	6,46	0,867	7,33	3,83	0,762	4,592
3*10+1*6	3,87	0,738	4,61	2,28	0,665	2,945
3*16+1*10	2,42	0,564	2,98	1,44	0,489	1,929
3*25+1*16	1,55	0,477	2,03	0,92	0,412	1,33
3*35+1*16	1,11	0,405	1,52	0,70	0,357	1,014
3*50+1*25	0,775	0,320	1,09	0,46	0,275	0,733
3*70+1*25	0,555	0,282	0,84	0,33	0,247	0,576
3*95+1*35	0,408	0,253	0,66	0,24	0,217	0,459
3*120+1*350	0,324	0,237	0,56	0,19	0,202	0,393
3*150+1*350	0,258	0,193	0,45	0,15	0,166	0,32
3*185+1*500	0,21		0,39	0,12	0,155	0,279

Таблица П4.11

**Полное сопротивление цепи фаза трехжильного кабеля
с алюминиевыми жилами – обрамление кабельного канала
из угловой стали 50*50*5**

Сечение жил кабеля, мм ²	Сопротивление, Ом/км							
	Ток ОКЗ, А							
	100	200	300	500	600	700	1000	2500
3*6	7,46	7,37	7,26	7,11	--	--	--	--
3*10	4,87	4,78	4,67	4,52	4,49	--	--	--
3*16	3,43	3,34	3,23	3,08	3,05	3,02	2,09	--
3*25	2,57	2,48	2,37	2,18	2,19	2,16	2,13	--
3*35	2,15	2,06	1,91	1,5	1,77	1,74	1,71	1,67
3*50	1,85	1,76	1,65	1,31	1,47	1,44	1,41	1,37
3*70	1,66	1,57	1,46	1,2	1,28	1,25	1,22	1,18
3*95	1,55	1,46	1,35	1,15	1,17	1,14	1,11	1,07
3*120	1,5	1,41	1,3	1,11	1,12	1,09	1,06	1,02
3*150	1,46	1,37	1,26	1,09	1,08	1,05	1,02	0,98
3*185	1,44	1,35	1,24	1,07	1,06	1,03	1,00	0,96
3*240	1,42	1,33	1,22		1,04	1,01	0,98	0,94

Таблица П4.12

**Полное сопротивление цепи фазная жила кабеля
с алюминиевыми жилами – металлоконструкции из угловой стали**

Сечение кабеля, мм ²	Расстояние между кабелем и фермой, м	Сопротивление, Ом/км							
		Размеры угловой стали, мм							
		2(75*75*8)			2(100*100*8)		2(100*100*10)		
		Ток ОКЗ, А							
		100	500	1000	2500	200	500	1000	2500
3*6	0,2	7,06	6,9	--	--	6,9	6,81	--	--
	2	7,09	6,93	--	--	6,93	6,84	--	--
3*10	0,2	4,49	4,32	--	--	4,32	4,23	--	--
	2	4,54	4,37	--	--	4,37	4,28	--	--
3*16	0,2	2,95	2,89	--	--	2,88	2,79	--	--
	2	3,04	2,97	--	--	2,95	2,86	--	--
3*25	0,2	2,2	2,03	1,92	2,02	1,93	1,84		
	2	2,31	2,13	2,03	2,12	2,03	1,94		
3*35	0,2	1,78	1,6	1,50	1,6	1,51	1,42		
	2	1,91	1,73	1,63	1,72	1,63	1,54		
3*50	0,2	1,48	1,3	1,19	1,29	1,2	1,1		
	2	1,63	1,45	1,35	1,44	1,35	1,26		
3*70	0,2	1,28	1,1	0,99	1,09	1,00	0,9		
	2	1,45	1,27	1,17	1,26	1,17	1,08		
3*95	0,2	1,12	1,01	0,87	0,95	0,87	0,78		
	2	1,31	1,17	1,06	1,15	1,06	0,98		
3*120	0,2	1,07	0,9	0,79	0,89	0,79	0,7		
	2	1,27	1,1	1,0	1,09	1,0	0,91		
3*150	0,2	1,02	0,84	0,74	0,82	0,74	0,65		
	2	1,22	1,05	0,96	1,04	0,95	0,87		
3*185	0,2	0,98	0,8	0,7	0,79	0,7	0,61		
	2	1,19	1,02	0,92	1,01	0,92	0,84		
3*240	0,2	0,93	0,76	0,66	0,75	0,65	0,57		
	2	1,15	0,98	0,89	0,97	0,89	0,81		

Таблица П4.13

**Полное расчетное сопротивление цепи фазы трехжильного кабеля
с алюминиевыми жилами – двутавровая балка**

Сечение кабеля, мм ²	Расстояние между ка- белем и фермой, м	Сопротивление, Ом/км								
		Размеры балки, мм								
		120*75*5			120*64*4.8			450*160*8.6		600*190*11.1
		Ток ОКЗ, А								
		100	200 300	600 800	1200 1500	300	400 500	1000 3000	400	700 3000
3*6	1	6,91		--	--	6,70	--	--	6,62	--
	5	6,93		--	--	6,73	--	--	6,64	--
3*10	1	4,34		4,48	--	4,13	4,19	--	4,04	--
	5	4,39		4,52	--	4,16	4,22	--	4,07	--
3*16	1	2,92		3,06	--	2,69	2,75	--	2,59	2,67
	5	2,98		3,12	--	2,75	2,81	--	2,64	2,72
3*25	1	2,09		2,23	--	1,86	1,91	1,87	1,74	1,82
	5	2,17		2,32	--	1,93	1,99	1,95	1,81	1,89
3*35	1	1,68		1,82	--	1,43	1,49	1,45	1,32	1,41
	5	1,79		1,93	--	1,53	1,59	1,55	1,41	1,5
3*50	1	1,39		1,53	--	1,14	1,2	1,16	1,01	1,11
	5	1,52		1,66	--	1,26	1,32	1,28	1,12	1,23
3*70	1	1,21		1,35	1,21	0,95	1,01	0,97	0,82	0,92
	5	1,35		1,49	1,35	1,09	1,15	1,11	0,95	1,06
3*95	1	1,1		1,24	1,1	0,84	0,90	0,86	0,7	0,81
	5	1,25		1,38	1,25	0,99	1,05	1,01	0,85	0,95
3*120	1	1,03		1,12	1,03	0,77	0,83	0,79	0,64	0,74
	5	1,19		1,31	1,19	0,93	1,00	0,96	0,8	0,9
3*150	1	0,98		1,12	0,98	0,72	0,79	0,75	0,58	0,69
	5	1,14		1,28	1,14	0,89	0,96	0,92	0,75	0,86
3*185	1	0,94		1,08	0,94	0,69	0,75	0,71	0,55	0,66
	5	1,11		1,24	1,11	0,86	0,93	0,89	0,73	0,83
3*240	1	0,91		1,04	0,91	0,65	0,72	0,68	0,52	0,62
	5	1,08		1,21	1,08	0,83	0,89	0,85	0,7	0,8

Таблица П4.14

**Допустимое сочетание стальных полос и трехжильных кабелей, при которых
проводимость полосы составляет 50 % проводимости фазной жилы.
Расстояние между кабелем и полосой 0,2-0,8 м**

Сечение фазной жилы кабеля, мм ²	Ток ОКЗ, А								
	100	200	300	400	600	800	1500	2500	
	Размеры полосы, мм								
6	25*3	25*3	25*3	25*3	25*3	--	--	--	
10	25*3	25*3	25*3	25*3	25*3	25*3	--	--	
16	25*3	25*3	25*3	25*3	25*3	25*3	25*3	--	
25	40*4	40*4	40*4	40*4	40*4	40*4	25*3	--	
35	60*4	40*4	40*4	40*4	40*4	40*4	40*4	--	
50	80*4	80*4	60*4	60*4	60*4	60*4	40*4	40*4	
70	--	--	--	80*4	60*4	60*4	60*4	60*4	
95	--	--	--	--	80*4	80*4	80*4	80*4	
120	--	--	--	--	80*4	80*4	80*4	80*4	
150	--	--	--	--	--	80*4	80*4	80*4	
185	--	--	--	--	--	80*4	80*4	80*4	
240	--	--	--	--	--	--	--	80*4	

Таблица П4.15

**Полное сопротивление цепи фаза трехжильного алюминиевого кабеля
с резиновой или пластмассовой изоляцией – стальная полоса**

Сеч. каб., мм ²	Расст. между по- лосой и каб., м	Полное сопротивление цепи Zп, Ом/км, при токах													
		100	200, 300	1500	100	200	300, 400	2500	100	200	300	600, 3000	200	400	600, 3000
		для размера полосы, мм													
		25x3			40x4			60x4			80x4				
3x6	0,2	11,22	10,13		9,53	8,77	8,34		8,76	8,33	8,03		9,06	7,66	
	0,8	11,22	10,17		9,57	8,80	8,37		8,80	8,37	8,06		9,08	7,69	
3x10	0,2	8,71	7,64	6,80	7,03	6,24	5,80		6,24	5,80	5,49	5,09	5,60	5,12	
	0,8	8,77	7,70	6,85	7,08	6,29	5,85		6,29	5,84	5,53	5,13	5,64	5,16	
3x16	0,2	7,35	6,27	5,42	5,65	4,86	4,41	3,96	4,85	4,40	4,08	3,67	4,12	3,69	3,45
	0,8	7,43	6,34	5,48	5,72	4,92	4,47	4,02	4,91	4,46	4,14	3,73	4,18	3,74	3,50
3x25	0,2	6,50	5,47	4,62	4,85	4,04	3,59	3,14	4,04	3,58	3,26	2,84	3,29	2,86	2,61
	0,8	6,64	5,55	4,69	4,93	4,12	3,66	3,21	4,11	3,65	3,33	2,91	3,36	2,93	2,68
3x35	0,2	6,16	5,07	4,22	4,45	3,64	3,18	2,73	3,63	3,17	2,85	2,43	2,89	2,45	2,20
	0,8	6,25	4,17	4,30	4,53	3,73	3,27	2,81	3,71	3,26	2,93	2,51	2,96	2,53	2,28
3x50	0,2	5,87	4,78	3,92	4,15	3,34	2,89	2,43	3,34	2,87	2,55	2,13	2,58	2,15	1,9
	0,8	5,96	4,87	4,0	4,24	3,44	2,98	2,52	3,42	2,97	2,64	2,23	2,67	2,24	1,99
3x70	0,2	5,67	4,64	3,73	3,96	3,15	2,69	2,24	3,14	2,68	2,36	1,94	2,39	1,95	1,71
	0,8	5,77	4,68	3,82	4,05	3,25	2,79	2,34	3,23	2,78	2,46	2,04	2,48	2,05	1,80
3x95	0,2	5,55	4,46	3,61	3,83	3,02	2,57	2,12	3,02	2,55	2,23	1,81	2,27	1,83	1,58
	0,8	5,64	4,56	3,69	3,43	3,12	2,67	2,22	3,11	2,66	2,33	1,92	2,36	1,93	1,68
3x120	0,2	5,47	4,38	3,53	3,75	2,95	2,49	2,04	2,94	2,48	2,16	1,74	2,19	1,75	1,51
	0,8	5,57	4,48	3,62	3,85	3,05	2,60	2,15	3,04	2,58	2,26	1,84	2,29	1,86	1,60
3x150	0,2	5,41	4,32	3,47	3,69	2,88	2,43	1,98	2,88	2,42	2,10	1,68	2,13	1,70	1,47
	0,8	5,51	4,42	3,57	3,80	2,99	2,54	2,09	2,98	2,53	2,21	1,72	2,23	1,80	1,56
3x185	0,2	5,36	4,28	3,42	3,65	2,84	2,39	1,94	2,84	2,37	2,05	1,64	2,09	1,65	1,41
	0,8	5,46	4,38	3,52	3,75	2,95	2,5	2,05	2,93	2,48	2,16	1,75	2,19	1,76	1,52
3x240	0,2	5,32	4,23	3,38	3,60	2,80	2,35	1,90	2,79	2,33	2,01	1,59	2,04	1,61	1,36
	0,9	5,42	4,33	3,48	3,71	2,91	2,45	2,01	2,89	2,44	2,12	1,71	2,15	1,72	1,48

Таблица П4.16

**Полное сопротивление цепи фаза-алюминиевая оболочка трехжильных кабелей
с бумажной изоляцией**

Число и сечение жил, мм ²	Полное сопротивление Zп, Ом/км, для кабелей			
	медных АГ, АБ	алюмин. ААГ, ААБ	медных АШв	алюмин. ААШв
3*6	5,02	7,71	4,98	7,67
3*10	3,33	4,95	3,31	4,92
3*16	2,35	3,36	2,31	3,33
3*25	1,81	2,46	1,79	2,44
3*35	1,39	1,85	1,37	1,83
3*50	1,09	1,42	1,07	1,40
3*70	0,84	1,07	0,83	1,06
3*95	0,67	0,84	0,66	0,83
3*120	0,57	0,71	0,56	0,70
3*150	0,42	0,53	0,44	0,54
3*185	0,36	0,45	0,36	0,45
3*240	0,31	0,37	0,29	0,36

Таблица П4.17

**Полное сопротивление цепи фаза-ноль с учетом алюминиевой оболочки
четырёхжильных кабелей с бумажной изоляцией, Ом/км**

Число и сечение жил, мм ²	Полное сопротивление Z_p для кабелей	
	медных АГ, АБ	алюминиев. ААГ, ААБ
3*6+1*4	4,74	7,79
3*10+1*6	3,06	4,73
3*16+1*10	2,01	3,08
3*25+1*16	1,38	2,10
3*35+1*16	1,06	1,57
3*50+1*25	0,78	1,16
3*70+1*25	0,61	0,87
3*95+1*25	0,48	0,69
3*120+1*35	0,41	0,58
3*150+1*50	0,31	0,45
3*185+1*50	0,27	0,37

Таблица П4.18

**Сочетания стальных полос и трехжильных кабелей
с алюминиевыми жилами, обеспечивающие проводимость полосы около 50 %
проводимости фазной жилы**

Сечение фазы, мм ²	Размер полосы (ширина*толщина), мм при токах однофазного КЗ, А							
	100	200	300	400	600	800	1500	3000
6	25*3	25*3	25*3	25*3	25*3	--	--	--
10	25*3	25*3	25*3	25*3	25*3	25*3	--	--
16	25*3	25*3	25*3	25*3	25*3	25*3	25*3	--
25	40*4	40*4	40*4	40*4	40*4	40*4	25*3	--
35	60*4	60*4	40*4	40*4	40*4	40*4	40*4	40*4
50	80*4	80*4	60*4	60*4	60*4	60*4	40*4	60*4
70	--	--	--	80*4	60*4	60*4	60*4	80*4
95	--	--	--	--	80*4	80*4	80*4	80*4
120	--	--	--	--	80*4	80*4	80*4	80*4
150	--	--	--	--	--	80*4	80*4	80*4
185	--	--	--	--	--	80*4	80*4	80*4
240	--	--	--	--	--	--	--	80*4

Таблица П4.19

Расчетные сопротивления цепи фазный алюминиевый провод – стальная труба

Условный проход трубы		Три одно- жильных провода	Сопротивление, Ом/км					Расчет- ный ток ОКЗ, А
мм ²	дюйм		фазного провода r	трубы Rw	rφ+Rw	X ^{тр} =0, 6*Rw	Zu	
15	½	2,5	15	4,04	19,04	2,42	19,2	50
20	¾		15	3,1	18,1	1,88	18,25	
15	½	4	9,36	3,1	12,46	1,86	12,6	
20	¾		9,36	2,68	12,04	1,6	12,15	100
15	½	6	6,25	2,6	8,85	1,56	8,9	
20	¾		6,25	2,3	8,55	1,38	8,64	150
20	¾	10	3,74	2,3	6,04	1,38	6,15	150
25	1	16	2,34	1,5	3,84	0,90	3,94	300
25	1	25	1,5	1,15	2,65	0,69	2,74	
40	1 ½	35	1,07	1,05	2,12	0,63	2,2	400
40	1 ½	50	0,75	1,05	1,8	0,63	1,9	
50	2	70	0,536	0,85	1,386	0,51	1,48	500
70	2 ½	95	0,395	0,54	0,935	0,32	0,986	
70	2 ½	120	0,313	0,54	0,853	0,32	0,915	800
70	2 ½	150	0,25	0,50	0,75	0,30	0,81	
80	3	150	0,25	0,45	0,70	0,27	0,75	1000
80	3	180	0,203	0,45	0,653	0,27	0,7	

Таблица П4.20

Полное сопротивление цепи фаза-ноль алюминиевого четырехжильного кабеля без металлической оболочки и четырехпроводной линии с алюминиевыми проводами, расположенными пучком

Сечение фазного провода, мм ²	Полное сопротивление Zп для сечения нулевого провода, мм*мм										
	2,5	4	6	10	16	25	35	50	70	95	120
2,5	29,64	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
4	24,08	18,52	--	--	--	--	--	--	--	--	--
6	--	15,43	12,34	9,88	--	--	--	--	--	--	--
10	--	--	9,88	7,41	5,92	--	--	--	--	--	--
16	--	--	--	5,92	4,43	3,7	3,35	--	--	--	--
25	--	--	--	5,19	3,7	2,96	2,54	2,22	--	--	--
35	--	--	--	4,77	3,35	2,54	2,12	1,8	1,59	--	--
50	--	--	--	--	3,06	2,22	1,8	1,48	1,27	1,13	--
70	--	--	--	--	--	2,02	1,59	1,27	1,06	0,92	--
95	--	--	--	--	--	--	1,45	1,13	0,92	0,78	--
120	--	--	--	--	--	--	1,37	1,05	0,84	0,7	0,62
150	--	--	--	--	--	--	--	0,99	0,82	0,67	0,52
240	--	--	--	--	--	--	--	0,95	0,53	0,59	0,51

Таблица П4.21

**Полное сопротивление цепи фаза-нуль четырехпроводной ВЛ со стальными
многопроволочными проводами**

Ток, А	Полное сопротивление Z_p , Ом/км, для проводов											
	Фазных											
	ПС-25 ПМС-25		ПС-35 ПМС-35		ПС-50 ПМС-50		ПС-70 ПМС-70		ПМС-95 ПС-95			
	Нулевых											
	ПС-25 ПМС-25	ПС-25 ПМС-25	ПС-35 ПМС-35	ПС-25 ПМС-25	ПС-35 ПМС-35	ПС-50 ПМС-50	ПС-35 ПМС-35	ПС-50 ПМС-50	ПС-70 ПМС-70	ПС-50 ПМС-50	ПС-70 ПМС-70	ПС-95 ПМС-95
60	17,38	15,82	14,25	--	--	--	--	--	--	--	--	--
90	16,52	14,96	13,41	13,08	11,53	9,64	--	--	--	--	--	--
120	15,75	14,22	12,69	12,57	11,04	9,41	9,46	7,85	6,27	7,13	5,54	4,82
150	15,15	13,68	12,21	12,13	10,69	9,1	9,23	7,69	6,29	6,97	5,56	4,84
200	13,28	11,98	11,65	10,82	9,52	8,4	8,23	7,1	5,82	6,63	5,34	4,87
300	12,02	10,83	9,64	9,78	8,6	7,55	7,51	6,47	6,04	4,97	4,97	4,52
400	--	10,47	9,33	9,36	8,34	7,11	7,13	6,03	4,98	5,68	4,62	4,27
600	--	--	--	--	--	--	6,89	5,64	4,49	5,34	4,18	3,88

Приложение 5

Таблица П5.1

Зависимость индуктивного сопротивления от расстояния между проводниками

Сечение, мм ²	X, Ом/км	
	d = 10 м	d = 20 м
4	1,16	1,24
6	1,12	1,21
10	1,06	1,15
16	1,03	1,12
25	1,05	1,1
35	0,975	1,06
50	0,95	1,05
70	0,94	1,02
95	0,92	1,1
120	0,90	1,0

Таблица П5.2

**Полное сопротивление цепи фаза-нуль четырехпроводной ВЛ
с алюминиевыми проводами**

Фазный провод	Расстояние фаза-нуль, м	Полное сопротивление, Ом/км, при нулевом проводе						
		A-16	A-25	A-35	A-50	A-70	A-95	A-120
A-16	0,4	4,86	--	--	--	--	--	--
	1	4,87	--	--	--	--	--	--
	2	4,88	--	--	--	--	--	--
A-25	0,4	4,01	3,18	2,76	2,43	--	--	--
	1	4,04	3,21	2,79	2,46	--	--	--
	2	4,05	3,23	2,81	2,49	--	--	--
A-35	0,4	3,59	2,76	2,53	2,01	1,78	--	--
	1	3,62	2,79	2,57	2,05	1,82	--	--
	2	3,63	2,81	2,59	2,08	1,86	--	--
A-50	0,4	3,25	2,43	2,01	1,69	1,47	1,35	--
	1	3,28	2,46	2,05	1,73	1,53	1,40	--
	2	3,30	2,49	2,08	1,77	1,58	1,45	--
A-70	0,4	--	2,21	1,78	1,47	1,28	1,15	1,08
	1	--	2,25	1,82	1,53	1,34	1,21	1,14
	2	--	2,28	1,86	1,58	1,39	1,27	1,2
A-95	0,4	--	2,07	1,66	1,35	1,15	1,02	0,95
	1	--	2,11	1,77	1,40	1,21	1,09	1,03
	2	--	2,14	1,75	1,45	1,27	1,15	1,09
A-120	0,4	--	--	1,58	1,27	1,08	0,95	0,85
	1	--	--	1,63	1,33	1,14	1,03	0,93
	2	--	--	1,67	1,38	1,20	1,09	1,0

Таблица П5.3

**Полное сопротивление цепи фаза-нуль четырехпроводной ВЛ
со стальными однопроволочными проводами**

Расчетный ток, А	Полное сопротивление Z_p , Ом/км, для проводов		
	фазных ПСО-4		фазных ПСО-5
	нулевого ПСО-4	нулевого ПСО-5	нулевого ПСО-5
30	40,86	38,13	35,42
40	38,17	35,71	33,26
50	37,03	34,18	31,34
100	36,3	32,24	28,02
150	36,06	31,61	27,64
200	35,94	31,26	26,56
300	--	30,78	25,61

Примечание. Сопротивления определены для расстояния фаза-нуль 0,4 м, при увеличении расстояния до 1 м прибавляется 0,04 Ом/км на каждые 0,2 м расстояния.

Приложение 6

Таблица П6.1

Активные и индуктивные сопротивления прямоугольных медных и алюминиевых шин

Размер, мм	Активное сопротивление при 65 °С, мОм/м		Индуктивное сопротивление мОм/м, при Dcp, мм			
	медь	алюминий	100	150	200	300
25*3	0,268	0,475	0,179	0,2	0,295	0,244
30*3	0,223	0,394	0,163	0,189	0,206	0,235
30*4	0,167	0,296	0,163	0,189	0,206	0,235
40*4	0,125	0,222	0,145	0,17	0,189	0,214
40*5	0,100	0,177	0,145	0,17	0,189	0,214
50*5	0,08	0,142	0,137	0,1565	0,18	0,2
50*6	0,067	0,118	0,137	0,1565	0,18	0,2
60*6	0,0558	0,099	0,119	0,145	0,163	0,189
60*8	0,0418	0,074	0,119	0,145	0,163	0,189
80*8	0,0318	0,055	0,102	0,126	0,145	0,17
80*10	0,025	0,0445	0,102	0,126	0,145	0,17
100*10	0,020	0,0355	0,09	0,1127	0,133	0,157
2(60*8)	0,0209	0,037	0,12	0,145	0,163	0,189
2(80*8)	0,0157	0,0277	--	0,145	0,17	0,17
2(80*10)	0,0125	0,0222	--	0,126	0,145	0,17
2(100*10)	0,01	0,0178	--	--	0,133	0,157

Таблица П6.2

Активные сопротивления плоских шин

Размер, мм	Сопротивление, Ом/км			
	Алюминиевые шины		Медные шины	
	постоянный ток	переменный ток	постоянный	переменный
25*3	0,476	0,485	0,288	0,305
30*4	0,297	0,312	0,181	0,203
40*4	0,222	0,245	0,136	0,16
40*5	0,178	0,2	0,108	0,13
50*5	0,143	0,162	0,087	0,106
50*6	0,118	0,138	0,0725	0,0905
60*6	0,099	0,118	0,0603	0,078
60*8	0,0742	0,0895	0,0454	0,0588
80*6	0,0742	0,0895	0,0454	0,0588
80*8	0,0558	0,069	0,034	0,0457
80*10	0,0446	0,057	0,0271	0,0374
100*6	0,0592	0,072	0,0362	0,0476
100*8	0,0446	0,0566	0,02710	0,0372
100*10	0,0357	0,0462	0,0194	0,0302
120*8	0,037	0,0476	0,0226	0,0314
120*10	0,0296	0,0384	0,0181	0,0253

Приложение 7

Таблица П7.1

Сопротивления шинопроводов

Тип шинопровода	Ном. ток, А	Конструкция нулевого токопровода	Сопротивление фазная шина-нуль, Ом/км					
			Активное r		Индуктивное X		Zφ	Z
			R фаза	R нуль	X фаза	X нуль		
ШМА59-НУ3	2500	Два опорн. алюм. уголка	0,032	0,07	0,084	0,046	--	0,165
ШМА59-НУ3	4000		0,017	0,17	0,084	0,046	--	0,16
ШМА68-НУ3	1600		0,034	0,11	0,023	0,212	--	0,27
ШМА68-НУ3	2500		0,02	0,07	0,02	0,046	--	0,111
ШМА68-НУ3	4000		0,013	0,07	0,015	0,046	--	0,12
ШМА16У3	1000	Боковые профили	0,059	--	0,009	--	0,059	0,125
ШМА16У3	1600		0,03	0,037	0,014	0,041	0,033	0,087
ШМА73У3	1600		0,031	0,041	0,0170	0,081	--	0,123
ШМА73ПУ3	1600		0,037	0,049	0,02	0,1	--	0,148
ШМА76У3	1000		0,058	0,037	0,05	0,091		0,096
ШРА73У3, ШРА73-ВУ3	250	Нулевая шина внутри кожуха	0,21	0,12	0,21	0,207	--	0,55
ШРА73У3	400		0,15	0,162	0,17	0,164	--	0,49
ШРА73У3	600		0,1	0,162	0,13	0,164	--	0,29
ШРПУ3	250		0,21	--	0,21	--	0,3	0,4
ШРПУ3	400		0,15	--	0,17	--	0,23	0,35
ШРПУ3	630		0,08	--	0,11	--	0,14	0,162
ШРМ-75У3	100		0,52	--	0,07	--	0,525	1,07
ШТМ-76У3	100		0,4	--	0,42	--	0,58	--
ШОС-73У3	100		0,52	--	0,07	--	0,525	1,07
ШОС-80У3	16		5,4	5,4	0,05	0,05	5,4	5,4
ШТА-75У3	250		Боковые планки с шинами	0,474	--	0,15	--	0,496
ШТА-75У3	400	0,217		--	0,17	--	0,254	--
ШТМ-73У3	250	0,315		--	0,18	--	0,36	--
ШТМ-73У3	400	0,197		--	0,12	--	0,23	--
ШМТ-АУ2, ШМТ-АОУ2	250		0,2	--	0,21	--	0,29	--

Таблица П7.2

Полное расчетное сопротивление цепи фаза-ноль открытых четырехпроводных шинопроводов, выполненных алюминиевыми шинами

Размеры фазных и нулевых шин, мм	Сопротивление, Ом/км	
	Расстояние между нулевой шиной и крайней фазной шиной, мм	
	200	750
30*4	0,79	0,9
30*5	0,69	0,81
40*4	0,66	0,78
40*5	0,59	0,72
50*4	0,57	0,7
50*5	0,52	0,66
60*5	0,47	0,61
60*6	0,44	0,59
80*6	0,39	0,54
80*8	0,36	0,52
100*6	0,34	0,5
100*8	0,33	0,48
100*10	0,32	0,48

Таблица П7.3

Полное расчетное сопротивление цепи трехпроводная открытая магистраль – металлоконструкция из угловой стали

Сечение магистрали, мм ²	Расстояние между фермой и наиболее удаленной фазной шиной, м	Сопротивление, Ом/км			
		Размеры фермы, мм			
		2(75*75*8)		2(100*100*8)	
		Ток ОКЗ, А			
		1000	1500 3000	1000	2000- 3000
3(40*4)	0,2	0,72	0,69	0,63	0,60
	2	0,93	0,91	0,85	0,82
3(50*5)	0,2	0,65	0,62	0,56	0,53
	2	0,88	0,85	0,80	0,77
3(60*6)	0,2	0,60	0,57	0,51	0,49
	2	0,84	0,81	0,76	0,74
3(80*6)	0,2	0,57	0,54	0,48	0,46
	2	0,81	0,79	0,73	0,71
3(100*6)	0,2	0,550	0,52	0,46	0,45
	2	0,79	0,77	0,71	0,69
3(100*8)	0,2	0,54	0,51	0,45	0,43
	2	0,78	0,76	0,70	0,68
3(100*10)	0,2	0,53	0,5	0,44	0,42
	2	0,78	0,75	0,70	0,68

Таблица П7.4

**Полное сопротивление цепи трехпроводная открытая магистраль –
подкрановая балка из двутавра**

Сечение магистральной, мм ²	Расстояние между фермой и наиболее удаленной фазной шиной, м	Сопротивление, Ом/км			
		Размеры фермы, мм			
		2(75*75*8)		2(100*100*8)	
		Ток ОКЗ, А			
		1000	1500 3000	1000	2000 3000
3(40*4)	1	0,71	0,68	0,66	0,63
	5	0,87	0,85	0,83	0,80
3(50*5)	1	0,64	0,62	0,60	0,57
	5	0,82	0,80	0,78	0,75
3(60*6)	1	0,61	0,58	0,57	0,54
	5	0,79	0,76	0,75	0,72
3(80*6)	1	0,58	0,55	0,54	0,51
	5	0,76	0,74	0,73	0,70
3(100*6)	1	0,56	0,53	0,52	0,49
	5	0,74	0,72	0,71	0,68
3(100*8)	1	0,55	0,53	0,51	0,48
	5	0,73	0,71	0,70	0,67
3(100*10)	1	0,54	0,52	0,50	0,48
	5	0,73	0,71	0,69	0,67

Приложение 8

Таблица П8.1

**Сопротивления катушек расцепителя и главных контактов автоматов
и рубильников, мОм**

Номинальный ток, А	Катушка расцепителей автоматов		Контакты	
	R при 65 °С	X при 65 °С	автоматы	рубильники
50	5,5	27	1,3	--
70	2,35	1,3	1,0	--
100	1,3	0,85	0,75	0,5
140	0,74	0,55	0,65	--
200	0,36	0,28	0,6	0,4
400	0,15	0,1	0,4	0,2
600	0,12	0,084	0,25	0,15
1000	0,1	0,08	0,12	0,08
1500-2500	0,06	0,05	0,05	0,04
Тип выключателя	Номинальный ток, А	Сопротивление полюса, мОм		
		активное r	индуктивное	
Э – 06	630	0,25	0,15	
Э – 10	1000	0,15	0,076	
Э – 16	1600	0,16	0,061	
Э – 25	2500	0,12	0,05	
Э – 40	4000	0,08	0,04	

Таблица П8.2

Сопровиления катушек расцепителей автоматов АЕ20, мОм

Номинальный ток, А	Активное сопротивление г	Индуктивное сопротивление Х
0,6	3,96	17,75
0,8	2,34	4,9
1,0	1,71	3,55
1,25	0,942	2,12
1,6	0,73	1,33
2,0	0,411	0,94
2,5	0,305	0,53
3,2	0,173	0,33
4,0	0,121	0,23
5,0	0,065	0,14
6,0	0,051	0,08
8,0	0,036	0,06
10	0,025	0,04
12,5	0,014	0,02
16	0,0085	0,018
20	0,007	0,017
25	0,005	0,01

Таблица П8.3

Сопровиление расцепителей и главных контактов автоматов, мОм

Тип автомата	Тип расцепителя	Номинальный ток, А	Сопровиление полюса	
			активное г	индуктивное Х
A3788	Полупроводниковый	250	0,12	0,078
A3794		400	0,12	0,077
		630	0,12	0,03
A3795	Тепловой	250	0,34	0,27
		320	0,335	0,275
A3796		400	0,25	0,235
		500	0,21	0,18
		630	0,155	0,1
BA51-35 BA52-37	Тепловой	250	0,35	0,11
BA52-39 BA52-35		400	0,172	0,104
BA53-37 BA53-39	Полупроводниковый	630	0,099	0,078
BA53-41		250	0,38	0,13
		400	0,1	0,102
		630	0,068	0,12
		1000	0,077	0,115

Таблица П8.4

Сопровствления главных контактов рубильников и переключателей, мОм

Тип аппарата	Номинальный ток, А	Активное сопротивление полюса
Р11	100	0,154
П11 РПЦ11 Р21 П21 Р31	100	0,186
Р16 Р19	250	0,132
П12 П22 Р22 П32 РПЦ32	250	0,161
РБ ПБ РПБ	400	0,037
ППБ РПЦ ППЦ	630	0,027
РЕ19	1000	0,035
	1600	0,03
	2500	0,014
	4000	0,007
	6300	0,006

Приложение 9

Таблица П9.1

Сопровствления первичных обмоток трансформаторов тока типа ТК, мОм

Номинальный ток, А	ТК-20		ТК-40	
	г	х	г	х
5	260	386	660	780
10	60,5	97	165	195
15	26,8	43	73	87
20	15,1	24,2	41	49
30	6,7	10,9	18,3	22
40	3,44	7,35	10,3	12
50	2,5	3,88	6,6	7,8
75	1,1	1,74	2,94	3,5
100	0,625	0,97	1,65	1,95
150	0,275	0,43	0,73	0,86
200	0,136	0,3	0,41	0,49
300	--	--	0,18	0,22
400	--	--	0,13	0,18
600	--	--	0,06	0,082

Таблица П9.2

Сопротивления первичных обмоток трансформаторов тока типа ТКФ

Номинальный ток, А	ТКФ-1		ТКФ-3	
	г, мОм	х, мОм	г, мОм	х, мОм
7,5	300	480	130	120
10	170	270	75	70
15	75	120	33	30
20	42	67	19	17
30	20	30	8,2	8
40	11	17	4,8	4,2
50	7	11	3,0	2,8
75	3	4,8	1,3	1,2
100	1,7	2,7	0,75	0,7
150	0,75	1,2	0,33	0,3
200	0,42	0,67	0,19	0,17
300	0,2	0,3	0,08	0,08
400	0,11	0,17	0,05	0,04
600	0,05	0,07	0,02	0,02

Приложение 10

Таблица П10.1

Полные сопротивления масляных трансформаторов при вторичном напряжении 400/230 В

Мощность тр-ра, кВА	Первичное напряжение, кВ	Z1/3, Ом	
		Y/Y ₀	Y/Y
25	6-10	1,036	0,302
		0,649	0,187
40	6-10	0,412	0,12
		0,379	0,139
69	20-35	0,259	0,075
		0,288	0,11
100	6-10	0,162	0,047
		0,159	0,068
160	6-10	0,104	0,03
		0,102	0,043
250	20-35	0,065	0,019
		0,063	--
400	6-10	0,043	0,014
		0,04	--
630	20-35	0,027	0,009
		0,0256	0,011
1000	6-10	0,018	0,005
		0,017	0,006
1600	20-35	--	0,004
		--	--
2500	6-10	--	--
		--	--

Таблица П10.2

**Полные сопротивления трансформатора с негорючим заполнением
при вторичном напряжении 0,4 кВ**

Мощность тр-ра, кВА	Первичное напряжение, кВ	Z1/3, Ом
		Схема соедин. Д/Уо
250	6-10	0,028
400	6-10	0,018
630	6-10	0,014
1000	6-10	0,0088
1600	6-10	0,006
2500	6-10	0,0038

Таблица П10.3

**Полные сопротивления сухих трансформаторов
при вторичном напряжении 400/230 В**

Мощность тр-ра, кВА	Схема соединения	Z1/3, Ом
160	Δ/Y_0	0,055
180	Y/Y ₀	0,15
250	Δ/Y_0	0,035
320	Y/Y ₀	0,084
400	Δ/Y_0	0,022
560	Y/Y ₀	0,048
630	Δ/Y_0	0,014
750	Y/Y ₀	0,036
1000	Δ/Y_0	0,009
1000	Y/Y ₀	0,027
1600	Δ/Y_0	0,0056

**Сопротивления трансформаторов, приведенные к вторичному напряжению
400/230 В**

Мощность, кВА	Первичное напряжение, кВ	Схема соединений	Рк, Вт	u, % к	r, Ом	X, Ом	Zr, Ом	Zr ⁽¹⁾ , Ом
25	10	У/У _Н	600	4,5	0,1539	0,2436	0,287	3,11
		У/У _Н	690	4,7	0,1765	0,243	0,302	0,906
40	10	У/У _Н	880	4,5	0,088	0,157	0,18	1,949
		У/У _Н	1000	4,7		0,159	0,1875	0,562
63	10	У/У _Н	1280	4,5	0,052	0,102	0,114	1,237
		У/У _Н	1470	4,7	0,059	0,105	0,119	0,36
100	20	У/У _Н	1280	5,0	0,052	0,1161	0,127	1,136
		У/У _Н	1470	5,3	0,059	0,121	0,134	0,407
	10	У/У _Н	1970	4,5	0,0315	0,0647	0,072	0,779
		У/У _Н	2270	4,7	0,0315	0,0657	0,075	0,226
160	35	У/У _Н	1970	6,5	0,0362	0,099	0,104	0,764
		У/У _Н	2270	6,8	0,0166	0,1265	0,109	0,327
	10	У/У _Н	2650	4,5	0,0193	0,0417	0,045	0,487
		У/У _Н	3100	4,7	0,0166	0,0422	0,047	0,141
250	35	У/У _Н	2650	6,5	0,0193	0,0628	0,065	0,478
		У/У _Н	3100	6,8	0,0094	0,0805	0,068	0,203
	10	У/У _Н	3700	4,5	0,0108	0,0272	0,0287	0,312
		У/У _Н	4200	4,7	0,0094	0,028	0,03	0,090
400	35	У/У _Н	3700	6,5	0,0108	0,0405	0,046	0,305
		У/У _Н	4200	6,8	0,0055	0,052	0,0436	0,130
	10	У/У _Н	5500	4,5	0,0059	0,0171	0,018	0,195
		Δ/У _Н	5900	4,5	0,0055	0,0212	0,018	0,056
630	35	У/У _Н	5500	6,5	0,0031	0,0254	0,026	0,191
		У/У _Н	7600	5,5	0,0034	0,0136	0,014	0,129
1000	10	Δ/У _Н	8500	5,5	0,0031	0,0135	0,014	0,042
		У/У _Н	7600	6,5	0,002	0,0162	0,0165	0,121
	35	У/У _Н	12200	5,5	--	0,0085	0,0088	0,081
		Δ/У _Н	--	--	0,002	--	--	0,027
1600	20	У/У _Н	12200	6,5	--	0,0102	0,0104	0,077
		Δ/У _Н	--	--	--	--	--	0,032
	10	У/У _Н	--	--	--	--	--	0,054
		Δ/У _Н	--	--	--	--	--	0,0165
	35	У/У _Н	--	--	--	--	--	0,051
		Δ/У _Н	--	--	--	--	--	0,0195

**Сопrotивление понижающих трансформаторов до 1000 кВА,
приведенные к низшему напряжению**

Номинальная мощность, кВА	Первичное напряжение, кВ	Вторичное напряжение, кВ	ц, к %	Сопrotивление, мОм	
				X	г
10	6	0,40, 0,23	5,5	698; 224	536; 172
20	6	0,40, 0,23	5,5	369; 123	240; 80
	10	0,40, 0,23	5,5	369; 123	240; 80
25	6-10	0,40, 0,23	4,7	244; 80,5	176; 58
40	6	0,40, 0,23	4,7	159; 52,5	100; 33
	10	0,40, 0,23	4,7	159; 52,5	100; 33
50	6	0,40, 0,23	5,5	152; 50,6	84; 28
	10	0,40, 0,23	5,5	152; 50,6	84; 28
63	6-10	0,40, 0,23	4,7	104,5; 34,5	54; 16
	20	0,40, 0,23	5,3	121,4; 39	54; 16
100	10	0,40, 0,23	5,5	78,5; 26,8	38; 13
	35	0,40, 0,23	6,5	96; 32,8	38; 13
100	6	0,40, 0,23	4,7	65,5; 21,7	36,3; 12
	10	0,40, 0,23	4,7	65,5; 21,7	36,3; 12
	35	0,40, 0,23	6,8	105; 33,9	36,3; 12
160	6-10	0,69, 0,4, 0,23	4,7	125; 43,4; 14,3	53,5; 18; 5,94
	35	0,69, 0,4, 0,23	6,8	195; 65,5; 1,6	53,5; 18; 594
180	6	0,525, 0,4, 0,23	5,5	77; 45,2; 15,1	34; 20; 6,7
	10	0,525, 0,4, 0,23	5,5	77, 44, 14,7	35, 20, 6,7
	35	0,525, 0,4, 0,23	6,5	93,5, 53,4, 17,8	35, 20, 6,7
250	10	0,69, 0,4, 0,23	4,7	83,5, 28,2, 3	32, 10,75, 3,6
	35	0,69, 0,4, 0,23	6,8	125,5, 42,4, 13,9	32, 10,75, 3,5
320	6	0,525, 0,4, 0,23	5,5	44, 26, 8,4	16,3, 8, 3,1
	10	0,525, 0,4, 0,23	5,5	44,5, 25,8, 8,55	16,7, 7, 3,2
	35	0,525, 0,4, 0,23	6,5	53,5, 31, 10,2	16,3, 7, 3,2
	35	0,525, 0,4, 0,23	6,5	53,5, 31, 10,2	16,3, 7, 3,2
400	10	0,69, 0,4, 0,23	4,5	50,5, 17, 5,6	17,6, 5,9, 1,9
	35	0,69, 0,4	6,5	75,4, 25,4, 8,4	17,6, 5,9, 1,9
560	10	0,525, 0,4, 0,23	5,5	25,6, 14,9, 4,9	8,3, 4,8, 1,58
	35	0,525, 0,4, 0,23	6,5	31,9, 17,9, 5,9	8,3, 4,8, 1,58
630	10	0,69, 0,4, 0,23	5,5	40,4, 13,6, 4,6	10,2, 3,4, 1,1
		3,15	6,5	858	213
630	20	0,69, 0,4, 11	6,5	12250, 48,5, 16,2	2310, 11,3,
	35	0,69, 0,4	5,5	48,5, 16,2	11, 3,07
750	10	0,525, 0,4	5,5	18,7, 10,8	5,84, 3,4
	10	0,525, 0,4	6,5	14,6, 8,5	4,14, 2,41
1000	35	0,525, 0,4	5,5	17,4, 10,15	4,14, 4,14
	6	0,69, 0,4	6,5	5325, 25,5	121, 5,8
	10	3,15		8,56	1,95
1000		63		21400	484
	35	0,69, 0,4, 3,15		2510, 30,3, 10,4	121, 5,8, 1,95

СОДЕРЖАНИЕ

1. УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТОВ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ	3
1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ	3
1.2. ОСНОВНЫЕ ДОПУЩЕНИЯ, ПРИНИМАЕМЫЕ ПРИ РАСЧЕТАХ	4
1.3. ВЫБОР РАСЧЕТНЫХ УСЛОВИЙ	4
1.4. РАСЧЕТНАЯ СХЕМА И ЕЕ ЭЛЕМЕНТЫ	6
1.5. СОСТАВЛЕНИЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ПО РАСЧЕТНОЙ СХЕМЕ	6
2. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ.....	10
2.1. ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ПРИЕМЫ	10
ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ № 1	19
3. ТОЧНОЕ ПРИВЕДЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ В ИМЕНОВАННЫХ ЕДИНИЦАХ .	22
3.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ.....	22
ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ № 2	30
4. ПРИБЛИЖЕННОЕ ПРИВЕДЕНИЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ В ИМЕНОВАННЫХ ЕДИНИЦАХ	32
4.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ.....	32
ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ № 3	36
5. СИСТЕМА ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЕДИНИЦ. ТОЧНОЕ И ПРИБЛИЖЕННОЕ ПРИВЕДЕНИЕ В ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЕДИНИЦАХ.....	37
5.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ.....	37
ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ № 4	41
6. НАЧАЛЬНЫЙ МОМЕНТ ТРЁХФАЗНОГО КЗ. РАСЧЁТ СВЕРХПЕРЕХОДНОГО И УДАРНОГО ТОКА. ВЛИЯНИЕ И УЧЁТ НАГРУЗКИ ПРИ КЗ.....	42
6.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ.....	42
6.2. ВЛИЯНИЕ И УЧЁТ НАГРУЗКИ ПРИ КЗ	43
6.3. УЧЁТ АСИНХРОННОЙ НАГРУЗКИ В НАЧАЛЬНЫЙ МОМЕНТ ВРЕМЕНИ КЗ.....	44
6.4. УЧЁТ СИНХРОННОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ В НАЧАЛЬНЫЙ МОМЕНТ КЗ	44
6.5. УЧЁТ СИСТЕМЫ ПРИ РАСЧЁТАХ ТОКОВ КЗ	45
7. РАСЧЁТ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА КЗ.....	50
7.1. ПАРАМЕТРЫ ГЕНЕРАТОРА В УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ	50
7.2. ВЛИЯНИЕ И УЧЁТ НАГРУЗКИ	52
7.3. АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ПРИ ОТСУТСТВИИ В СХЕМЕ ГЕНЕРАТОРОВ С АРВ	53
7.4. АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ПРИ НАЛИЧИИ В СХЕМЕ ГЕНЕРАТОРОВ С АРВ.....	53
7.5. РАСЧЁТ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА В СЛОЖНЫХ СХЕМАХ	55
ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ № 5	61
8. РАСЧЕТ ТОКОВ КЗ С ПОМОЩЬЮ РАСЧЕТНЫХ КРИВЫХ.....	65
8.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДА РАСЧЕТНЫХ КРИВЫХ.....	65
ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ № 6	71
9. РАСЧЁТ ТОКА ТРЁХФАЗНОГО КЗ С ПОМОЩЬЮ ТИПОВЫХ КРИВЫХ	72
ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ № 7	77
10. РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЭВМ	78

ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ № 8	79
11. ПОПЕРЕЧНАЯ НЕСИММЕТРИЯ	80
11.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ.....	80
11.2. МЕТОД СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ	80
11.3. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ.....	81
11.4. СОПРОТИВЛЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ	82
11.4.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	82
11.4.2. СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБРАТНОЙ И НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ СИНХРОННЫХ МАШИН.....	83
11.4.3. СОПРОТИВЛЕНИЕ ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ НАГРУЗКИ	84
11.4.4. СОПРОТИВЛЕНИЕ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ РЕАКТОРОВ	84
11.4.5. СОПРОТИВЛЕНИЕ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ	84
11.4.6. СОПРОТИВЛЕНИЕ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ВОЗДУШНЫХ ЛЭП... ..	87
11.4.7. СОПРОТИВЛЕНИЕ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ КАБЕЛЕЙ	88
11.5. СХЕМЫ ОТДЕЛЬНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ.....	88
11.6. ПРАВИЛО ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ ПРЯМОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ	91
11.7. УКАЗАНИЯ К РАСЧЕТУ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ПРИ ПОПЕРЕЧНОЙ НЕСИММЕТРИИ.....	93
12. РАСЧЕТ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КЗ. ПОСТРОЕНИЕ ВЕКТОРНЫХ ДИАГРАММ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ.....	94
Порядок расчета токов при несимметричных КЗ	94
ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ № 9	104
13. ОДНОКРАТНАЯ ПРОДОЛЬНАЯ НЕСИММЕТРИЯ.....	106
13.1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ	106
13.2. ПРАВИЛО ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ ПРЯМОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ	107
13.3. СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ПРЯМОЙ, ОБРАТНОЙ И НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ	108
ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ № 10	119
14. СЛОЖНЫЕ ВИДЫ ПОВРЕЖДЕНИЙ.....	121
14.1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ.....	121
14.2. ДВОЙНОЕ ЗАМЫКАНИЕ НА ЗЕМЛЮ	121
14.3. ОДНОФАЗНОЕ КЗ С РАЗРЫВОМ ФАЗЫ.....	126
15. РАСЧЕТ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ НА СТОРОНЕ ВЫПРЯМЛЕННОГО ТОКА	134
15.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ.....	134
15.2. РАСЧЕТ ТОКА КЗ НА СТОРОНЕ ВЫПРЯМЛЕННОГО ТОКА	135
ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ № 11	138
16. РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ 6...35 кВ	139
16.1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ	139
16.2. ПРИВЕДЕНИЕ К РАСЧЕТНОМУ НАПРЯЖЕНИЮ	142
16.3. РАСЧЕТНЫЕ УСЛОВИЯ.....	142
16.4. ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЙ.....	143
17. РАСЧЕТ ТОКОВ КЗ В СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ 0,4 кВ	152
ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ № 12	160

18. ОГРАНИЧЕНИЕ ТОКОВ КЗ	161
18.1. СПОСОБЫ ОГРАНИЧЕНИЯ ТОКОВ КЗ	161
18.2. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ОГРАНИЧЕНИЯ ТОКОВ КЗ	166
18.3. КООРДИНАЦИЯ УРОВНЕЙ ТОКОВ КЗ	174
ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ	175
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	179
ПРИЛОЖЕНИЯ	180
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	180
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	180
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	182
ПРИЛОЖЕНИЕ 4	183
ПРИЛОЖЕНИЕ 5	193
ПРИЛОЖЕНИЕ 6	195
ПРИЛОЖЕНИЕ 7	196
ПРИЛОЖЕНИЕ 8	198
ПРИЛОЖЕНИЕ 9	200
ПРИЛОЖЕНИЕ 10	201

Учебное издание

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ
ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМАХ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
ПРАКТИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ**

**по одноименному курсу
для студентов дневного и заочного отделений
специальности Т.01.01.00. «Электроэнергетика»**

**Авторы-составители: Евминов Леонид Иванович,
Токочакова Надежда Владимировна**

Редактор Л. Ф. Теплякова
Компьютерная верстка В. В. Камелицкий

Подписано в печать 29.06.2001.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 12,08. Уч. - изд. л. 14,21. Тираж 150 экз. Изд. № 16.
Заказ № .

Учреждение образования «Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого».

Лицензия ЛВ № 399 от 12.06.2001.
246746, г. Гомель, пр. Октября, 48, т. 47-71-64.

Отпечатано на ризографическом оборудовании
Учреждения образования «Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого».

Лицензия ЛП №114 от 12.06.2001.
246746, г. Гомель, пр. Октября, 48, т. 47-71-64.