

Министерство образования и науки Российской Федерации

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра электроснабжения промышленных предприятий

В.Т.Пилипенко

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Методические указания к курсовой работе для студентов специальностей
140211.65 «Электроснабжение» и 149204.65 «Электрические станции»
часть 2

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом
государственного образовательного учреждения высшего профессионального
образования – «Оренбургский государственный университет»

Оренбург
ИПК ГОУ ОГУ
2011

УДК 621.311 (07)
ББК 31.297
П 32

Рецензент - кандидат технических наук, доцент В.М.Вакулюк

Пилипенко, В.Т.

П 32 Переходные процессы в электроэнергетических системах: методические указания к курсовой работе для студентов специальностей 140211.65 «Электроснабжение» и 149204.65 «Электрические станции»: в 2 ч./ В.Т.Пилипенко; Оренбургский государственный университет – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2011. Ч.2 – 71 с.

Излагаются рекомендации по использованию метода типовых кривых для расчёта токов при трёхфазном и несимметричных коротких замыканиях. Приводятся особенности, порядок расчёта, необходимые аналитические выражения и числовые примеры.

УДК 621.311 (07)
ББК 31.297

© Пилипенко В.Т., 2011

© ГОУ ОГУ, 2011

Содержание

Введение.....	4
1 Общие сведения о практических методах расчёта токов короткого замыкания.....	5
2 Метод типовых кривых.....	8
2.1 Расчёт трёхфазного короткого замыкания.....	8
2.1.1 Расчётная схема содержит один генератор.....	10
2.1.2 Расчётная схема содержит несколько однотипных и одинаково удалённых от точки короткого замыкания генераторов.....	12
2.1.3 Расчётная схема содержит несколько генераторов, находящихся на разном удалении от точки КЗ, но связанных с ней независимо друг от друга.....	12
2.1.4 Расчётная схема содержит несколько источников, которые при коротком замыкании оказываются связанными с местом повреждения через какой-либо элемент (трансформатор, реактор, линию электропередачи т.п.).....	13
2.2 Расчёт несимметричных коротких замыканий.....	17
2.2.1 Составление схем замещения.....	19
2.2.2 Последовательность расчёта.....	24
3 Примеры расчёта.....	32
3.1 Расчёт однофазного короткого замыкания	34
3.2 Расчёт двухфазного короткого замыкания на землю.....	49
3.3 Расчёт трёхфазного короткого замыкания.....	53
Список использованных источников.....	64
Приложение А Последовательность расчёта несимметричных КЗ при наличии в схеме трансформаторов с разземлёнными нейтралями.....	65
Приложение Б Средние значения сверхпереходных сопротивлений и ЭДС элементов	69
Приложение В Выражения для определения сопротивлений	70

Введение

Целью выполнения курсовой работы является закрепление теоретических знаний, полученных студентами при изучении курса «Электромагнитные переходные процессы» посредством овладения практическими навыками расчёта коротких замыканий.

Во второй части «Методических указаний» рассматривается расчёт всех видов короткого замыкания (КЗ) методом типовых кривых, относящимся к группе практических методов расчёта. Описываются особенности и последовательность расчёта, приводятся необходимые аналитические выражения с комментариями.

Для более полного понимания материала подробно рассматриваются числовые примеры расчёта.

Оформление пояснительной записки к курсовой работе осуществляется в соответствии с требованиями ГОСТ 2.105-95 и СТО 02069024.101-2010.

Примерный объём – 25-30 листов стандартного формата А4.

«Методические указания» предназначены в первую очередь для студентов дневной формы обучения, однако, могут быть использованы студентами и других форм обучения.

1 Общие сведения о практических методах расчета токов короткого замыкания

Расчёт токов короткого замыкания сводится прежде всего к определению периодической составляющей тока КЗ, действующее значение которой в произвольный момент времени может быть найдено путём решения соответствующей системы дифференциальных уравнений, описывающих переходные процессы в синхронных машинах. Но достаточно высокая точность расчётов может быть достигнута лишь при учёте влияния демпферных обмоток машин, действие автоматического регулирования возбуждения, изменения скорости вращения электрических машин, подключенных нагрузок и других факторов. При этом система дифференциальных уравнений даже в простейшем случае, когда расчётная схема содержит только одну машину, оказывается сложной и может быть решена только с применением вычислительной техники. Между тем нередко оказываются достаточными приближённые данные о токах короткого замыкания. В связи с этим в проектной практике нашли широкое применение так называемые практические методы расчёта токов короткого замыкания, к которым относятся метод **расчётных кривых** и метод **типовых кривых**.

При использовании этих методов необходимо знать удалённость точки короткого замыкания от источника электроэнергии. Обычно под удалённостью точки КЗ понимают приведенное к номинальной мощности и номинальному напряжению машины сопротивление внешней цепи до точки короткого замыкания, т.е. суммарное сопротивление элементов системы (трансформаторов, линий, реакторов и др.) включенных между шинами источника (генератора) и местом короткого замыкания. Однако такая оценка удалённости применима только в тех случаях, когда расчётная схема содержит только одну электрическую машину или несколько однотипных и одинаково удалённых от точки КЗ машин.

Более удобной и универсальной величиной, которая в полной мере характеризует удалённость точки короткого замыкания и может быть определена в любой схеме и при любом числе машин, является отношение действующего значения периодической составляющей тока генератора в начальный момент короткого замыкания I_{n0} к его номинальному току:

$$I_{*n0(ном)} = \frac{I_{n0}}{I_{ном}}. \quad (1.1)$$

Это выражение целесообразно применять, когда генератор и точка КЗ находятся на одной ступени напряжения, т.е. когда между ними нет трансформаторов. В общем случае, когда генератор и точка короткого замыкания находятся на разных ступенях напряжения сети и действующее значение периодической составляющей тока машины в начальный момент короткого замыкания I_{n0} приведено к той ступени напряжения сети, на которой находится точка КЗ, относительное значение периодической составляющей тока генератора в начальный момент короткого замыкания $I_{*n0(ном)}$ следует определять (в системе именованных единиц) как :

$$I_{*n0(ном)} = \frac{I_{n0}}{I_{ном}} = \sqrt{3} I_{n0} \frac{U_{ном}^{\circ}}{S_{ном}}, \quad (1.2)$$

где $I_{ном}^{\circ}$ и $U_{ном}^{\circ}$ - номинальные ток и напряжение генератора, приведенные к той ступени напряжения сети, на которой находится точка КЗ;

$S_{ном}$ - полная номинальная мощность генератора.

Если расчёты токов КЗ выполняются с использованием системы относительных единиц при произвольно выбранных базисных условиях, то величину $I_{*n0(ном)}$, характеризующую удалённость точки короткого замыкания, находят по выражению:

$$I_{*n0(ном)} = I_{*n0(б)} \sqrt{3} I_{n0} \frac{S_{б}}{S_{ном}} \frac{U_{ном}}{U_{б}}, \quad (1.3)$$

где $I_{*n0(б)}$ - действующее значение периодической составляющей тока генератора в начальный момент КЗ, выраженное в относительных единицах при произвольно выбранных базисных условиях;

$S_{б}$ и $U_{б}$ - базисные мощность, МВА, и напряжение, кВ, той ступени напряжения, на которой находится генератор;

$U_{ном}$ - номинальное напряжение генератора, кВ.

В зависимости от удалённости точки короткого замыкания от генератора все короткие замыкания подразделяют на *удалённые* и *близкие*.

Удалёнными называют такие короткие замыкания, при которых амплитуды периодической составляющей тока генератора в начальный и произвольный моменты времени практически одинаковы, а близкими – короткие замыкания, при которых амплитуды существенно различаются. Обычно короткое замыкание считают удалённым, если величина $I_{*n0(ном)} < 2$ и близким, когда $I_{*n0(ном)} \geq 2$.

2 Метод типовых кривых

2.1 Расчёт трёхфазного короткого замыкания

В настоящее время Руководящие указания по расчёту токов короткого замыкания [7] рекомендуют использовать для определения действующего значения периодической составляющей тока в произвольный момент времени при близких КЗ вместо метода расчётных кривых другой практический метод – метод типовых кривых. В отличие от других этот метод позволяет, используя единые кривые, определить ток короткого замыкания от генераторов разных типов, даже если значения их одноимённых параметров существенно отличаются друг от друга (исключение составляют турбогенераторы мощностью 500 МВт). Это достигается за счёт того, что периодическая составляющая тока КЗ в любой момент времени отнесена не к номинальному току машины, как это имело место в методе расчётных кривых, а к действующему значению периодической составляющей тока машины в начальный момент короткого замыкания. На рисунке 2.1 приведены кривые $I_{nt}/I_{n0} = f(t)$ для турбогенераторов типов ТВВ-200-2 (кривая 1), ТВВ-320-2 (кривая 2) и ТВВ-500-2 (кривая 3) при коротком замыкании на выводах этих генераторов. Нетрудно видеть, что для турбогенераторов мощностью 200 и 300 МВт кривые весьма близки друг к другу. Существенно дальше лежит кривая для турбогенератора мощностью 500 МВт. По мере удаления точки короткого замыкания от генераторов все кривые $I_{nt}/I_{n0} = f(t)$ приближаются друг к другу.

Важными преимуществами метода типовых кривых перед другими методами являются также его применимость при любой предшествующей нагрузке генератора и весьма малая зависимость результатов расчёта от места подключения нагрузки.

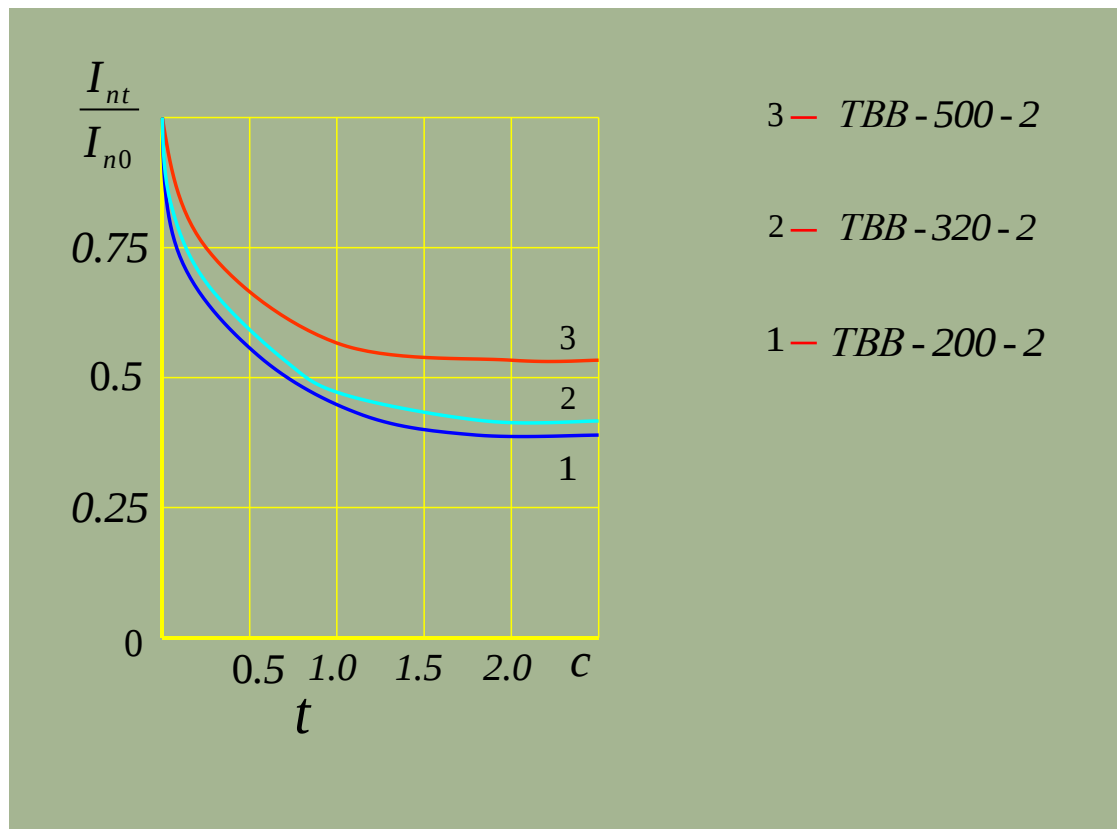


Рисунок 2.1

Метод типовых кривых основан на использовании кривых изменения во времени действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания от генератора (синхронного компенсатора) в произвольный момент времени, отнесённого к его начальному значению, т.е.

$\gamma_{nt} = I_{nt} / I_{n0}$, при разных удалённостях точки короткого замыкания,

которая характеризуется величиной $I_{*n0(НОМ)}$.

На рисунке 2.2 показан общий вид кривых синхронных генераторов (компенсаторов). Вид реальных кривых определяется типом системы возбуждения синхронной машины. При их построении кратность предельного установившегося напряжения возбуждения по отношению к номинальному напряжению возбуждения (кратность форсировки возбуждения) была принята равной двум, а постоянная времени нарастания

напряжения возбуждения синхронной машины при форсировке возбуждения – равной нулю.

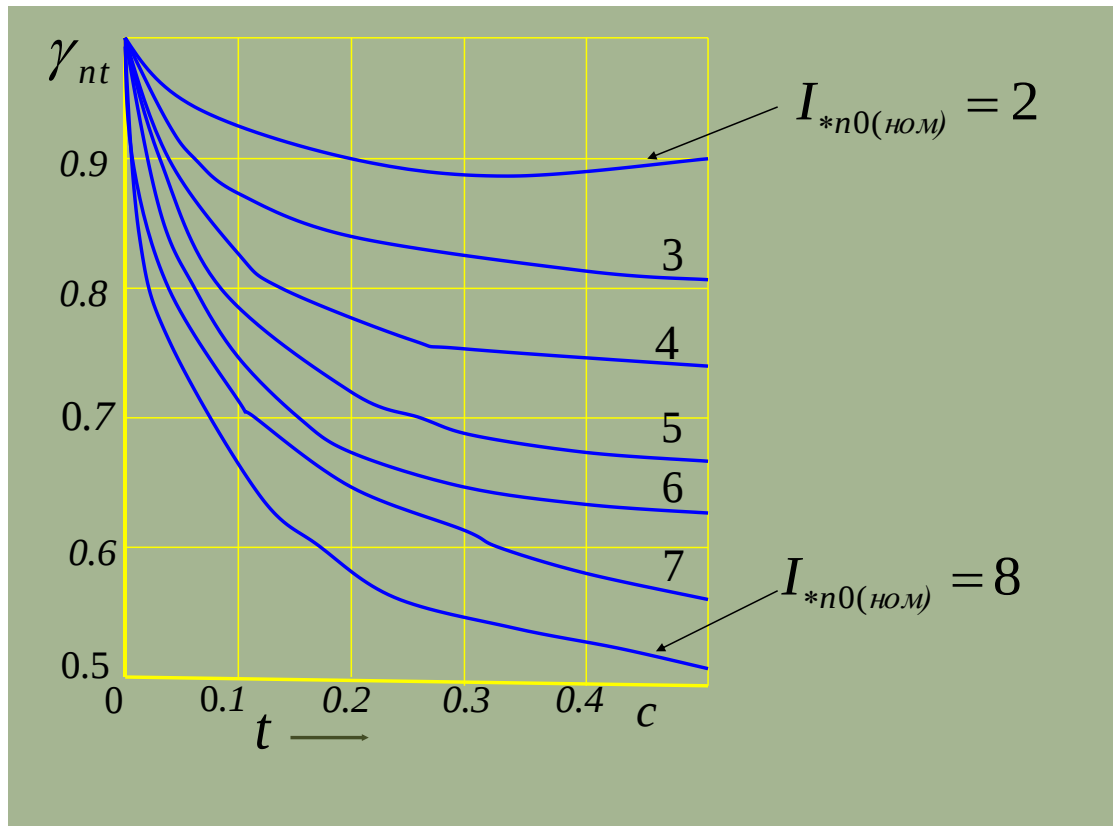


Рисунок 2.2

В зависимости от количества генераторов, их удалённости от места КЗ и сложности расчётной схемы существуют определённые последовательности расчёта методом типовых кривых.

2.1.1 Расчётная схема содержит один генератор

2.1.1.1 По исходной расчётной схеме составляют схему замещения для определения начального значения периодической составляющей тока КЗ от генератора, т.е. схему, в которой синхронный генератор учитывают сверхпереходным сопротивлением и сверхпереходной ЭДС, найденной с учётом предшествующей нагрузки машины;

2.1.1.2 Упрощают схему и находят эквивалентное индуктивное сопротивление элементов схемы замещения относительно точки короткого

замыкания $X_{\text{экв}}$ и определяют начальное действующее значение периодической составляющей тока генератора при коротком замыкании (в системе именованных единиц)

$$I_{n0} = \frac{E_{n0}^{//}}{X_{\text{экв}}}, \quad (2.1)$$

или по формуле (в системе относительных единиц):

$$I_{*n0(\bar{o})} = \frac{E_{*n0}^{//}}{X_{*\text{экв}}}. \quad (2.2)$$

2.1.1.3 В зависимости от того в какой системе единиц выполняется расчёт, по формулам (1.1), (1.2) или (1.3) находят начальное действующее значение периодической составляющей тока генератора, отнесённое к номинальному току машины, т.е. $I_{*n0(\text{ном})}$. Если $I_{*n0(\text{ном})} \geq 2$, то расчёт ведут с применением типовых кривых. С этой целью на рисунке 2.2 находят кривую, соответствующую полученному значению $I_{*n0(\text{ном})}$. Если оно оказывается дробным числом, то его округляют до ближайшего целого числа (при небольшой разнице между дробным и целым числами) или производят интерполяцию кривых.

2.1.1.4 По выбранной кривой определяют отношение действующих значений периодической составляющей тока КЗ от генератора в расчётный и начальный моменты времени, т.е. величину $\gamma_{nt} = I_{nt} / I_{n0}$.

2.1.1.5 Определяют искомое действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания в расчётный момент времени по формулам:

- в системе именованных единиц

$$I_{nt} = \gamma_{nt} I_{*n0(ном)} I_{ном}^{\circ}; \quad (2.3)$$

- в системе относительных единиц

$$I_{nt} = \gamma_{nt} I_{*n0(\bar{o})} I_{\bar{o}}. \quad (2.4)$$

В тех случаях, когда $I_{*n0(ном)} < 2$, действующее значение периодической составляющей мало изменяется во времени и поэтому принимают $I_{nt} = I_{n0}$.

2.1.2 Расчётная схема содержит несколько однотипных и одинаково удалённых от точки короткого замыкания генераторов

В этом случае расчёт ведут в той же последовательности, что и при наличии в расчётной схеме одного генератора с той лишь разницей, что все генераторы заменяют одним эквивалентным, т.е. соответствующие ветви в схеме замещения эквивалентируют, а в формулы (1.2) и (1.3) вместо номинальной мощности одной машины подставляют сумму номинальных мощностей всех машин.

2.1.3 Расчётная схема содержит несколько генераторов, находящихся на разном удалении от точки КЗ, но связанных с ней независимо друг от друга

В этой ситуации при определении периодической составляющей тока трёхфазного короткого замыкания в произвольный момент времени

изложенным выше способом находят значение этой составляющей от отдельных машин и затем результаты суммируют.

2.1.4 Расчётная схема содержит несколько источников, которые при коротком замыкании оказываются связанными с местом повреждения через какой-либо элемент (трансформатор, реактор, линию электропередачи т.п.)

При расчёте действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания в произвольный момент времени следует учитывать влияние переходного процесса в ближайшем к месту КЗ генераторе на изменение во времени указанной составляющей тока КЗ. Это влияние характеризуется отношением

$$\gamma_{\kappa t} = \frac{I_{\kappa t}}{I_{\kappa 0}},$$

где $I_{\kappa t}$ и $I_{\kappa 0}$ - действующие значения периодической составляющей тока в месте короткого замыкания соответственно в рассматриваемый момент времени и в начальный момент короткого замыкания.

Для определения этого отношения необходимо исходную схему замещения преобразовать в трёхлучевую звезду так, чтобы ближайший к месту КЗ генератор и последовательно соединённые с ним элементы были представлены виде отдельной ветви с включёнными в неё сверхпереходной ЭДС генератора E_G'' и суммарным сопротивлением всех элементов этой ветви X_G , в более удалённые источники и связывающие их линии электропередачи, трансформаторы и т.д. вместе с остальной частью электроэнергетической системы (питающей системой) были представлены в

другой ветви неизменной по амплитуде эквивалентной ЭДС E_{GS} и эквивалентным сопротивлением X_{GS} , как показано на рисунке 2.3. В третью ветвь включают сопротивление элемента, который при коротком замыкании связывает обе ветви, содержащие ЭДС с точкой короткого замыкания.

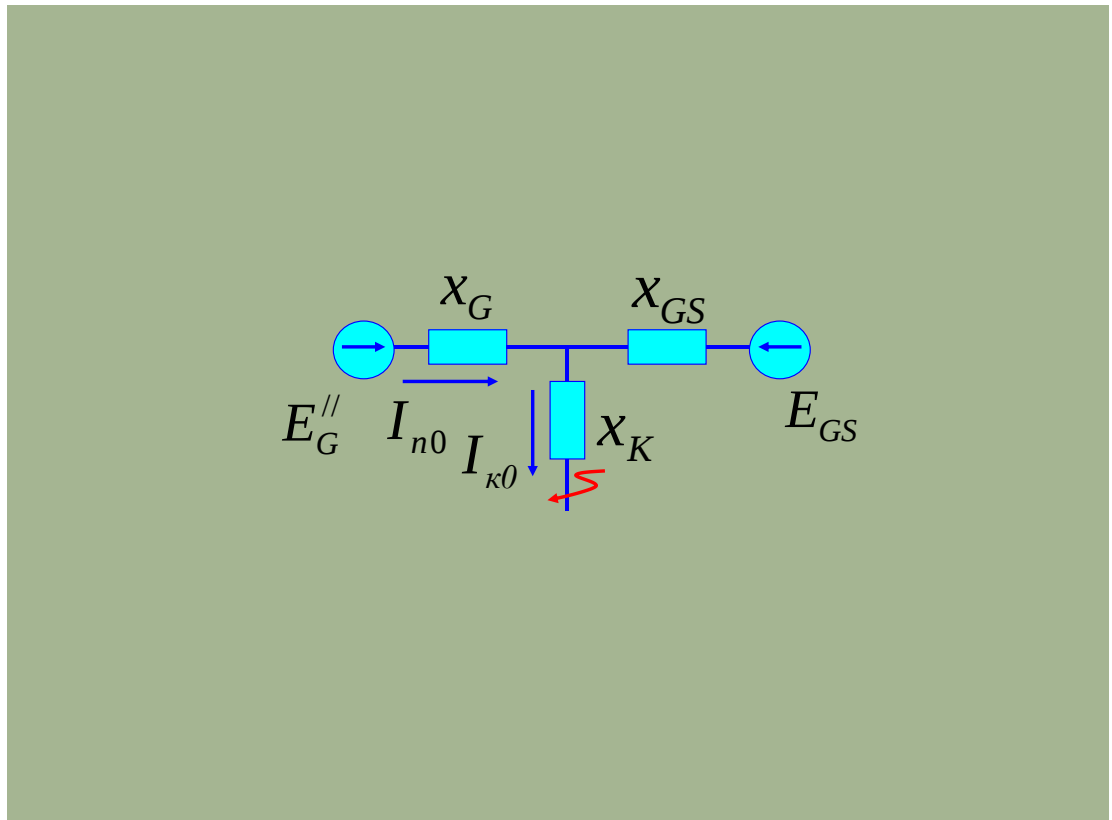


Рисунок 2.3 – Итоговая схема замещения

Из полученной схемы путём дальнейшего упрощения находят $E_{экв}$ и $X_{экв}$, после чего определяют значение тока КЗ в начальный момент короткого замыкания именованных единицах

$$I_{k0} = E_{экв}'' / x_{экв}, \quad (2.5)$$

либо в относительных единицах

$$I_{*k0(б)} = E_{*экв}'' / x_{*экв}; \quad (2.6)$$

и действующее значение периодической составляющей тока КЗ от генератора

$$I_{n0} = \frac{E_G'' - I_{к0} \cdot x_K}{x_G}. \quad (2.7)$$

Затем определяют $I_{*n0(ном)}$ и $\frac{I_{n0}}{I_{к0}}$. Если $I_{*n0(ном)} < 2$ или

$\frac{I_{n0}}{I_{к0}} < 0,5$ либо оба условия имеют место одновременно, то принимают, что

действующее значение периодической составляющей тока в месте короткого замыкания остаётся неизменным во времени, т.е. $\gamma_{кт} = 1$. Если же

$I_{*n0(ном)} \geq 2$ и $\frac{I_{n0}}{I_{к0}} \geq 0,5$, т.е. для выделенного генератора короткое

замыкание является близким и его влияние на ток в месте короткого замыкания оказывается существенным, то для определения действующего значения в заданный момент времени необходимо сначала найти значение

отношения $\gamma_{кт}$. Его приближённое значение может быть определено с помощью вспомогательных кривых $\gamma_{кт} = f(\gamma_{nt})$, построенных для разных

отношений $\frac{I_{n0}}{I_{к0}}$, в пределах от 1 до 0,5, вид которых приведен на рисунке

2.4.

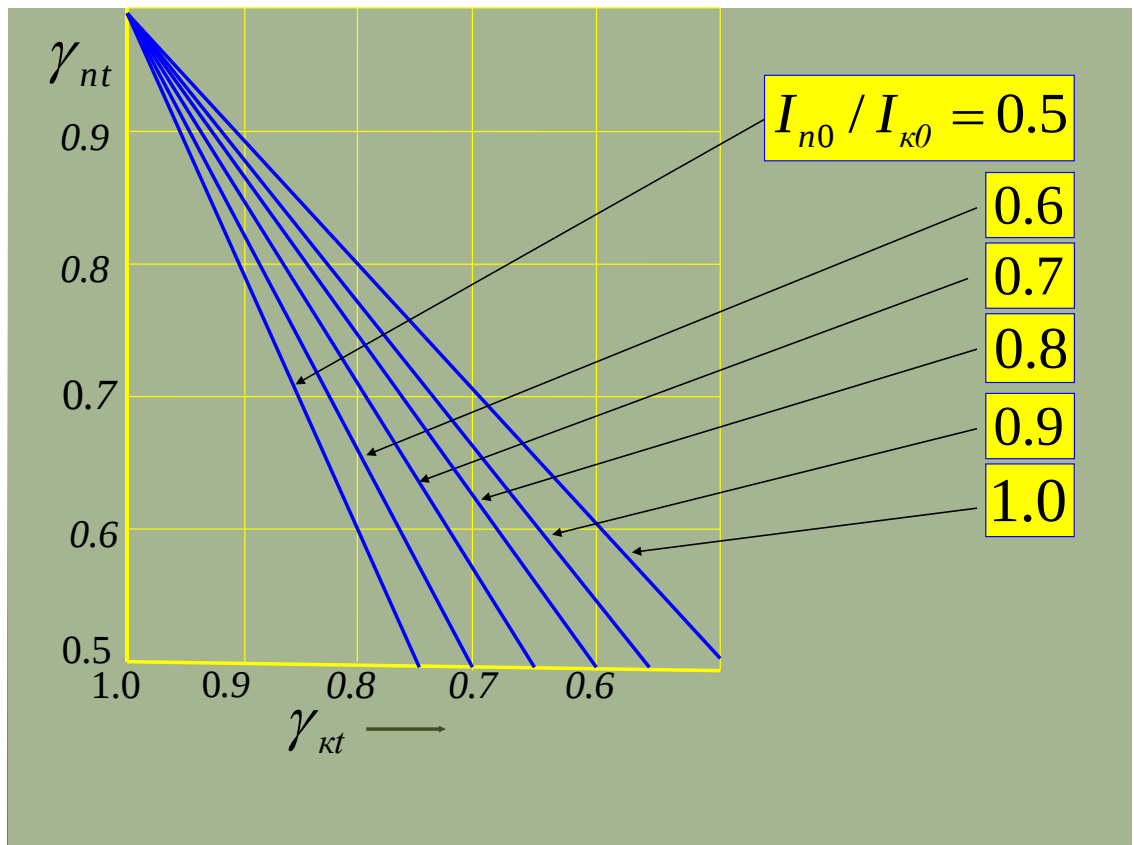


Рисунок 2.4 – Вспомогательные кривые $\gamma_{kt} = f(\gamma_{nt})$

Для удобства пользования кривыми $\gamma_{kt} = f(\gamma_{nt})$ ось γ_{nt} расположена вертикально, а ось γ_{kt} - горизонтально, причём в начале координат $\gamma_{kt} = 1$, а по мере удаления от начала координат значения γ_{kt} уменьшаются.

Таким образом, если выясняется, что $I_{*n0(НОМ)} \geq 2$ и $\frac{I_{n0}}{I_{\kappa 0}} \geq 0,5$, то по величине удалённости точки КЗ, используя типовые кривые (рисунок 2.2) находят значение γ_{nt} , после чего по кривым $\gamma_{kt} = f(\gamma_{nt})$ для найденного ранее отношения $\frac{I_{n0}}{I_{\kappa 0}}$ по величине γ_{nt} определяют γ_{kt} .

Искомое действующее значение периодической составляющей тока в месте короткого замыкания в заданный момент времени с учётом влияния

переходного процесса в ближайшем к месту КЗ генератору определяется следующим образом:

- в именованных единицах

$$I_{kt} = \gamma_{kt} I_{k0} \quad (2.8)$$

- в относительных единицах

$$I_{kt} = \gamma_{kt} I_{*k0(\bar{o})} I_{\bar{o}} \quad (2.9)$$

Для определения действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания в произвольный момент времени от синхронных и асинхронных двигателей (тока подпитки точки КЗ) также применяют метод типовых кривых, которые приведены в [7].

2.2 Расчёт несимметричных коротких замыканий

Рассматриваемые несимметричные режимы ограничены условием, что несимметрия возникает только в одном каком-либо месте системы, в то время как вся остальная часть остается строго симметричной.

Анализ несимметричных режимов производится на основе метода симметричных составляющих, согласно которому при возникновении несимметрии рассматриваются отдельно схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей данной системы, вычисляются токи и напряжения в них и на их основе определяются фазные величины, например: $I_A = I_{A1} + I_{A2} + I_{A0}$.

В соответствии с правилом эквивалентности прямой последовательности, ток прямой последовательности любого несимметричного КЗ может быть определен как ток при трехфазном

коротком замыкании в точке, удалённой от действительной точки КЗ на дополнительное сопротивление $x_{\Delta}^{(n)}$, определяемое видом КЗ:

$$I_{ka1}^{(n)} = \frac{E_{A1\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + x_{\Delta}^{(n)})}, \quad (2.1)$$

где $E_{A1\Sigma}$ – результирующая ЭДС схемы прямой последовательности;

$x_{1\Sigma}$ – результирующее сопротивление схемы прямой последовательности относительно точки КЗ.

При этом токи обратной и нулевой последовательностей, а также напряжения всех последовательностей пропорциональны току прямой последовательности в месте КЗ. Эти соотношения, а также величины их для различных видов КЗ приведены в таблице 2.1.

Правило эквивалентности прямой последовательности позволяет применять при расчете любого вида несимметричного КЗ практические методы и приемы расчета переходного процесса при трехфазном КЗ. Для проведения расчетов необходимо составить схемы замещения прямой, обратной, нулевой последовательностей и определить результирующие сопротивления этих схем относительно точки КЗ.

Таблица 2.1

КЗ	$x_{\Delta}^{(n)}$	I_{A2}	I_{A0}	U_{A1}	U_{A2}	U_{A0}
$n^{(2)}$	$x_{2\Sigma}$	$-I_{A1}$	0	$x_{2\Sigma} \cdot I_{A1}$	$x_{2\Sigma} \cdot I_{A1}$	0
$n^{(1)}$	$x_{2\Sigma} + x_{0z}$	I_{A1}	I_{A1}	$x_{\Delta}^{(1)} \cdot I_{A1}$	$x_{2\Sigma} \cdot I_{A1}$	$x_{0z} \cdot I_{A1}$

$n^{(1,1)}$	$\frac{X_{2\Sigma} \cdot X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}$	$\frac{X_{\Delta}^{(1,1)}}{X_{2\Sigma}} \times \times I_A$	$\frac{X_{\Delta}^{(1,1)}}{X_{0\Sigma}} \times \times I_{A1}$	$X_{\Delta}^{(1,1)} \times \times I_{A1}$	$X_{\Delta\Sigma}^{(1,1)} \times \times I_{A1}$	$X_{\Delta}^{(1,1)} \times \times I_{A1}$
-------------	---	--	---	---	---	---

2.2.1 Составление схем замещения

2.2.1.1 Схема замещения прямой последовательности

Схема прямой последовательности представляет собой схему, используемую для расчета сверхпереходного режима трехфазного короткого замыкания без учёта нагрузок, за исключением тех, которые включены непосредственно в месте возникшего КЗ (ток подпитки от таких нагрузок учитывается дополнительно). Началом схемы прямой последовательности считают точку, в которой объединены свободные концы всех генерирующих и нагрузочных ветвей (при необходимости учёта последних). Концом схемы прямой последовательности считают точку, где возникла рассматриваемая несимметрия, т.е. точку КЗ.

2.2.1.2 Схема замещения обратной последовательности

Эта схема по структуре аналогична схеме прямой последовательности. Различие состоит в том, что в схеме обратной последовательности сопротивление обратной последовательности генераторов несколько отличается от их сопротивления прямой последовательности. Если этим обстоятельством пренебречь, то схемы замещения обеих последовательностей можно считать идентичными. Начало и конец схемы обратной последовательности определяются так же, как и для схемы прямой последовательности.

2.2.1.3 Схема замещения нулевой последовательности

Эта схема в значительной мере определяется соединением обмоток входящих в нее трансформаторов. Составление схем нулевой последовательности следует начинать, как правило, от точки, где возникла несимметрия, считая, что в этой точке все фазы замкнуты между собой накоротко и к ней приложено напряжение нулевой последовательности.

Далее следует выявить в пределах каждой электрически связанной цепи возможные пути протекания токов нулевой последовательности. Для циркуляции токов нулевой последовательности необходима по меньшей мере одна заземленная нейтраль в той же электрически связанной цепи, где приложено напряжение нулевой последовательности.

В схему замещения нулевой последовательности выйдут лишь те элементы схемы, через которые протекают токи нулевой последовательности. В частности, поскольку синхронные генераторы присоединяются к системе через трансформаторы со схемой соединения обмоток Δ/Y , а сами генераторы работают с изолированной или компенсированной нейтралью, то это исключает протекание через них токов нулевой последовательности (ток циркулирует внутри замкнутого контура, каковым является обмотка, соединённая в треугольник, не выходя за его пределы). Величина сопротивления нулевой последовательности трансформаторов определяется их конструкцией и соединением обмоток. Со стороны обмотки, соединенной в Δ или Y независимо от того, как соединены другие обмотки, токи нулевой последовательности течь не могут, т.к. для них нет пути возврата через землю. В этом случае для трансформаторов $x_0 = \infty$. Путь для циркуляции токов нулевой последовательности имеет место лишь в тех трансформаторах, которые со стороны места повреждения имеют обмотку, соединенную в звезду с **заземленной** нейтралью. В этом случае сопротивление трансформаторов должно быть учтено в схеме замещения нулевой последовательности.

Сопротивления элементов в схеме нулевой последовательности в общем случае существенно отличается от их сопротивлений в схеме прямой и обратной последовательностей.

Для всех двухобмоточных трансформаторов со схемой соединения обмоток Y_0/Δ индуктивное сопротивление нулевой последовательности равно:

$$x_0 = x_{вн} + x_{нн} = x_1,$$

т.е. равно **сопротивлению прямой последовательности**.

В зависимости от конструкции трансформаторов в схеме учитывается реактивность намагничивания нулевой последовательности $x_{\mu 0}$.

Для группы из трех однофазных трансформаторов, а также броневого трансформатора ток намагничивания нулевой последовательности очень мал, т.к., в этом случае условия для магнитного потока практически те же, что и при питании трансформатора от источника напряжения прямой последовательности. Поэтому можно считать $x_{0т} = x_{1т}$.

Иные условия в трехфазных трехстержневых трансформаторах, где магнитные потоки нулевой последовательности замыкаются через

изолирующую среду и кожух трансформатора. Для проведения магнитного потока по пути со столь высоким магнитным сопротивлением необходим достаточно большой ток намагничивания. Поэтому реактивность

$X_{\mu 0}$ у трансформаторов такого типа значительно меньше, чем $X_{\mu 1}$. В зависимости от конструкции этого типа трансформатора она находится в пределах $X_{\mu 0} = (0.3 - 1.0) X_{\mu 1}$. Имея в виду, что величина сопротивления обмотки низшего напряжения $X_{нн}$ все же значительно меньше $X_{\mu 0}$, можно практически считать, что и для трехстержневого трансформатора с соединением обмоток Y_0/Δ $X_{\mu 0} = \infty$.

Аналогично вводится в схему замещения трехфазный трехобмоточный трансформатор, у которого имеется обмотка, соединенная в треугольник. В схеме замещения трансформатора не участвует обмотка, соединенная в звезду с незаземленной нейтралью, т.к. в ней не могут циркулировать токи нулевой последовательности.

Обмотка, соединенная в звезду с заземленной нейтралью и расположенная не со стороны точки КЗ (на рисунке 2.5 это обмотка среднего напряжения) вводится в схему замещения при условии, что на стороне этой обмотки обеспечен путь для тока нулевой последовательности, т.е. в ее цепи имеется по меньшей мере еще хотя бы одна заземленная нейтраль, показанная на рисунке 2.5 пунктиром. Обмотка, соединенная в треугольник, подлежит учёту в схеме замещения.

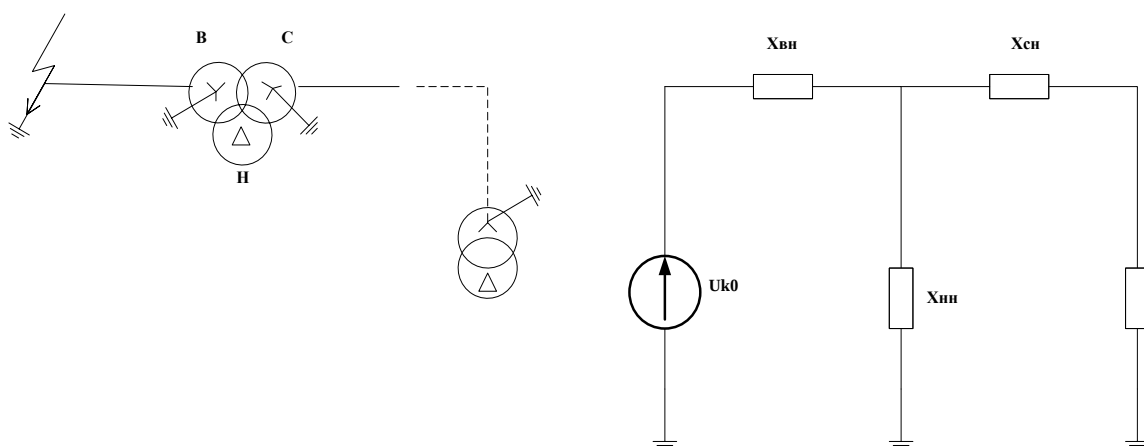


Рисунок 2.5 – Поясняющая схема и схема замещения нулевой последовательности трёхобмоточного трансформатора

В случае автотрансформатора в схеме замещения участвуют все обмотки, поскольку через автотрансформатор токи нулевой последовательности могут переходить со стороны высшего напряжения на сторону среднего напряжения и наоборот, т.к. обмотки ВН и СН имеют общую заземлённую нейтраль.

Сопротивление схемы замещения X_{BH}, X_{CH}, X_{HH} находят по тем же формулам, как и случае трехфазного к.з.

Воздушные линии имеют сопротивление X_{0w} значительно большее, чем сопротивление прямой (обратной) последовательности. Это обусловлено тем, что при токе прямой (обратной) последовательности взаимоиндукция с другими фазами уменьшает сопротивление фаз, тогда как при токе нулевой последовательности индукция между фазами увеличивает сопротивление фаз. Для одноцепной линии сопротивление нулевой последовательности определяется как

$$X_0 = X_L + 2X_M,$$

а сопротивление прямой последовательности:

$$X_1 = X_L - X_M,$$

где X_L и X_M – индуктивность фазы и сопротивление взаимоиндукции между фазами, определенные с учетом возврата тока нулевой последовательности через землю.

Сопротивление нулевой последовательности каждой цепи двухцепной линии дополнительно увеличивается, благодаря взаимоиндукции с проводами параллельной цепи:

$$X_{02Ц} = X_L + 2X_M + 3X_{1-20},$$

где X_{1-20} - сопротивление взаимоиндукции между цепями.

При наличии у линии заземленных тросов ее индуктивное сопротивление нулевой последовательности снижается за счет реакции от наведенных токов в тросе:

$$X_0 = X_L + 2X_M - 3 \frac{X_{пт0}^2}{X_{т0}},$$

где $X_{пт0}$ - сопротивление взаимоиндукции между провод и тросом;

$X_{т0}$ - сопротивление троса.

В практических расчетах принимают:

- для одноцепной линии с хорошо проводящими грозозащитными тросами $x_{0w} = 2x_{1w}$;

- для каждой цепи двухцепной линии с хорошо проводящими тросами $x_{0w} = 3x_{1w}$.

2.2.2 Последовательность расчёта

Приведенная ниже последовательность расчётов (в относительных единицах) относится к наиболее общему случаю, когда источники расположены на различной удалённости от места короткого замыкания.

2.2.2.1 Однофазное короткое замыкание

1 Путём последовательного преобразования схемы замещения всех последовательностей сводятся к лучевому виду (рисунок 2.6), где количество ветвей определяется количеством источников.

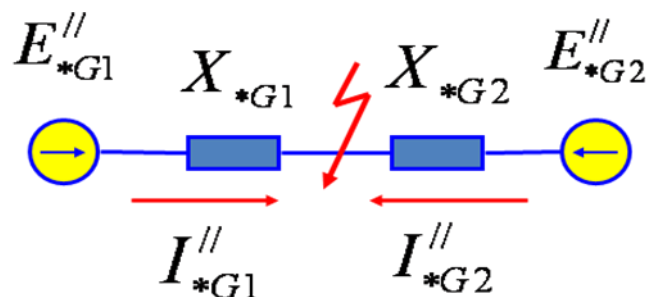


Рисунок 2.6

В результате становятся известны сопротивления различных последовательностей всех выделенных ветвей $X_{*1i}, X_{*2i}, X_{*0i}$;

2 Зная эти сопротивления, находят величину дополнительного сопротивления для каждой ветви

$$X_{*\Delta i}^{(1)} = X_{*2i} + X_{*0i}.$$

3 Определяют начальное действующее значение периодической составляющей тока прямой последовательности в i -той ветви при коротком замыкании:

$$I_{*1n0(\bar{o})i} = \frac{E_{*n0i}^{//}}{X_{*1i} + X_{*\Delta i}^{(1)}}.$$

4 По формуле

$$I_{*1n0(ном)} = I_{*1n0(\bar{o})i} \frac{S_{\bar{o}}}{S_{ГНОМ\bar{i}}} \frac{U_{ГНОМ\bar{i}}}{U_{\bar{o}}}$$

находят начальное действующее значение периодической составляющей тока прямой последовательности от источника i -той ветви, отнесённое к номинальному току машины, т.е. $I_{*1n0(ном)}$. Если $I_{*1n0(ном)} \geq 2$, то расчёт ведут с применением типовых кривых. С этой целью находят кривую, соответствующую полученному значению $I_{*n0(ном)}$ (вид типовых кривых приведен на рисунке 2.2, реальные кривые для различных генераторов

смотрите в [7]). Если оно оказывается дробным числом, то его округляют до ближайшего целого числа (при небольшой разнице между дробным и целым числами) или производят интерполяцию кривых.

5 По выбранной кривой определяют отношение действующих значений периодической составляющей тока КЗ прямой последовательности от источника i - той ветви в расчётный и начальный моменты времени, т.е. величину $\gamma_{nt} = I_{1nti} / I_{1n0i}$.

6 Определяют искомое действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания прямой последовательности от источника i - той ветви в расчётный момент времени по формуле:

$$I_{1nti} = \gamma_{nt} I_{*1n0(\bar{o})i} I_{\bar{o}}.$$

В тех случаях, когда $I_{*1n0(ном)} < 2$, действующее значение периодической составляющей мало изменяется во времени и поэтому принимают $I_{1nti} = I_{1n0i}$.

7 Величина искомого тока повреждённой фазы в месте короткого замыкания определяется как сумма токов от всех источников в соответствующие моменты времени, т.е.:

$$I_{*k\Sigma} = m^{(1)} \sum I_{*ki},$$

где коэффициент

$$m^{(1)} = 3.$$

2.2.2.2 Двухфазное короткое замыкание

1 Путём последовательного преобразования схемы замещения прямой и обратной последовательностей сводятся к лучевому виду (рисунок 2.7), где количество ветвей определяется количеством источников.

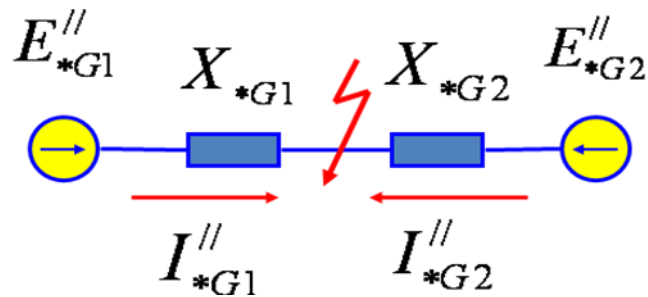


Рисунок 2.7

В результате становятся известны сопротивления различных последовательностей всех выделенных ветвей X_{*1i}, X_{*2i} ;

2 Зная эти сопротивления, находят величину дополнительного сопротивления для каждой ветви

$$X_{*\Delta i}^{(2)} = X_{*2i}.$$

3 Определяют начальное действующее значение периодической составляющей тока прямой последовательности в i -той ветви при коротком замыкании:

$$I_{*1n0(\delta)i} = \frac{E_{*0i}^{//}}{X_{*1i} + X_{*\Delta i}^{(2)}}.$$

4 По формуле

$$I_{*1n0(ном)} = I_{*1n0(\bar{o})i} \frac{S_{\bar{o}}}{S_{Гномі}} \frac{U_{Гномі}}{U_{\bar{o}}}$$

находят начальное действующее значение периодической составляющей тока прямой последовательности от источника $\dot{I}$ - той ветви, отнесённое к номинальному току машины, т.е. $I_{*1n0(ном)}$. Если $I_{*1n0(ном)} \geq 2$, то расчёт ведут с применением типовых кривых. С этой целью находят кривую, соответствующую полученному значению $I_{*n0(ном)}$ (вид типовых кривых приведен на рисунке 2.2, реальные кривые для различных генераторов смотрите в [7]). Если оно оказывается дробным числом, то его округляют до ближайшего целого числа (при небольшой разнице между дробным и целым числами) или производят интерполяцию кривых.

5 По выбранной кривой определяют отношение действующих значений периодической составляющей тока КЗ прямой последовательности от источника $\dot{I}$ - той ветви в расчётный и начальный моменты времени, т.е. величину $\gamma_{nt} = I_{1nti} / I_{1n0i}$.

6 Определяют искомое действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания прямой последовательности от источника $\dot{I}$ - той ветви в расчётный момент времени по формуле:

$$I_{1nti} = \gamma_{nt} I_{*1n0(\bar{o})i} I_{\bar{o}}.$$

В тех случаях, когда $I_{*1n0(ном)} < 2$, действующее значение периодической составляющей мало изменяется во времени и поэтому принимают $I_{1nti} = I_{1n0i}$.

7 Величина искомого тока повреждённой фазы в месте короткого замыкания определяется как сумма токов от всех источников в соответствующие моменты времени, т.е.:

$$I_{\kappa\Gamma\Sigma}^{(2)} = m^{(2)} \sum I_{1nti}$$

где коэффициент

$$m^{(1)} = \sqrt{3}$$

2.2.2.3 Двухфазное короткое замыкание на землю

1 Путём последовательного преобразования схемы замещения всех последовательностей сводятся к лучевому виду (рисунок 2.8), где количество ветвей определяется количеством источников.

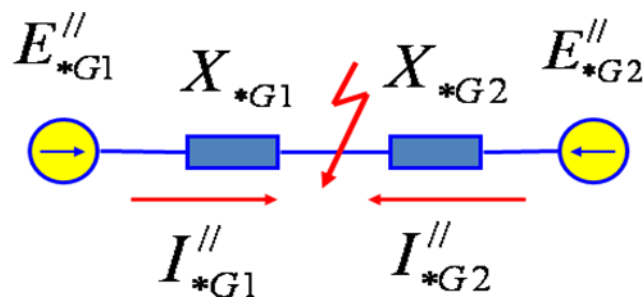


Рисунок 2.8

В результате становятся известны сопротивления различных последовательностей всех выделенных ветвей $X_{*1i}, X_{*2i}, X_{*0i}$.

2 Зная эти сопротивления, находят величину дополнительного сопротивления для каждой ветви

$$X_{*\Delta i}^{(1,1)} = \frac{X_{*2i} \cdot X_{*0i}}{X_{*2i} + X_{*0i}}.$$

3 Определяют начальное действующее значение периодической составляющей тока прямой последовательности в $\dot{i}$ - той ветви при коротком замыкании:

$$I_{*1n0(\bar{o})i} = \frac{E_{*0i}^{//}}{X_{*1i} + X_{*\Delta i}^{(1,1)}}.$$

4 По формуле

$$I_{*1n0(ном)} = I_{*1n0(\bar{o})i} \frac{S_{\bar{o}}}{S_{ГНОМі}} \frac{U_{ГНОМі}}{U_{\bar{o}}}$$

находят начальное действующее значение периодической составляющей тока прямой последовательности от источника $\dot{i}$ - той ветви, отнесённое к номинальному току машины, т.е. $I_{*1n0(ном)}$. Если $I_{*1n0(ном)} \geq 2$, то расчёт ведут с применением типовых кривых. С этой целью находят кривую, соответствующую полученному значению $I_{*n0(ном)}$ (вид типовых кривых приведен на рисунке 2.2, реальные кривые для различных генераторов смотрите в [7]). Если оно оказывается дробным числом, то его округляют до ближайшего целого числа (при небольшой разнице между дробным и целым числами) или производят интерполяцию кривых.

5 По выбранной кривой определяют отношение действующих значений периодической составляющей тока КЗ прямой последовательности

от источника i - той ветви в расчётный и начальный моменты времени, т.е. величину $\gamma_{nt} = I_{1nti} / I_{1n0i}$.

6 Определяют искомое действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания прямой последовательности от источника i - той ветви в расчётный момент времени по формуле:

$$I_{1nti} = \gamma_{nt} I_{*1n0(\delta)i} I_{\delta}.$$

В тех случаях, когда $I_{*1n0(ном)} < 2$, действующее значение периодической составляющей мало изменяется во времени и поэтому принимают $I_{1nti} = I_{1n0i}$.

7 Величина искомого тока повреждённой фазы в месте короткого замыкания определяется как сумма токов от всех источников в соответствующие моменты времени, т.е.:

$$I_{n\Sigma}^{(1,1)} = m^{(1,1)} \sum I_{1nti},$$

где коэффициент

$$m^{(1,1)} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{X_{*2i} \cdot X_{*0i}}{(X_{*2i} + X_{*0i})^2}}.$$

3 Примеры расчётов

Принципиальная схема электрической системы приведена на рисунке

3.1.

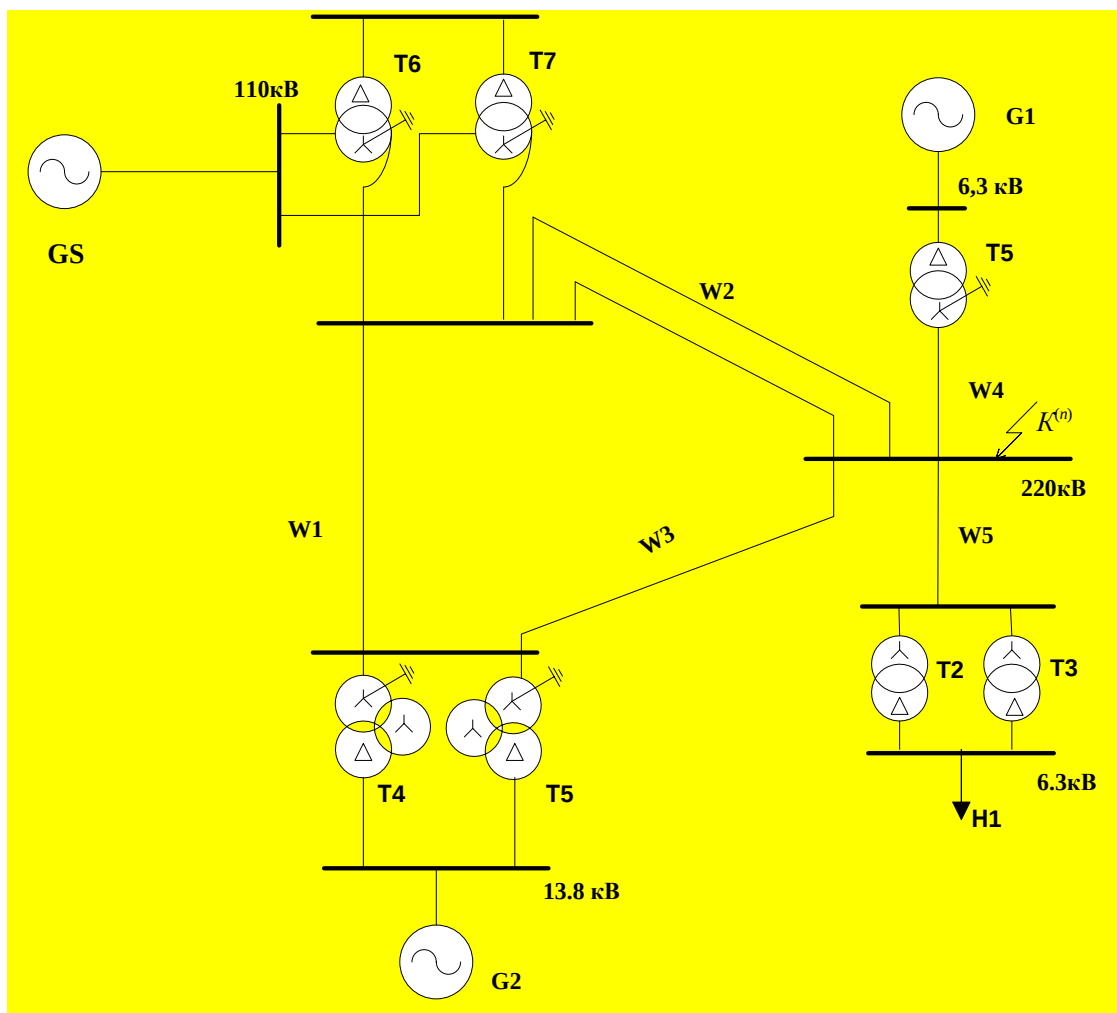


Рисунок 3.1 – Расчётная схема

Исходные данные:

Генераторы:

	S_H (MBA)	$\cos \varphi_H$	U_H (кВ)	x_d^H (o.e.)
G1	62,5	0,8	6,3	0,13
G2	100	0,9	13,8	0,22

Трансформаторы:

S _H (MBA)			U _H (кВ)			U _K %	
		B	C	H	B-C	B-H	C-H
T1	63	242	-	6,3	-	11	-
T2,3	16	230	-	6,6	-	12	-
T4,5	63	242	121	13,8	12,5	24	10.5
T6,7	250	230	121	11	10,5	22	9,5

Линии:	W1	W2	W3	W4	W5
L(км)	150	100	120	50	10

Нагрузка: H-1 S=22 MBA

Система: $S_{HGS}=2600$ MBA $x_{GS1}=0,3$ o.e. $x_{GS0}=10$ Ом.

3.1 Расчёт однофазного короткого замыкания

Расчёт производится в относительных единицах с использованием способа приближённого приведения.

3.1.1 Выбор базисных условий

Примем базисную мощность $S_b=100\text{MVA}$, а базисное напряжение $U_b=230\text{ кВ}$.

$$\text{Тогда } I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3} \cdot U_b} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 230} = 0,263 \text{ кА} \text{ и } x_b = \frac{U_b}{\sqrt{3} \cdot I_b} = \frac{230}{\sqrt{3} \cdot 0,263} = 483,527 \text{ Ом}.$$

3.1.2 Составление схемы замещения прямой последовательности

Схема составляется с учётом особенностей метода типовых кривых, указанных в п. 3.1.1. Схема изображена на рисунке 4.2.

3.1.3 Определение параметров схемы замещения прямой последовательности

Система:

$$X_1 = X_{GS1} \cdot \frac{S_b}{S_{нс}} = 0,3 \cdot \frac{100}{2500} = 0,0124;$$

Автотрансформаторы Т6,7 :

$$X_2 = X_3 = X_{ст6,7} = \frac{U_{к\%}}{100} \cdot \frac{S_b}{S_{нт}} = 0, \text{ (т.к. } U_{к\%} = 0 \text{)}.$$

$$X_4 = X_5 = X_{BT-6,7} = \frac{U_{KB\%}}{100} \cdot \frac{S_\delta}{S_{HT}} = \frac{11,5\%}{100} \cdot \frac{100}{250} = 0,046,$$

где U_{KC} и U_{KB} найдены следующим образом:

$$u_{K.B.} = 0,5 \cdot (u_{K.B-C} + u_{K.B-H} - u_{K.C-H}) = 0,5(10,5 + 22 - 9,5) = 11,5\%$$

$$u_{K.C.} = 0,5 \cdot (u_{K.B-C} + u_{K.C-H} - u_{K.B-H}) = 0,5(10,5 + 9,5 - 22) = -1\% = 0.$$

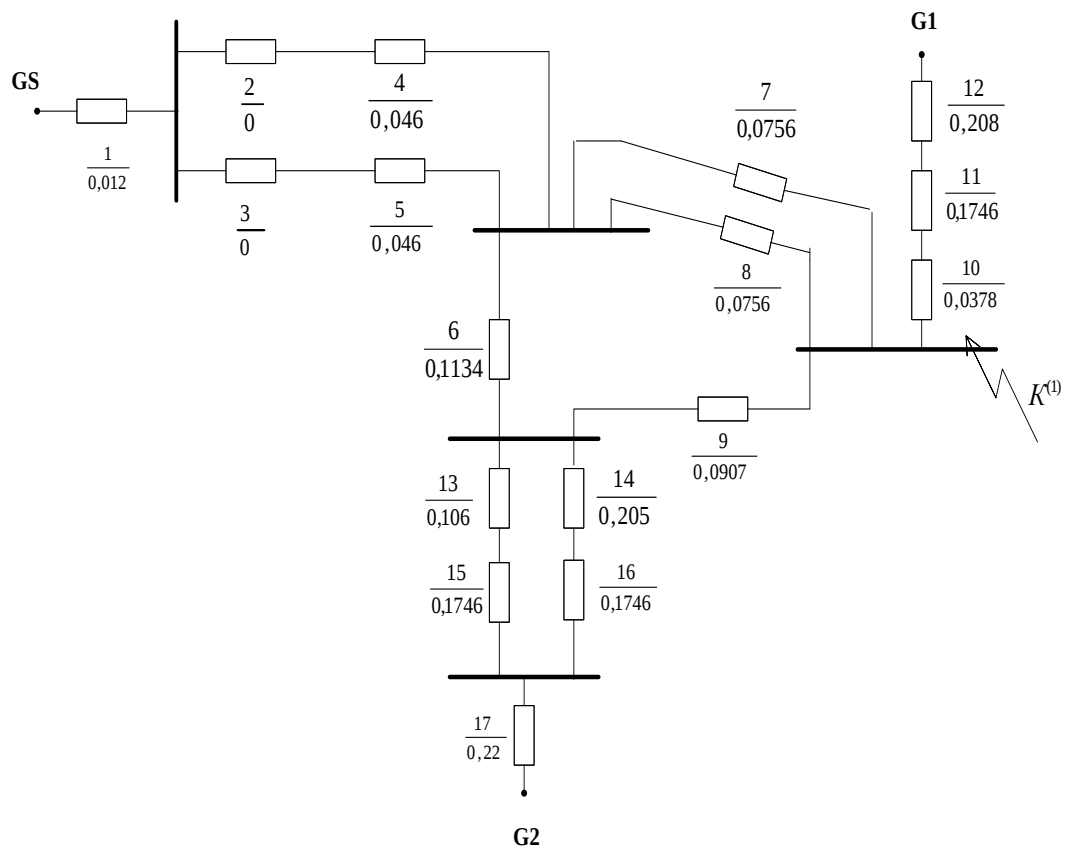


Рисунок 3.2 – Схема замещения прямой последовательности

Линии электропередач:

$$X_6 = X_{w1} = X_{0W} l \frac{S_\delta}{U_{cp\Lambda}^2} = 0,4 \cdot 150 \cdot \frac{100}{230^2} = 0,1234;$$

$$X_7 = X_8 = X_{w2} = 0,4 \cdot 100 \cdot \frac{100}{230^2} = 0,0756;$$

$$X_9 = X_{w-3} = 0,4 \cdot 120 \cdot \frac{100}{230^2} = 0,0907;$$

$$X_{10} = X_{w4} = 0,4 \cdot 50 \cdot \frac{100}{230^2} = 0,0378;$$

Трансформатор Т1:

$$X_{11} = X_{T1} = \frac{U_{к\%}}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{HT}} = \frac{11\%}{100} \cdot \frac{100}{63} = 0,1746.$$

Генератор G1:

$$X_{12} = X_{G1} = X_{d*}'' \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{HT}} = 0,13 \cdot \frac{100}{62,5} = 0,208.$$

Трансформатор Т4,5:

$$X_{13} = X_{14} = X_{BT4,5} = \frac{U_{кв\%}}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{HT}} = \frac{13}{100} \cdot \frac{100}{63} = 0,206.$$

$$X_{15} = X_{18} = X_{HT4,5} = \frac{U_{кн\%}}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{HT}} = \frac{11\%}{100} \cdot \frac{100}{63} = 0,1746.$$

$$(u_{K.B.} = 0,5 \cdot (u_{K.B-C} + u_{K.B-H} - u_{K.C-H}) = 0,5(12,5 + 24 - 10,5) = 13\%$$

$$u_{K.C.} = 0,5 \cdot (u_{K.B-H} + u_{K.C-H} - u_{K.B-C}) = 0,5(24 + 10,5 - 12,5) = 11\%).$$

Генератор G2 :

$$X_{17} = X_{G2} = X_{d*}'' \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{HT}} = 0,22 \cdot \frac{100}{100} = 0,22.$$

Полученные результаты вносятся в схему замещения, приведенную на рисунке 3.2.

3.1.4 Преобразование схемы замещения прямой последовательности и определение взаимных сопротивлений между источниками и точкой КЗ

$$X_{21} = X_{22} = X_{13} + X_{15} = 0,206 + 0,1746 = 0,9806 :$$

$$X_{23} = X_{24} = X_2 + X_4 = 0 + 0,046 = 0,046 :$$

$$X_{25} = X_7 // X_8 = \frac{0,0756}{2} = 0,0378 :$$

$$X_{26} = X_{10} + X_{11} + X_{12} = 0,0378 + 0,1746 + 0,208 = 0,4204:$$

Получится схема, показанная на рисунке 3.3.

Дальнейшее преобразования очевидны:

$$X_{27} = X_{21} // X_{22} = \frac{0,3806}{2} = 0,1903.$$

$$X_{28} = X_{23} // X_{24} = \frac{0,046}{2} = 0,023.$$

Треугольник $X_6 - X_9 - X_{25}$ преобразуем в звезду $X_{30} - X_{31} - X_{32}$:

$$X_{30} = \frac{X_6 \cdot X_{25}}{X_6 + X_{25} + X_9} = \frac{0,1134 \cdot 0,0378}{0,1134 + 0,0378 + 0,0907} = 0,0177.$$

$$X_{31} = \frac{X_{25} \cdot X_9}{X_6 + X_{25} + X_9} = \frac{0,0378 \cdot 0,0907}{0,1134 + 0,0378 + 0,0907} = 0,0142;$$

$$X_{32} = \frac{X_9 \cdot X_6}{X_6 + X_{25} + X_9} = \frac{0,0907 \cdot 0,1134}{0,1134 + 0,0378 + 0,0907} = 0,0425;$$

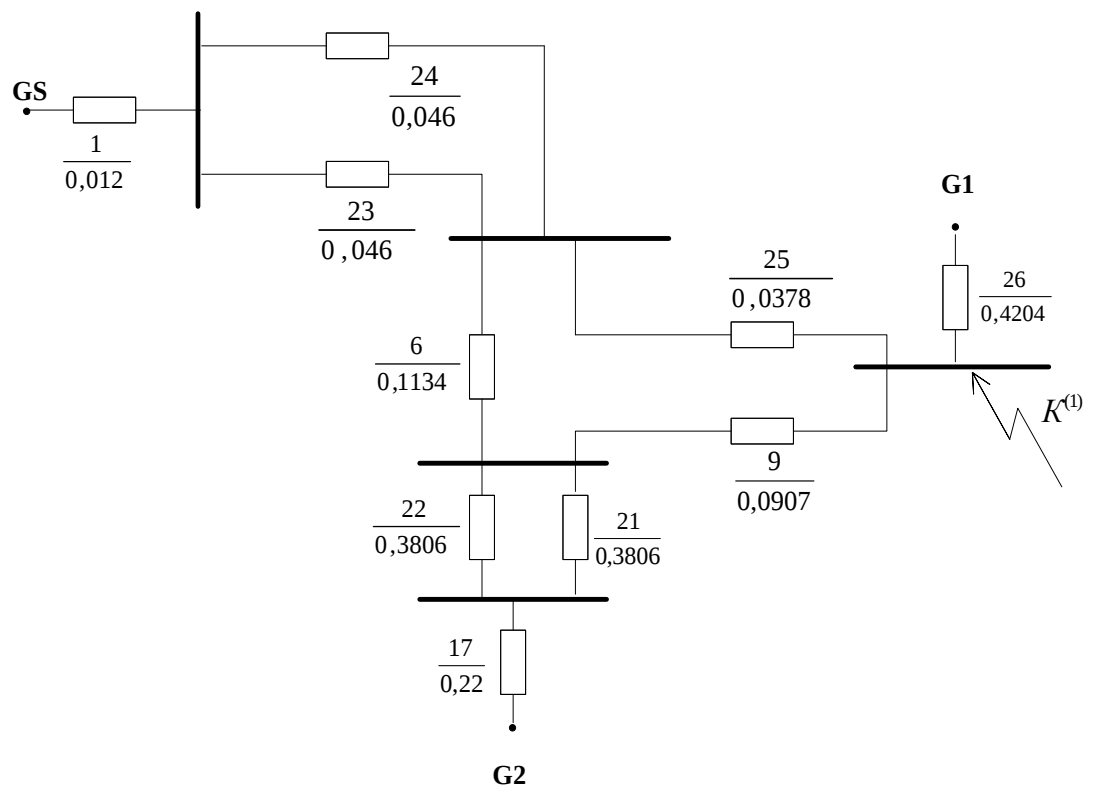


Рисунок 3.3

$$X_{33} = X_1 + X_{28} + X_{30} = 0,012 + 0,023 + 0,0177 = 0,0527;$$

$$X_{34} = X_{17} + X_{27} + X_{32} = 0,22 + 0,1903 + 0,0425 = 0,4528$$

Схема приобретает вид, как показано на рисунке 3.4.

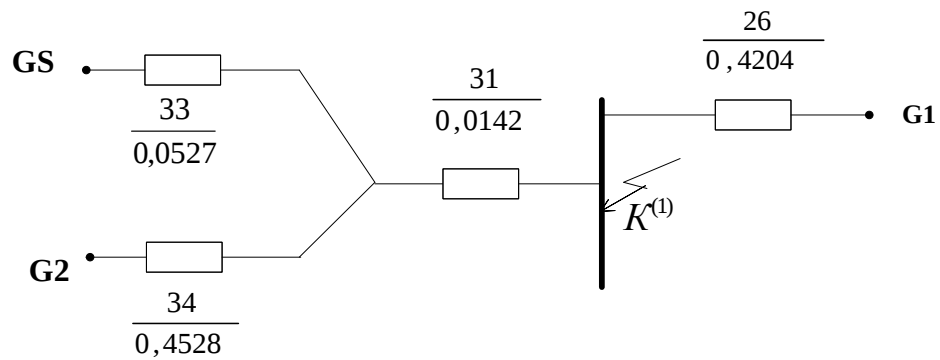


Рисунок 3.4

При выполнении расчёта неодинаково удалённые генераторы и система выделяются в отдельные ветви, как показано на рисунке 5.5. Для замены сопротивлений X_{31}, X_{33} и X_{34} сопротивлениями X_{35} и X_{36} можно воспользоваться формулой преобразования звезды в эквивалентный треугольник (сторона треугольника, заключённая между источниками, не учитывается).

$$X_{35} = X_{33} + X_{31} + \frac{X_{33} \cdot X_{31}}{X_{34}} = 0,0527 + 0,0142 + \frac{0,0527 \cdot 0,0142}{0,4528} = 0,0686;$$

$$X_{36} = X_{34} + X_{31} + \frac{X_{34} \cdot X_{31}}{X_{33}} = 0,4528 + 0,0142 + \frac{0,4528 \cdot 0,0142}{0,0527} = 0,588.$$

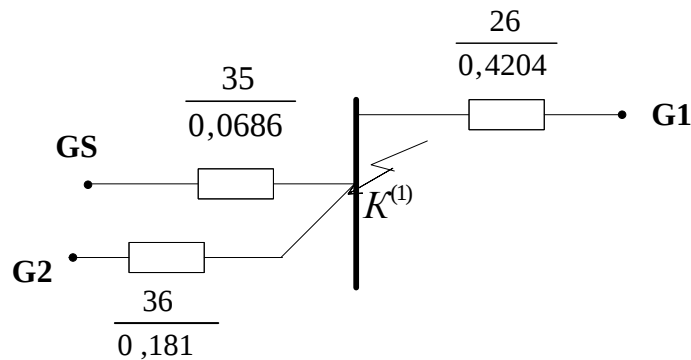


Рисунок 3.5

Взаимные сопротивления от системы и второго генератора до точки КЗ могут быть определены и с помощью коэффициентов распределения C , показывающих долю участия каждого источника в общем токе КЗ [1].

$$C_{G2} = \frac{X_{33} // X_{34}}{X_{34}} = \frac{0,0527 \cdot 0,4528}{(0,0527 + 0,4528) \cdot 0,4528} = 0,104$$

$$C_{GS} = \frac{X_{33} // X_{34}}{X_{33}} = \frac{0,0527 \cdot 0,4528}{(0,0527 + 0,4528) \cdot 0,0527} = 0,896;$$

При правильно определённых коэффициентах распределения их сумма должна равняться единице, т.е. $C_{GS} + C_{G2} = 1$.

$$X_3 = (X_{33} // X_{34}) + X_{31} = 0,0142 + \frac{0,0527 \cdot 0,4528}{0,0527 + 0,4528} = 0,061;$$

$$X_{35} = X_{\Sigma GS} = \frac{X_3}{C_{GS}} = \frac{0,061}{0,896} = 0,068;$$

$$X_{36} = X_{\Sigma G2} = \frac{X_3}{C_{G2}} = \frac{0,061}{0,104} = 0,587;$$

3.1.5 Определение суммарного сопротивления схемы замещения прямой последовательности

$$X_{\Sigma 1} = \frac{1}{\frac{1}{X_{35}} + \frac{1}{X_{36}} + \frac{1}{X_{26}}} = \frac{1}{\frac{1}{0,068} + \frac{1}{0,587} + \frac{1}{0,4204}} = 0,053.$$

3.1.6 Составление схемы замещения обратной последовательности

Если пренебречь различиями в схемах прямой и обратной последовательностей, то можно считать, что суммарные сопротивления этих схем одинаковы, т.е.

$$X_{\Sigma 2} = X_{\Sigma 1} = 0,053.$$

Итоговая же схема обратной последовательности будет аналогична схеме прямой последовательности (рисунок 3.6).

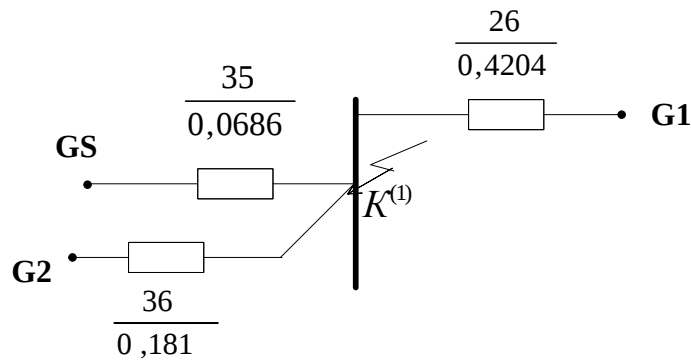


Рисунок 3.6

3.1.7 Составление схемы замещения нулевой последовательности

Схема нулевой последовательности составляется в соответствии с принципами и рекомендациями, приведенными в п. 3.1.3. Вид схемы показан на рисунке 3.7.

3.1.8 Определение параметров схемы замещения нулевой последовательности

Сопротивление системы:

$$X_1 = \frac{X_{GS0}}{X_{\sigma}} = \frac{10 \text{ Ом}}{483,527 \text{ Ом}} = 0,021;$$

Сопротивления трансформаторов те же, что и в схеме прямой последовательности. Необходимо лишь определить дополнительно сопротивление обмоток низшего напряжения автотрансформаторов:

$$X_{16} = X_{17} = \frac{u_{кн}}{100} \cdot \frac{S_{\sigma}}{S_n} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{250} = 0,042.$$

Сопротивление линий электропередачи:

$$X_6 = 2 \cdot X_{6(1)} = 2 \cdot 0,1134 = 0,2268;$$

$$X_7 = X_8 = 3 \cdot X_{7(1)} = 3 \cdot 0,0756 = 0,2268;$$

$$X_9 = 2 \cdot X_{9(1)} = 2 \cdot 0,0907 = 0,1814;$$

$$X_{10} = 2 \cdot X_{10(1)} = 2 \cdot 0,0378 = 0,0756,$$

где $X_{6(1)}, X_{7(1)}, X_{9(1)}, X_{10(1)}$ - сопротивления линий из схемы прямой последовательности.

3.1.9 Упрощение схемы замещения нулевой последовательности

После ряда очевидных преобразований получится схема, показанная на рисунке 3.8.

$$X_{18} = X_{16} // X_{17} = \frac{0,042}{2} = 0,021;$$

$$X_{19} = X_4 // X_5 = \frac{0,046}{2} = 0,023;$$

$$X_{21} = X_7 // X_8 = \frac{0,2268}{2} = 0,1134;$$

$$X_{22} = X_{11} + X_{10} = 0,1746 + 0,0756 = 0,2502.$$

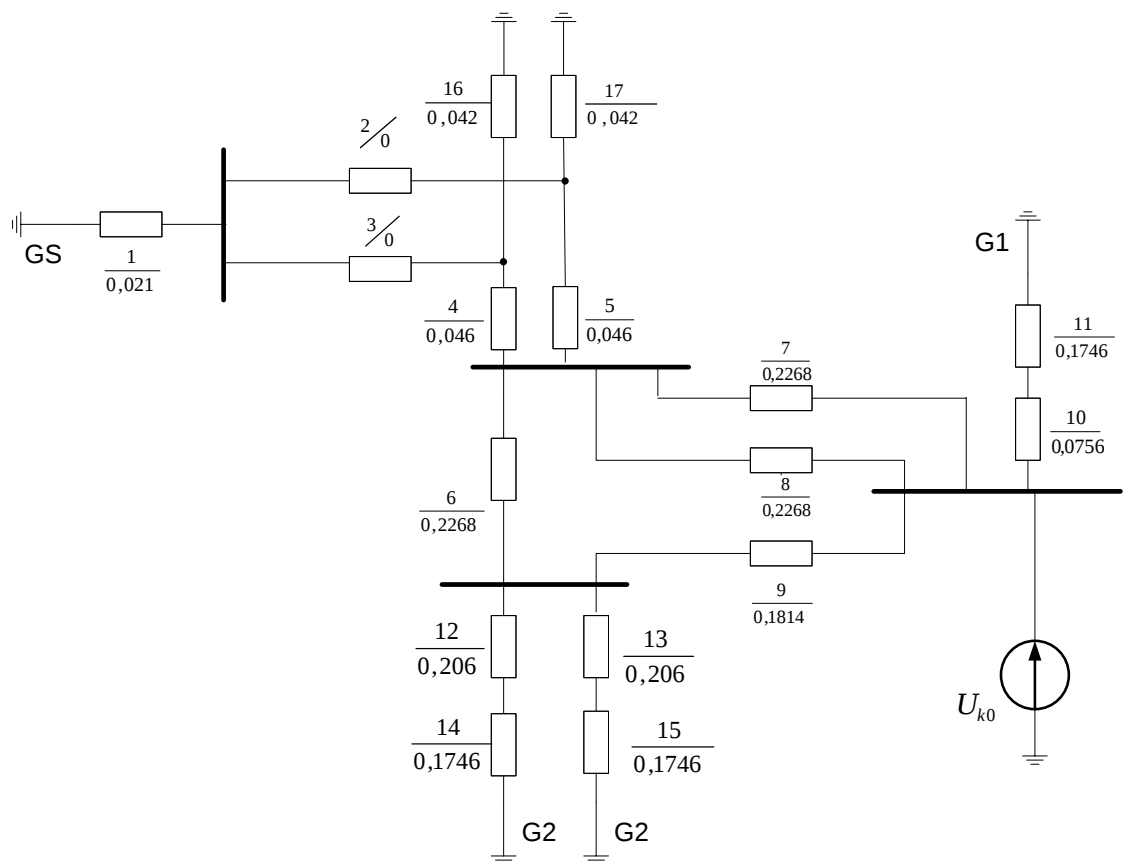


Рисунок 3.7 – Схема замещения нулевой последовательности

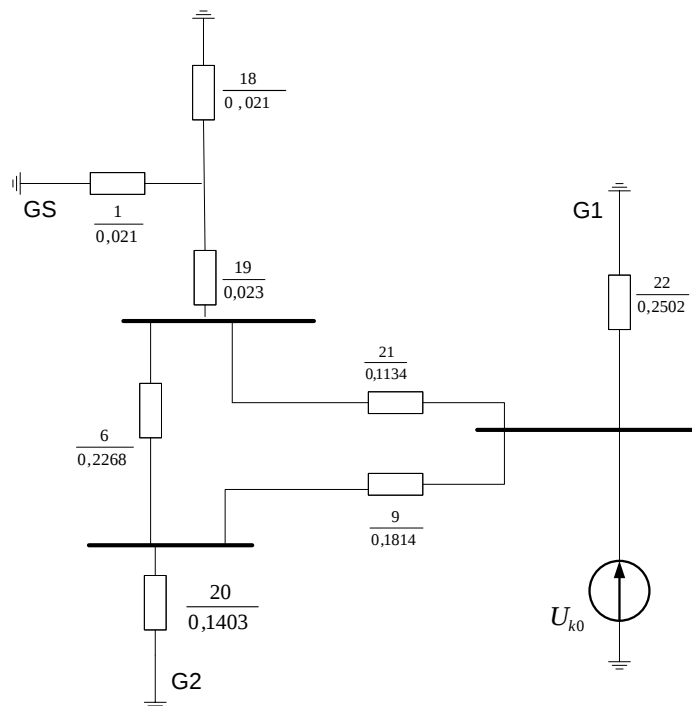


Рисунок 3.8

Сопротивление X_{18} объединяется с ветвью системы:

$$X_{23} = \frac{X_1 \cdot X_{18}}{X_1 + X_{18}} + X_{19} = \frac{0,021 \cdot 0,021}{0,021 + 0,021} + 0,023 = 0,0335;$$

Треугольник X_6, X_{21}, X_9 заменяется эквивалентной звездой

X_{24}, X_{25}, X_{26} и одновременно складываются последовательно соединённые сопротивления.

$$X_{24} = \frac{X_6 \cdot X_{21}}{X_6 + X_{21} + X_9} = \frac{0,2268 \cdot 0,1134}{0,2268 + 0,1134 + 0,1814} = 0,049;$$

$$X_{25} = \frac{X_6 \cdot X_9}{X_6 + X_{21} + X_9} = \frac{0,2268 \cdot 0,1814}{0,2268 + 0,1134 + 0,1814} = 0,079;$$

$$X_{26} = \frac{X_9 \cdot X_{21}}{X_6 + X_{21} + X_9} = \frac{0,1814 \cdot 0,1134}{0,2268 + 0,1134 + 0,1814} = 0,039;$$

$$X_{27} = X_{23} + X_{24} = 0,0335 + 0,049 = 0,0825;$$

$$X_{28} = X_{20} + X_{25} = 0,1403 + 0,079 = 0,2193.$$

В результате получается схема, приведенная на рисунке 3.9.

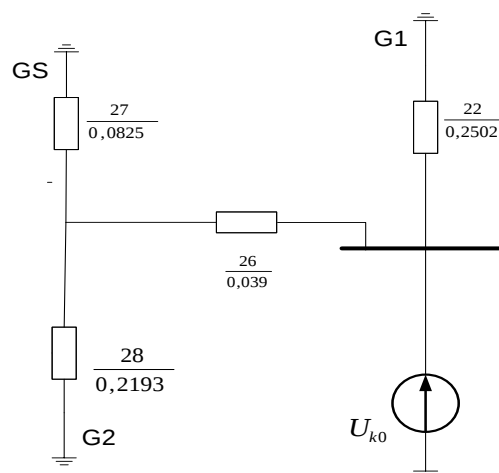


Рисунок 3.9

Итоговая схема замещения показана на рисунке 3.10, где:

$$X_{29} = X_{27} + X_{26} + \frac{X_{27} \cdot X_{26}}{X_{28}} = 0,0825 + 0,039 + \frac{0,0825 \cdot 0,039}{0,2193} = 0,136;$$

$$X_{30} = X_{28} + X_{26} + \frac{X_{28} \cdot X_{26}}{X_{27}} = 0,2193 + 0,039 + \frac{0,2193 \cdot 0,039}{0,0825} = 0,361.$$

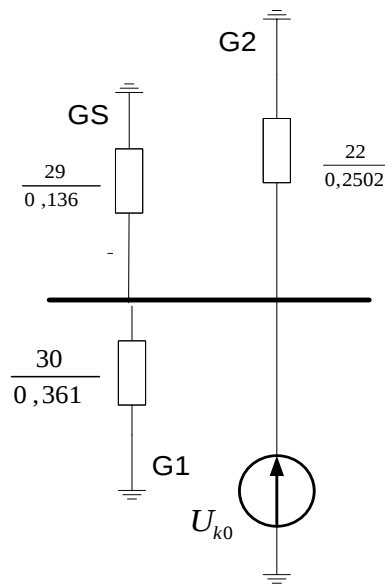


Рисунок 3.10

Суммарное сопротивление схемы нулевой последовательности:

$$X_{0\Sigma} = \frac{1}{\frac{1}{X_{22}} + \frac{1}{X_{29}} + \frac{1}{X_{30}}} = \frac{1}{\frac{1}{0,2502} + \frac{1}{0,136} + \frac{1}{0,361}} = 0,071.$$

3.1.10 Определение результирующих сопротивлений по ветвям

$$X_{pezG1}^{(1)} = X_{26(1)} + X_{\Delta G1}^{(1)} = X_{26(1)} + (X_{26(2)} + X_{30(0)}) = \\ = 0,4204 + (0,4204 + 0,361) = 1,202;$$

$$X_{pezG2}^{(1)} = X_{36(1)} + X_{\Delta G2}^{(1)} = X_{36(1)} + (X_{36(2)} + X_{22(0)}) = \\ = 0,181 + (0,181 + 0,2502) = 0,612;$$

$$X_{pezGS}^{(1)} = X_{35(1)} + X_{\Delta GS}^{(1)} = X_{35(1)} + (X_{35(2)} + X_{29(0)}) = \\ = 0,0686 + (0,0686 + 0,136) = 0,273.$$

В приведенных выражениях нижние индексы в скобках при сопротивлениях означают принадлежность к схеме замещения соответствующей последовательности.

3.1.11 Определение токов прямой последовательности от каждого источника в начальный момент времени

Ток от системы принимается неизменным во времени и определяется по формуле:

$$I_{*nt1GS}^{(1)} = \frac{1}{X_{pezGS}^{(1)}} = \frac{1}{0,273} = 3,663.$$

Токи от генераторов:

$$I_{*nt1G1}^{(1)} = \frac{1}{X_{pezG1}^{(1)}} = \frac{1}{1,202} = 0,832.$$

$$I_{*nt1G2}^{(1)} = \frac{1}{X_{pezG2}^{(1)}} = \frac{1}{0,612} = 1,634.$$

3.1.12 Оценка удалённости генераторов от места КЗ

$$I_{*1G1n0(ном)} = I_{*nt1G1} \frac{S_{\bar{o}}}{S_{G1ном}} \frac{U_{G1ном}}{U_{\bar{o}}} = 0,832 \cdot \frac{100}{62,5} \cdot \frac{6,3}{230} = 0,036 < 2.$$

$$I_{*1G2n0(ном)} = I_{*nt1G2} \frac{S_{\bar{o}}}{S_{G2ном}} \frac{U_{G2ном}}{U_{\bar{o}}} = 1,634 \cdot \frac{100}{100} \cdot \frac{13,8}{230} = 0,098 < 2.$$

Таким образом, оба генератора значительно удалены от места КЗ и ток от них может быть принят неизменным во времени и равным току в начальный момент короткого замыкания.

3.1.13 Определение суммарного тока прямой последовательности

$$\begin{aligned} I_{nt1\Sigma}^{(1)} &= I_{n01\Sigma}^{(1)} = (I_{*nt1G1}^{(1)} + I_{*nt1G2}^{(1)} + I_{*nt1GS}^{(1)}) \cdot I_{\bar{o}} = \\ &= (0,832 + 1,634 + 3,663) \cdot 0,263 = 1,61 \text{ кА}. \end{aligned}$$

3.1.14 Определение фазных токов в месте короткого замыкания

Т.к. при однофазном КЗ токи в неповреждённых фазах В и С отсутствуют, то определению подлежит ток только в фазе А, который может быть найден по выражению:

$$I_{ntA\Sigma}^{(1)} = m^{(1)} \cdot I_{*nt1\Sigma}^{(1)} = 3 \cdot 1,61 = 4,83 \text{ кА}.$$

3.1.14 Определение напряжений в месте короткого замыкания

При однофазном КЗ напряжение в повреждённой фазе отсутствует, поэтому определяются напряжения в фазах В и С.

3.1.14.1 Расчёт начинается с определения напряжения **прямой последовательности**, которое в рассматриваемом примере находится только для начального момента КЗ ($t=0$):

$$\begin{aligned} U_{\kappa 0 A1}^{(1)} &= I_{n01\Sigma}^{(1)} \cdot X_{\Delta}^{(1)} \cdot X_{\bar{o}} = I_{n01\Sigma}^{(1)} \cdot (X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 0}) \cdot X_{\bar{o}} = \\ &= 1,61 \cdot (0,053 + 0,071) \cdot 483,527 = 95,81 \text{ кВ}. \end{aligned}$$

Напряжения обратной и нулевой последовательностей определяются в соответствии с выражениями второго закона Кирхгофа:

$$\begin{aligned} U_{\kappa 0 A2}^{(1)} &= -I_{n02\Sigma}^{(1)} \cdot X_{\Sigma 2} \cdot X_{\bar{o}} = -I_{n01\Sigma}^{(1)} \cdot X_{\Sigma 2} \cdot X_{\bar{o}} = \\ &= -1,61 \cdot 0,053 \cdot 483,527 = 40,95 \text{ кВ}; \\ U_{\kappa 0 A0}^{(1)} &= -I_{n00\Sigma}^{(1)} \cdot X_{\Sigma 0} \cdot X_{\bar{o}} = -I_{n01\Sigma}^{(1)} \cdot X_{\Sigma 0} \cdot X_{\bar{o}} = \\ &= -1,61 \cdot 0,071 \cdot 483,527 = 54,86 \text{ кВ}; \end{aligned}$$

3.1.14.2 **Фазные напряжения** рассчитываются по известным из метода симметричных составляющих, выражениям:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\kappa 0 B}^{(1)} &= a^2 U_{\kappa 0 A1}^{(1)} + a U_{\kappa 0 A2}^{(1)} + U_{\kappa 0 A0}^{(1)} = (-0,5 - j0,866) \cdot 95,81 + \\ &+ (-0,5 + j0,866) \cdot (-40,95) + (-54,86) = -45,42 - j78,667 + \\ &+ 16,735 - j27,253 - 54,86 = -88,055 - j105,92; \\ \dot{U}_{\kappa 0 C}^{(1)} &= a U_{\kappa 0 A1}^{(1)} + a^2 U_{\kappa 0 A2}^{(1)} + U_{\kappa 0 A0}^{(1)} = (-0,5 + j0,866) \cdot 95,81 + \\ &+ (-0,5 - j0,866) \cdot (-40,95) + (-54,86) = -45,42 + j78,667 + \\ &+ 16,735 + j27,253 - 54,86 = -88,055 + j105,92; \end{aligned}$$

Модули фазных напряжений:

$$|U_{\kappa 0B}^{(1)}| = |U_{\kappa 0C}^{(1)}| = \sqrt{(88,055)^2 + (105,92)^2} = 137,741 \text{ кВ.}$$

3.2 Расчёт двухфазного короткого замыкания на землю

Большая часть этого расчёта совпадает с расчётом однофазного КЗ (до п. 3.1.10) и поэтому здесь не приводится. Различия появляются на стадии определения и использования дополнительного сопротивления $X_{\Lambda}^{(n)}$. Поэтому расчёт начинается с определения сопротивлений, связывающих источники с местом КЗ.

3.2.1 Определение результирующих сопротивлений по ветвям

$$\begin{aligned} X_{\text{рез}G1}^{(1,1)} &= X_{26(1)} + X_{\Delta G1}^{(1,1)} = X_{26(1)} + (X_{26(2)} // X_{30(0)}) = \\ &= 0,4204 + \left(\frac{0,4204 \cdot 0,361}{0,4204 + 0,361} \right) = 0,614; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{\text{рез}G2}^{(1,1)} &= X_{36(1)} + X_{\Delta G2}^{(1,1)} = X_{36(1)} + (X_{36(2)} // X_{22(0)}) = \\ &= 0,181 + \left(\frac{0,181 \cdot 0,2502}{0,181 + 0,2502} \right) = 0,286; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{\text{рез}GS}^{(1,1)} &= X_{35(1)} + X_{\Delta GS}^{(1,1)} = X_{35(1)} + (X_{35(2)} // X_{29(0)}) = \\ &= 0,0686 + \left(\frac{0,0686 \cdot 0,136}{0,0686 + 0,136} \right) = 0,114. \end{aligned}$$

3.2.2 Определение токов прямой последовательности от каждого источника в начальный момент времени

Ток от системы принимается неизменным во времени и определяется по формуле:

$$I_{*nt1GS}^{(1,1)} = \frac{1}{X_{резGS}^{(1,1)}} = \frac{1}{0,114} = 8,77.$$

Токи от генераторов:

$$I_{*nt1G1}^{(1,1)} = \frac{1}{X_{резG1}^{(1,1)}} = \frac{1}{0,614} = 1,628.$$

$$I_{*nt1G2}^{(1,1)} = \frac{1}{X_{резG2}^{(1,1)}} = \frac{1}{0,286} = 3,496.$$

3.2.3 Оценка удалённости генераторов от места КЗ

$$I_{*1G1n0(ном)} = I_{*nt1G1} \frac{S_{\bar{o}}}{S_{G1ном}} \frac{U_{G1ном}}{U_{\bar{o}}} = 1,628 \cdot \frac{100}{62,5} \cdot \frac{6,3}{230} = 0,071 < 2.$$

$$I_{*1G2n0(ном)} = I_{*nt1G2} \frac{S_{\bar{o}}}{S_{G2ном}} \frac{U_{G2ном}}{U_{\bar{o}}} = 3,496 \cdot \frac{100}{100} \cdot \frac{13,8}{230} = 0,209 < 2.$$

Таким образом, оба генератора значительно удалены от места КЗ и ток от них может быть принят неизменным во времени и равным току в начальный момент короткого замыкания.

3.2.4 Определение суммарного тока прямой последовательности

$$\begin{aligned} I_{nt1\Sigma}^{(1,1)} &= I_{n01\Sigma}^{(1,1)} = (I_{*nt1G1}^{(1,1)} + I_{*nt1G2}^{(1,1)} + I_{*nt1GS}^{(1,1)}) \cdot I_{\bar{o}} = \\ &= (1,628 + 3,496 + 8,77) \cdot 0,263 = 3,654 \text{ кА}. \end{aligned}$$

3.2.5 Определение фазных токов в месте короткого замыкания

Т.к. при двухфазном КЗ на землю токи в неповреждённой фазе А отсутствуют, то определению подлежат токи в фазах В и С, модули которых могут быть найдены по выражению:

$$I_{ntB\Sigma}^{(1,1)} = I_{ntC\Sigma}^{(1,1)} = m^{(1,1)} \cdot I_{nt1\Sigma}^{(1,1)}.$$

Коэффициент пропорциональности $m^{(1,1)}$ определяется по выражению, приведенному в таблице 2:

$$m^{(1,1)} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{X_{\Sigma 2} \cdot X_{\Sigma 0}}{(X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 0})^2}} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{0,053 \cdot 0,071}{(0,053 + 0,071)^2}} = 1,505.$$

Тогда:

$$I_{ntB\Sigma}^{(1,1)} = I_{ntC\Sigma}^{(1,1)} = m^{(1,1)} \cdot I_{nt1\Sigma}^{(1,1)} = 1,505 \cdot 3,654 = 5,499 \text{ кА}.$$

3.2.5 Определение напряжений в месте короткого замыкания

При двухфазном КЗ напряжение в повреждённых фазах отсутствует, поэтому определяются напряжение только в фазе А.

3.2.5.1 Расчёт начинается с определения напряжения **прямой последовательности**, которое в рассматриваемом примере находится только для начального момента КЗ ($t=0$):

$$\begin{aligned} U_{\kappa 0 A1}^{(1,1)} &= I_{n01\Sigma}^{(1,1)} \cdot X_{\Delta}^{(1,1)} \cdot X_{\sigma} = I_{n01\Sigma}^{(1,1)} \cdot (X_{\Sigma 2} // X_{\Sigma 0}) \cdot X_{\sigma} = \\ &= 3,654 \cdot \left(\frac{0,053 \cdot 0,071}{0,053 + 0,071} \right) \cdot 483,527 = 53,896 \text{ кВ}. \end{aligned}$$

3.2.5.2 Ввиду равенства симметричных составляющих напряжения при этом виде КЗ **фазное напряжение** в фазе А может быть найдено по простому выражению:

$$U_{\kappa 0A}^{(1,1)} = 3 \cdot U_{\kappa 0A1}^{(1,1)} = 3 \cdot 53,896 = 161,687 \text{ кВ.}$$

3.3 Расчёт трёхфазного короткого замыкания

На рисунке 3.11 приведена схема электрической системы. Автотрансформатор Т1 связан с крупной энергосистемой. Электростанция, состоящая из турбогенераторов G1 и G2, подключена к автотрансформатору Т2. Синхронные компенсаторы GC1 и GC2 связаны с трансформатором ТЗ, имеющим расщепленную обмотку низкого напряжения.

Входящие в схему элементы состоят из:

- турбогенераторов G1 и G2, имеющих одинаковую мощность $S_{G.ном} = 235 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ с $\cos \varphi = 0,85$, напряжением $U = 15,75 \text{ кВ}$ и сопротивлением $X_d'' = 0,19$;
- системы (источника бесконечной мощности с неизменным напряжением);
- синхронных компенсаторов GC1 и GC2 одинаковой мощности $S_{GC.ном} = 30 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, с напряжением $U = 10,5 \text{ кВ}$ и сопротивлением $X_d'' = 0,22$;
- автотрансформатора Т1 мощностью $S_{Т.ном} = 400 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ с напряжениями обмоток 525/330/11 кВ и короткого замыкания $u_{н.В-С} = 11\%$, $u_{н.В-Н} = 35\%$, $u_{н.С-Н} = 10\%$;
- автотрансформатора Т2 мощностью $S_{Т.ном} = 500 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ с напряжением обмоток 347/121/15,75 кВ и $u_{н.В-С} = 10\%$, $u_{н.В-Н} = 20\%$, $u_{н.С-Н} = 10\%$;
- трансформатор ТЗ мощностью $S_{Т.ном} = 80 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ с напряжением обмоток 110/11 кВ и $u_H = 10,5\%$;
- одноцепной линии W1 длиной 280 км с $X_{1км} = 0,322 \text{ Ом/км}$;
- двухцепной линии W2 длиной 20 км с проводами АС-150;

- нагрузок Н1 и Н2, имеющих одинаковую времени отключения КЗ т мощность 36 МВА, и Н3, Н4 и Н5, имеющих мощности 60, 20, 85 МВА.

Необходимо найти величину тока при трехфазном КЗ в точке k и изменения во времени результирующего тока КЗ и тока от генераторов электростанции и синхронных компенсаторов.

Решение. ***Последовательность расчета задана в алгоритме, приведенном в таблице 3.5.***

1 Выбранный метод расчета показывает, что при решении поставленной задачи нужно использовать оба приема (см. п. 1а, 1б). Так как синхронные компенсаторы имеют достаточно большую мощность, их можно принять за источники при КЗ в точке k (источник справа). Учитывая, что они радиально связаны с местом КЗ, расчет проводится по первому приему последовательно по п. 1а, 2, 3, 5, 7, 10, 12.

Слева от места КЗ находятся два источника - электростанция и система (источник неизменного напряжения), связанные с местом КЗ общими сопротивлениями линии W2 и автотрансформатора Т2. Следовательно, расчет тока КЗ от этой части системы в данном случае проводится по второму приему последовательно по п. 1б, 2, 4, 6, 8, 9, 11, 13.

Общий ток в месте КЗ будет равен сумме токов от обеих частей энергосистемы - левой и правой.

2. Схема замещения для начального режима представлена на рисунке 3.12, а. При использовании типовых кривых схема обычно составляется без учета нагрузок. Расчет производится с использованием способа приближенного приведения. Поэтому сопротивления элементов схемы замещения будем определять в именованных единицах, приводя их к среднему номинальному напряжению ступени КЗ, равному 115 кВ. Для этого находим напряжения КЗ отдельных обмоток автотрансформаторов аналогично (1.29):

для Т1:

$$u_{K.B.} = 0,5 \cdot (u_{K.B-C} + u_{K.B-H} - u_{K.C-H}) = 0,5(11 + 35 - 20) = 13\% ;$$

$$u_{K.C.} = 0,5 \cdot (u_{K.B-C} + u_{K.C-H} - u_{K.B-H}) = 0,5(11 + 20 - 35) = -2\% ;$$

$$u_{K.H} = 0,5 \cdot (u_{K.B-H} + u_{K.C-H} - u_{K.B-C}) = 0,5(35 + 20 - 11) = 22\% ;$$

для T2:

$$u_{K.B.} = 0,5(10 + 20 - 10) = 10\% ;$$

$$u_{K.C.} = 0,5(10 + 10 - 20) = 0\% ;$$

$$u_{K.H} = 0,5(20 + 10 - 10) = 10\% .$$

Для трансформатора T3 с расщеплённой обмоткой приближенно можно принять: $X_{H1} = X_{H2} = 2X_{B-H} = 2u_K = 2 \cdot 10,5 = 21\%$ (X_{H1} и X_{H2} - индуктивные сопротивления расщепленных частей обмотки низшего напряжения).

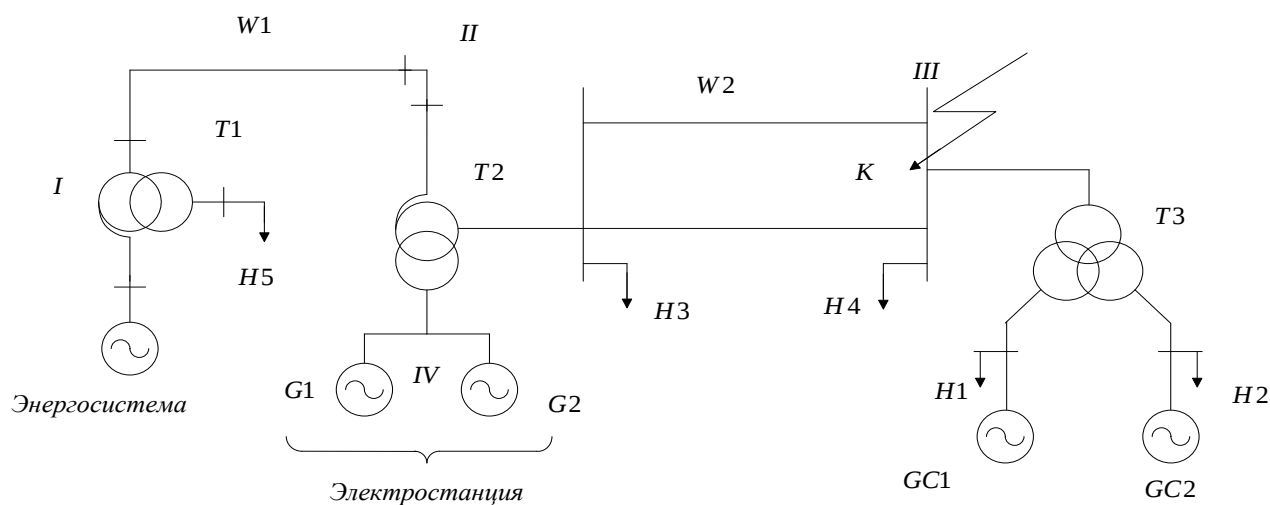


Рисунок 3.11- Расчётная схема системы

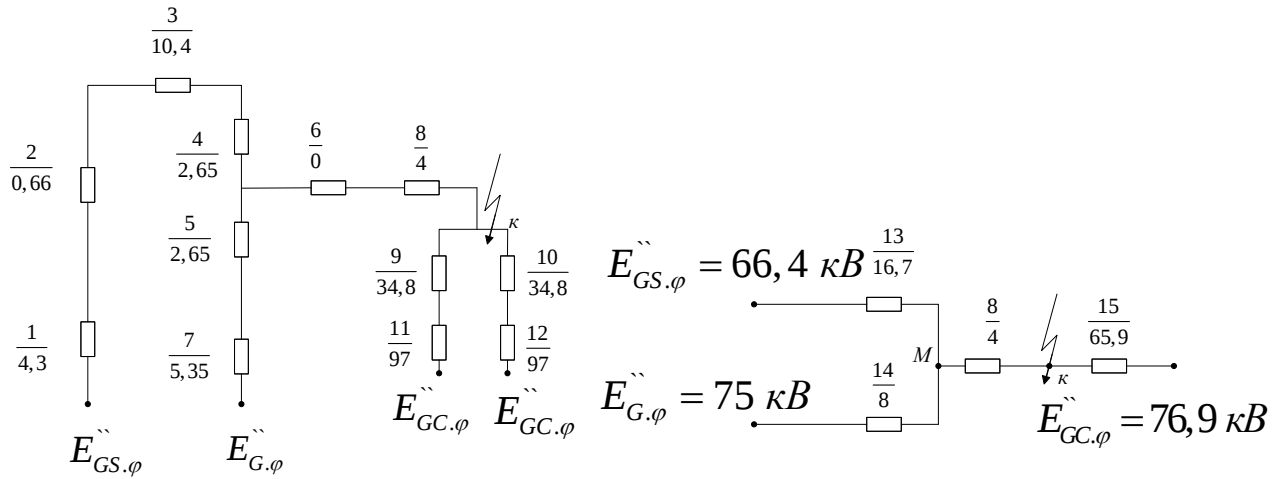


Рисунок 3.12, а - Исходная схема замещения Рисунок 3.12, б - Итоговая схема замещения

Определяем сопротивления элементов схемы:

$$X_1 = \frac{u_{K.B} \% U_{\text{ср.номIII}}}{100 S_{\text{атр.ном}}} = \frac{13 \cdot 115^2}{100 \cdot 400} = 4,3 \text{ Ом};$$

$$X_2 = \frac{u_{K.C} \% U_{\text{ср.номIII}}}{100 S_{\text{атр.ном}}} = \frac{-2 \cdot 115^2}{100 \cdot 400} = -0,66 \text{ Ом};$$

$$X_3 = X_{1\text{км}} I_{\text{км}} \left(U_{\text{ср.номIII}} / U_{\text{ср.номII}} \right)^2 = 0,322 \cdot 280 (115 / 340)^2 = 10,4 \text{ Ом};$$

$$X_4 = X_{1\text{км}} I_{\text{км}} \left(U_{\text{ср.номIII}} / U_{\text{ср.номII}} \right)^2 = 10 \cdot 115^2 (100 \cdot 500) = 2,65 \text{ Ом};$$

$$X_5 = X_{1\text{км}} I_{\text{км}} \left(U_{\text{ср.номIII}} / U_{\text{ср.номII}} \right)^2 = 10 \cdot 115^2 (100 \cdot 500) = 2,65 \text{ Ом}; \quad X_6 = 0;$$

$$X_7 = \frac{1}{2} X_d'' \frac{U_{\text{ср.номIII}}^2}{S_{G.\text{ном}}} = \frac{0,19 \cdot 115^2}{2 \cdot 235} = 5,35 \text{ Ом};$$

$$X_8 = 0,5 X_{1\text{км}} I_{\text{км}} = 0,5 \cdot 0,4 \cdot 20 = 4 \text{ Ом};$$

$$X_9 = X_{10} = \frac{2 u_{K\%} \cdot U_{\text{ср.номIII}}^2}{100 \cdot S_{TP.\text{ном}}} = \frac{2 \cdot 10,5 \cdot 115^2}{100 \cdot 80} = 34,8 \text{ Ом};$$

$$X_{11} = X_{12} = X_{с.к} = X_d'' U_{\text{ср.номIII}}^2 / S_{с.к.\text{ном}} = 0,22 \cdot 115^2 / 30 = 97 \text{ Ом}.$$

Сверхпереходные ЭДС, согласно таблице Б-1, для энергосистемы принимаем $E_{c*}'' = 1$, для синхронного генератора - $E_{G*}'' = 1,13$, для синхронного компенсатора - $E_{GC*}'' = 1,2$.

Находим фазные значения сверхпереходных ЭДС в именованных единицах, приведенные к месту КЗ:

$$E_{GS.\phi}'' = E_{GS*}'' U_{cp.номIII} / \sqrt{3} = 115 / \sqrt{3} = 66,4 \text{ кВ};$$

$$E_{G.\phi}'' = E_{G*}'' U_{cp.номIII} / \sqrt{3} = 1,13 \cdot 115 / \sqrt{3} = 75 \text{ кВ};$$

$$E_{GC.\phi}'' = E_{GC*}'' U_{cp.номIII} / \sqrt{3} = 1,20 \cdot 115 / \sqrt{3} = 79,6 \text{ кВ}.$$

3 Преобразовываем схему замещения к требуемому виду, показанному на рисунке 3.12, б:

$$X_{13} = X_1 + X_2 + X_3 + X_4 = 4,3 + 0,66 + 10,40 + 2,65 = 16,7 \text{ Ом};$$

$$X_{14} = X_7 + X_5 + 5,35 + 2,65 = 8 \text{ Ом}.$$

4 Вычисляем результирующее сопротивление от системы и электростанции (левой части схемы на рисунке 3.12, б) и результирующую ЭДС.

$$X_{\Sigma}'' = (X_{13} \parallel X_{14}) + X_8 = \frac{16,7 \cdot 8}{16,7 + 8} + 4 = 5,4 + 4 = 9,4 \text{ Ом}$$

$$E_{\phi\Sigma}'' = \frac{E_{c.\phi}'' X_{14} + E_{r.\phi}'' X_{13}}{X_{13} + X_{14}} = \frac{66,4 + 75 \cdot 16,7}{16,7 + 8} = 72,2 \text{ кВ}$$

Определяем сопротивление правой части схемы, включающей синхронные компенсаторы:

$$X_{15} = 0,5X_9 + 0,5X_{11} = 0,5*34,8 + 0,5*97 = 65,9 \text{ Ом}$$

5 Ток КЗ от синхронных компенсаторов (СК) вычисляем первым приемом.

5.1 Находим номинальный суммарный ток СК, приведенный к ступени КЗ:

$$I_{GCном}^0 = S_{GCном\Sigma} / (\sqrt{3}U_{cp.ном//}) = 60 / (\sqrt{3}*115) = 0,3 \text{ кА}$$

6 Вычисляем начальный ток КЗ от синхронных компенсаторов:

$$I_{GC\phi}'' = E_{GC\phi}'' / X_{15} = 79,6 / 65,9 = 1,21 \text{ кА}$$

7 Определяем кратность начального тока КЗ синхронных компенсаторов или, другими словами, их удалённость от места КЗ:

$$I_{*n0(ном)GC} = I_{GCном}'' / I_{GCном}^0 = 1,21 / 0,3 = 4 > 2$$

8 Относительные значения тока КЗ от синхронных компенсаторов γ_t для различных моментов времени переходного процесса находим по типовым кривым согласно вычисленной кратности тока $I_{*n0(ном)GC} = 4$.

9 Находим периодическую составляющую тока от СК в месте короткого замыкания в именованных единицах. Например, для $t=0,1$ с

$$\text{значение тока } I_{GC t} = I_{GCном}'' \cdot \gamma_{t=0,1} = 1,21*0,84 = 1,01 \text{ кА};$$

$$\text{для } t = 0,35 \text{ с} - I_{GC t} = 1,21*0,76 = 0,92 \text{ кА и т. д.}$$

10 Токи КЗ от системы неограниченной мощности и электростанции определяем вторым приемом. Расчеты по п. 16, 2, 4 были проведены ранее.

10.1 Вычисляем номинальный ток объединенного генератора (электростанции), приведенный к ступени КЗ:

$$I_{G.ном}^0 = S_{G.ном} / (\sqrt{3}U_{ср.ном///}) = 470 / (\sqrt{3}*115) = 2,36 \text{ кА}.$$

10.2 Находим начальный ток в месте КЗ от системы и электростанции:

$$I_{\kappa}'' = E_{\phi\Sigma}'' / X_{\Sigma}'' = 72,2 / 9,4 = 7,68 \text{ кА}$$

10.3 Распределяем ток I_{κ} в схеме (рисунок 3.12, б) и находим начальный ток КЗ генераторов. Для этого определяем напряжение в точке **M** (рисунок 3.12, б):

$$U_{M\phi} = I_{\kappa}'' X_8 = 7,68 * 4 = 30,72 \text{ кВ},$$

а затем ток генераторов

$$I_G'' = (E_{G,\phi} - U_{M\phi}) / X_{14} = (75 - 30,72) / 8 = 5,53 \text{ кА}.$$

11 Определяем кратность начального тока КЗ генератора (удалённость от места КЗ):

$$I_{*по(ном)G} = I_G'' / I_{G.ном}^0 = 5,53 / 2,36 = 2,32 > 2$$

12 Вычисляем долю тока короткого замыкания генератора в общем токе короткого замыкания от системы и электростанции:

$$I_{G.\kappa*} = I_G'' / I_{\kappa}'' = 5,53 / 7,68 = 0,72$$

13 Относительные значения тока генераторов $I_{Gt} / I_G'' = \gamma_t$ и тока в месте КЗ $I_{kt} / I_K'' = \gamma_{kt}$ для различных моментов времени переходного процесса определяем по типовым кривым согласно $I_{*no(ном)G} = 2,35$ и $I_{G,K*} = 0,72$ (рисунки 3.13, а и 3.13, б).

Так как значение $I_{*no(ном)G} = 2,35$ находится между кривыми со значениями кратностей тока, равными 2 и 3 (соответственно $I_{G,K*} = 0,72$ между 0,7 и 0,8), то величины γ_t и λ_{kt} определяются или интерполяцией, или приближенно. Для $t=0,1$ с величина $\gamma_t = 0,92$, а $\lambda_{kt} = 0,95$; для $t=0,35$ с величина $\gamma_t = 0,88$, а $\lambda_{kt} = 0,92$ и т. д.

14 Находим периодические составляющие токов в объединенном генераторе и в месте КЗ в именованных единицах согласно. Для $t = 0,1$ с током $I_{Gt} = 5,53 \cdot 0,92 = 5,09$ кА и $I_{kt} = 7,68 \cdot 0,95 = 7,3$ кА соответственно; для $t=0,35$ с ток $I_{Gt} = 5,53 \cdot 0,88 = 4,87$ кА, а $I_{kt} = 7,68 \cdot 0,92 = 7,06$ кА и т. д.

Результирующий ток в месте рассматриваемого трехфазного КЗ $I_{kt\Sigma}$ определяется суммированием токов ветвей от системы и электростанции I_{kt} (слева) и от СК $I_{GC.kt}$ (справа). Для $t = 0,1$ с значение $I_{kt\Sigma} = I_{kt} + I_{GC.kt} = 7,30 + 1,01 = 8,31$ кА; для $t=0,35$ с величина $I_{kt\Sigma} = 7,01 + 0,92 = 7,93$ кА и т. д.

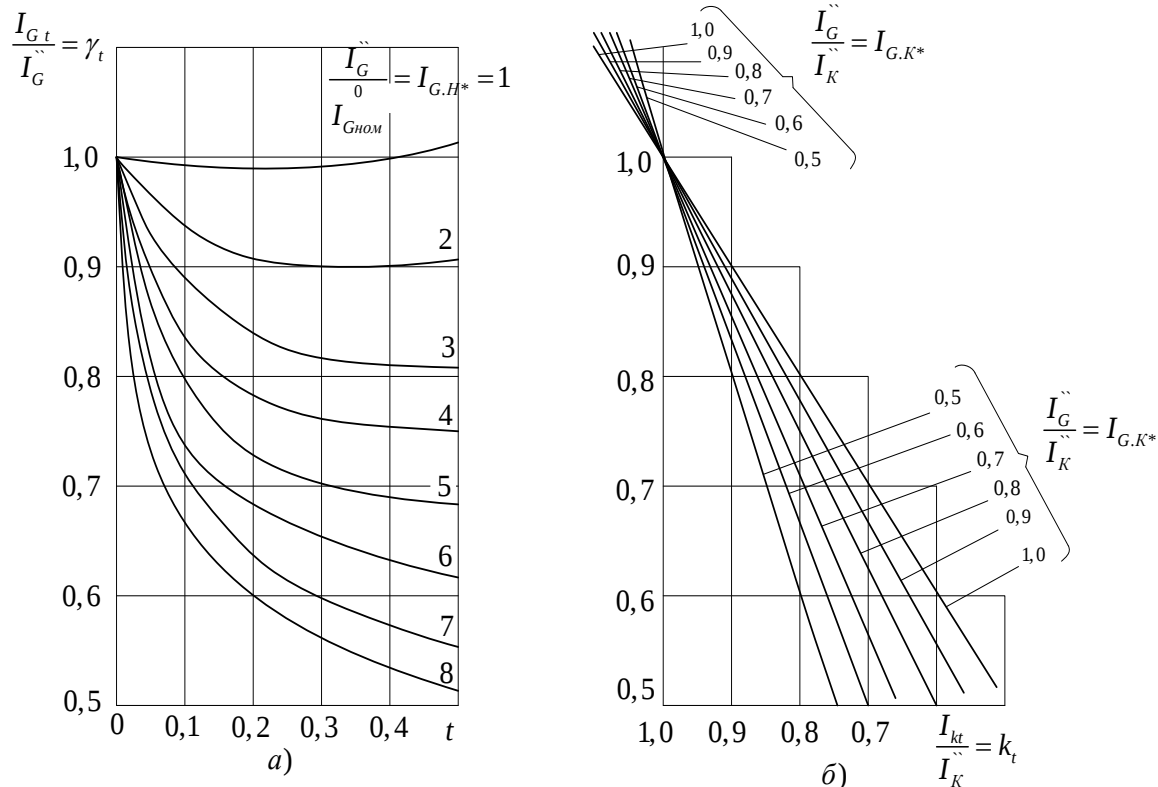


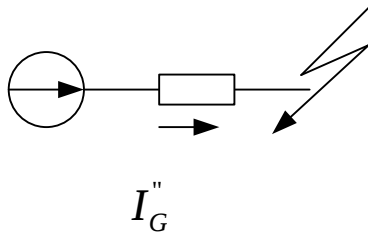
Рисунок 3.13 - Типовые (а) и вспомогательные (б) кривые

Таблица 3.5 - Алгоритм расчёта

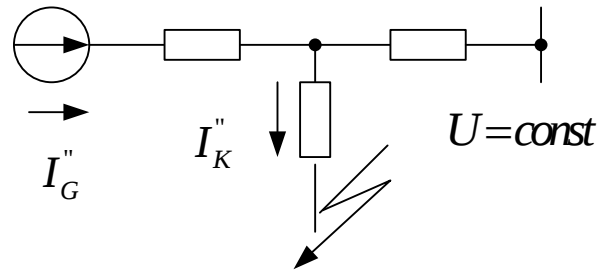
1.Выбрать метод (приём) расчета	
а) приём первый Система представляется одним или несколькими обобщенными генераторами, радиально связанными с местом КЗ (объединяемые генераторы находятся примерно в равных условиях)	б) приём второй Система представляется генератором и шинами неизменного напряжения (генераторы находятся в резко отличающихся условиях и связаны с местом КЗ через общие сопротивления)
2 Составить схему замещения для начального режима	

Преобразовать схему замещения к требуемому виду

3 приём первый



4 приём второй



Определить токи, необходимые для использования типовых кривых

5 приём первый

6 приём второй

а)номинальный
ток генератора

б)начальный
ток КЗ
генератора

$$I_{ном}^{\circ}$$

$$I_G''$$

а)начальный
ток
генератора

б)начальный
ток КЗ
генератора

$$I_{ном}^{\circ}$$

$$I_G''$$

в)начальный
ток КЗ

$$I_K''$$

7 кратность начального
тока КЗ генератора

$$I_{*no(ном)G} = \frac{I_G''}{I_{ном}^0}$$

8 кратность начального
тока КЗ генератора

$$I_{*no(ном)G} = \frac{I_G''}{I_{ном}^0}$$

9 доля тока КЗ ген-ра в
общем токе КЗ

$$I_{G.K*} = \frac{I_G''}{I_K''}$$

Определить необходимые значения γ_t и γ_{kt} по типовым кривым

10 приём первый по
величинам t и $I_{no(ном)G*}$

11 приём второй по величинам $t, I_{*no(ном)G}$ и $I_{G.K*}$

Относительное значение
тока генератора

а) относительное
значение тока

б) относительное
значение тока в месте

$\gamma_t = \frac{I_{Gt}}{I_G''}$	генератора $\gamma_t = \frac{I_{Gt}}{I_G''}$	КЗ к моменту времени t $\gamma_{kt} = \frac{I_{kt}}{I_k''}$
Определить периодические составляющие токов в генераторе и месте КЗ в именованных единицах		
12 приём первый - ток генератора $I_{Gt} = I_G'' \gamma_t$	13 приём второй - ток в месте КЗ: $I_{kt} = I_k'' k_t$ ток генератора: $I_{Gt} = I_G'' \gamma_t$	

Список использованных источников

- 1 Ульянов, С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах/С.А.Ульянов.- М.: Энергия, 1970. – 519 с ;
- 2 Куликов, Ю.А. Переходные процессы в электрических системах: Учебное пособие/Ю.А.Куликов. – Новосибирск: НГТУ, М.: Мир: ООО «Издательство АСТ», 2003. – 283 с.
- 3 Расчёт коротких замыканий и выбор электрооборудования: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений/ И.П.Крючков и [др.]; под ред. И.П.Крючкова и В.А.Старшинова . – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 416 с.
- 4 Пособие к курсовому и дипломному проектированию для электроэнергетических специальностей вузов: учебное пособие / В.М.Блок и [др.], под ред. В.М.Блок. – М. : Высш. шк., 1990 .– 383 с.
- 5 ГОСТ 27514 – 87 Короткие замыкания в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ. - Введ. 1988-01-01.- М.: Госстандарт, 1988.
- 6 Неклепаев, Б.Н. Электрическая часть станций и подстанций. Справочные материалы/Б.Н.Неклепаев. – М.: Энергоатомиздат, 1984.- 608 с.
- 7 Руководящие указания по расчёту токов короткого замыкания и выбору электрооборудования/ Под ред. Б.Н.Неклепаева. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. – 152 с.
- 8 Переходные процессы в электроэнергетических системах: учебник для вузов/ И.П.Крючков, В.А.Старшинов, Ю.П.Гусев, М.В.Пираторов; под ред. И.П.Крючкова. М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 416 с.

Приложение А

Последовательность расчёта несимметричных КЗ при наличии в схеме трансформаторов с разземлёнными нейтралями

В ситуации, когда нейтрали всех трансформаторов заземлены, расчёт может начинаться с любого вида несимметричного короткого замыкания. В тех же случаях, когда нейтрали части трансформаторов разземлены, произвольный порядок расчёта отдельных видов КЗ приводит к нереальным результатам. Рассмотрим поясняющую схему, показанную на рисунке 1. В ветвях генераторов G_2 и G_3 нейтрали трансформаторов разземлены, в связи с чем при замыканиях на землю ток нулевой последовательности в ветвях этих источников не протекает, т.е. суммарное сопротивление нулевой последовательности элементов этих ветвей $X_0 = \infty$. В соответствии с правилом эквивалентности прямой последовательности для определения тока прямой последовательности (например при однофазном КЗ) необходимо найти величину дополнительного сопротивления $X_\Delta = X_2 + X_0$, а т.к. $X_0 = \infty$, то и $X_\Delta = \infty$. Следовательно ток прямой последовательности равен нулю, т.е. он отсутствует, чего быть не может. Таким образом, если в расчётной схеме есть трансформаторы с разземлёнными нейтралями, начинать расчёт с однофазного короткого замыкания, равно как и с двухфазного на землю (в этом случае при определении X_Δ возникает неопределённость, которую необходимо раскрывать) нельзя. В таких случаях необходимо придерживаться строго определённой последовательности расчёта видов КЗ (когда отдельные результаты предыдущего расчета используются в расчёте последующем), приведенной ниже.

1 В полном объёме рассчитывается двухфазное КЗ;

2 Рассчитывается двухфазное КЗ на землю:

2.1 По стандартной методике определяются токи $I_{k1GS}^{(1,1)}$ и $I_{k1G_1}^{(1,1)}$;

2.2 Из расчёта двухфазного КЗ известны значения токов $I_{\kappa 1 G_2}^{(1,1)} = I_{\kappa 1 G_2}^{(2)}$ и

$$I_{\kappa 1 G_3}^{(1,1)} = I_{\kappa 1 G_3}^{(2)} \text{ (т.к. нейтралы трансформаторов разземлены, то генераторы}$$

этих ветвей воспринимают двухфазное КЗ на землю как чисто двухфазное и токи прямой последовательности при двухфазном КЗ по сути есть токи той же последовательности при двухфазном КЗ на землю);

2.3 Определяются суммарные токи прямой последовательности отдельно в ветвях трансформаторов с заземлёнными и разземлёнными нейтралями

$$I_{\kappa 1(GS, G_1)}^{(1,1)} = I_{\kappa 1 GS}^{(1,1)} + I_{\kappa 1 G_1}^{(1,1)}; \quad I_{\kappa 1(G_2, G_3)}^{(1,1)} = I_{\kappa 1 G_2}^{(1,1)} + I_{\kappa 1 G_3}^{(1,1)};$$

2.4 Находится суммарный ток прямой последовательности в месте КЗ

$$I_{\kappa 1 \Sigma}^{(1,1)} = I_{\kappa 1(GS, G_1)}^{(1,1)} + I_{\kappa 1(G_2, G_3)}^{(1,1)};$$

2.5 Определяются токи обратной последовательности отдельно в ветвях трансформаторов с заземлёнными и разземлёнными нейтралями

$$I_{\kappa 2(GS, G_1)}^{(1,1)} = -I_{\kappa 1(GS, G_1)}^{(1,1)} \frac{X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma}' + X_{0\Sigma}},$$

где $X_{2\Sigma}'$ - суммарное сопротивление схемы обратной последовательности без учёта ветвей, где **нейтралы трансформаторов разземлены**.

$$I_{\kappa 2(G_2, G_3)}^{(1,1)} = I_{\kappa 1(G_2, G_3)}^{(1,1)};$$

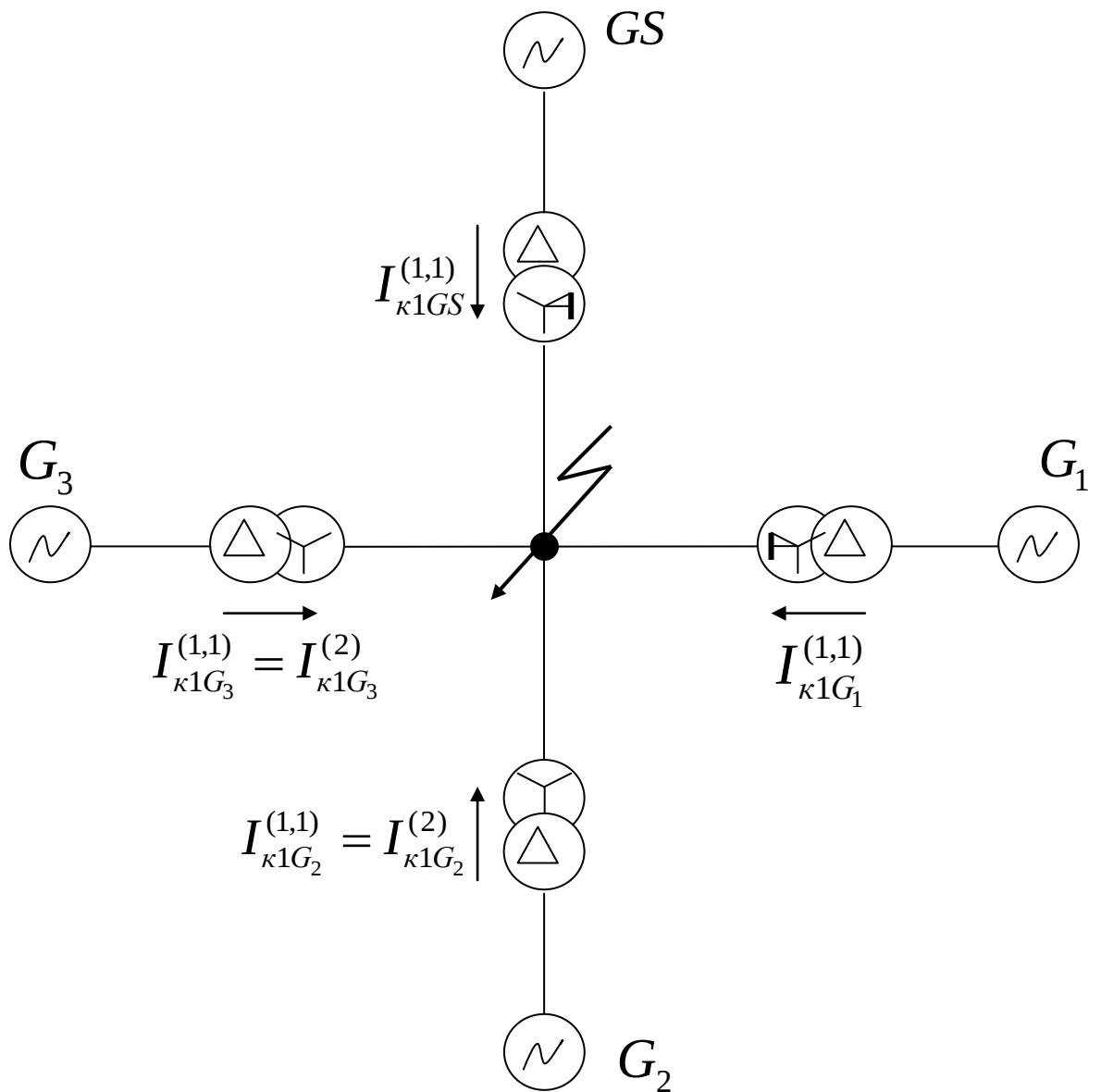


Рисунок А.1 – Поясняющая схема

2.6 Находится суммарный ток обратной последовательности в месте КЗ

$$I_{k2\Sigma}^{(1,1)} = I_{k2(GS,G_1)}^{(1,1)} + I_{k2(G_2,G_3)}^{(1,1)};$$

2.7 Вычисляется фазный ток в месте КЗ

$$I_K^{(1,1)} = m^{(1,1)} I_{k1(GS,G_1)}^{(1,1)} + m^{(2)} I_{k1(G_2,G_3)}^{(1,1)};$$

При определении $m^{(1,1)}$ учитывается сопротивление $X'_{2\Sigma}$.

2.8 По стандартной методике определяются симметричные составляющие напряжений и фазные напряжения.

3 Рассчитывается однофазное короткое замыкание:

3.1 При известном значении тока $I_{\kappa 2\Sigma}^{(1,1)}$ определяется суммарный ток обратной последовательности в месте КЗ $I_{\kappa 2\Sigma}^{(1)}$ из выражения

$$\frac{I_{\kappa 2\Sigma}^{(1)}}{I_{\kappa 2\Sigma}^{(1,1)}} = \frac{x_{1\Sigma}(2x_{0\Sigma} + x_{1\Sigma})}{x_{0\Sigma}(2x_{1\Sigma} + x_{0\Sigma})};$$

3.2 Находится суммарный ток прямой последовательности в месте КЗ

$$I_{\kappa 1\Sigma}^{(1)} = I_{\kappa 2\Sigma}^{(1)};$$

3.3 Рассчитывается фазный ток

$$I_K^{(1)} = m^{(1)} I_{\kappa 1\Sigma}^{(1)};$$

3.4 По стандартной методике определяются симметричные составляющие напряжений и их фазные величины.

Приложение Б

Средние значения сверхпереходных сопротивлений и ЭДС элементов (в относительных единицах при номинальных условиях)

Таблица Б.1

Наименование элемента	X''_*	E''_{*0}
Турбогенератор мощностью до 100 МВт	0.125	1.08
То же мощностью от 100 до 500 МВт	0.2	1.13
Гидрогенератор с демпферными обмотками	0.2	1.13
То же без демпферных обмоток	0.27	1.18
Синхронный двигатель	0.2	1.1
Синхронный компенсатор	0.2	1.2
Асинхронный двигатель	0.2	0.9
Обобщенная нагрузка	0.35	0.85

Приложение В

Выражения для определения сопротивлений

Таблица В.1 – Приближенное приведение

Наименование элемента	В именованных единицах	В относительных единицах
Любая синхронная или асинхронная машина, обобщенная нагрузка	$X'' = X''_* \frac{U_{ср.ном}^2}{S_{ном}}$	$X''_{*\delta} = X''_* \frac{S_{\delta}}{S_{ном}}$
Трансформатор	$X_T = \frac{U_{k\%} U_{ср.ном}^2}{100 S_{Тном}}$	$X_{T*\delta} = \frac{U_{k\%} S_{\delta}}{100 S_{Тном}}$
Реактор	$X_L = \frac{X_{L\%} U_{Лном}}{100 \sqrt{3} I_{Лном}}$	$X_{L*\delta} = \frac{X_{L\%} I_{\delta} U_{Лном}}{100 I_{Лном} U_{ср.ном}}$
Воздушная или кабельная линия	$X_W = X_{01} L$ $R_W = R_{01} L$	$X_{W*\delta} = X_{01} L \frac{S_{\delta}}{U_{ср.ном}^2}$ $R_{W*\delta} = R_{01} L \frac{S_{\delta}}{U_{ср.ном}^2}$
Система: - при известном токе КЗ - при известной мощности КЗ	$X_{GS} = \frac{U_{ср.ном}}{\sqrt{3} I_{кGS}^{//}}$ $X_{GS} = \frac{U_{ср.ном}^2}{S_{кGS}^{//}}$	$X_{GS*\delta} = \frac{I_{\delta}}{I_{кGS}^{//}}$ $X_{GS*\delta} = \frac{S_{\delta}}{S_{кGS}^{//}}$

Таблица В.2 – Точное приведение

Наименование элемента	В именованных единицах	В относительных единицах
Любая синхронная или асинхронная машина, обобщенная нагрузка	$X'' = X''_* \frac{U_{cp.ном}^2}{S_{ном}} \prod_{i=1}^n \kappa_i^2$	$X''_{*\delta} = X''_* \frac{S_{\delta}}{S_{ном}} \prod_{i=1}^n \kappa_i^2$
Трансформатор	$X_T = \frac{U_{k\%} U_{cp.ном}^2}{100 S_{ТНОМ}} \prod_{i=1}^n \kappa_i^2$	$X_{T*\delta} = \frac{U_{k\%} S_{\delta}}{100 S_{ТНОМ}} \prod_{i=1}^n \kappa_i^2$
Реактор	$X_L = \frac{X_{L\%} U_{LНОМ}}{100 \sqrt{3} I_{LНОМ}} \prod_{i=1}^n \kappa_i^2$	$X_{L*\delta} = \frac{X_{L\%} I_{\delta} U_{LНОМ}}{100 I_{LНОМ} U_{cp.ном}} \prod_{i=1}^n \kappa_i^2$
Воздушная или кабельная линия	$X_W = X_{01} L \prod_{i=1}^n \kappa_i^2$ $R_W = R_{01} L \prod_{i=1}^n \kappa_i^2$	$X_{W*\delta} = X_{01} L \frac{S_{\delta}}{U_{cp.ном}^2} \prod_{i=1}^n \kappa_i^2$ $R_{W*\delta} = R_{01} L \frac{S_{\delta}}{U_{cp.ном}^2} \prod_{i=1}^n \kappa_i^2$
Система: - при известном токе КЗ - при известной мощности КЗ	$X_{GS} = \frac{U_{cp.ном}}{\sqrt{3} I_{кGS}} \prod_{i=1}^n \kappa_i^2$ $X_{GS} = \frac{U_{cp.ном}^2}{S_{кGS}} \prod_{i=1}^n \kappa_i^2$	$X_{GS*\delta} = \frac{I_{\delta}}{I_{кGS}} \prod_{i=1}^n \kappa_i^2$ $X_{GS*\delta} = \frac{S_{\delta}}{S_{кGS}} \prod_{i=1}^n \kappa_i^2$

