

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Р.С. САИТБАТАЛОВА, Н.И. ВАРЛАМОВ, Р.У. ГАЛЕЕВА

**ПРАКТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА
ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ**

Учебное пособие

3-е изд., доп.

Казань 2015

УДК 621.311
ББК 31.2
С14

Рецензенты:

главный специалист отдела «Электроснабжения»
ООО Казанский Электропроект *М.Н. Золотарская*;
кандидат технических наук, доцент Казанского государственного
энергетического университета *Р.Р. Чураев*

Саитбаталова Р.С., Варламов Н.И., Галеева Р.У.

С14 Практические методы расчета токов короткого замыкания:
учеб. пособие / Р.С. Саитбаталова, Н.И. Варламов, Р.У. Галеева. –
3-е изд. доп. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2015. – 178 с.

В учебном пособии представлены схемы замещения и формулы для определения параметров основных элементов электрической сети. Приведены методы практических расчетов токов короткого замыкания в сетях напряжением выше и до 1 кВ при симметричных и несимметричных аварийных режимах.

Рассмотрены примеры расчетов токов симметричного и несимметричного коротких замыканий в сетях напряжением до и выше 1 кВ.

Учебное пособие предназначено для студентов направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» по профилям подготовки «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем», «Электроснабжение» при изучении дисциплины «Переходные электромагнитные процессы в электроэнергетических системах».

УДК 621.311
ББК 31.2

© Казанский государственный энергетический университет, 2015
© Саитбаталова Р.С., Варламов Н.И., Галеева Р.У., 1999
© Саитбаталова Р.С., Варламов Н.И., Галеева Р.У., 2003
© Саитбаталова Р.С., Варламов Н.И., Галеева Р.У., 2015, с изменениями и дополнениями

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании и эксплуатации электрических установок для решения целого ряда технических вопросов требуется предварительно произвести расчет переходных процессов, вызванных внезапным коротким замыканием (КЗ), сбросом и набросом нагрузки, потерей возбуждения генераторов и т.п. Нарушение режима работы оборудования и устойчивости электростанций может привести к обесточиванию большого числа потребителей электроэнергии, повреждению оборудования и другим тяжелым последствиям.

Расчеты токов короткого замыкания необходимы для решения следующих задач:

- выбора схем электрических соединений;
- выявления условий работы потребителей при аварийных режимах;
- выбора аппаратов и проводников;
- проектирования и настройки устройств релейной защиты;
- выбора систем автоматического регулирования возбуждения;
- анализа устойчивости работы энергетических систем.

Знание методов и анализа расчета переходного процесса имеет важное значение и является неотъемлемой частью работы, выполняемой в Центральном диспетчерском управлении (ЦДУ) Единой энергетической системы (ЕЭС) Российской Федерации. От правильного учета переходных процессов во многом зависят качество электроэнергии, уровень надежности работы энергосистем, полнота использования пропускной способности электрических сетей и экономичность режимов.

Методы расчета токов КЗ выбираются соответственно целевому назначению, в результате которого находятся необходимые величины для заданного момента времени или их изменение в течение всего переходного процесса. Наиболее высокую точность определения расчетных величин токов КЗ в электрической системе дает метод с использованием операционного исчисления по уравнениям Парка – Горева [1]. Этот метод применяется редко ввиду трудоемкости выкладок, он может быть использован для оценки других приближенных методов как эталонный. В практических расчетах используется ряд приближенных инженерных методов [2], которые рассмотрены в данном учебном пособии.

Целью издания явилось появление новой нормативно-технической литературы, совершенствование методов расчета аварийных режимов из-за новых возможностей вычислительной техники, старения существующей учебно-методической литературы. Учебное пособие дополнено новой главой по расчету простого замыкания на землю.

В результате изучения дисциплины формируются следующие компетенции или их составляющие:

- способность использовать методы анализа и моделирования электрических цепей;

- способность принимать участие в проектировании объектов электроснабжения и распределения электроэнергии в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией;

- способность рассчитывать режимы работы объектов электроэнергетической системы;

- готовность обеспечивать требуемые режимы и заданные параметры технологического процесса по заданной методике.

Материал может быть использован для выполнения курсового проектирования, выпускной квалификационной работы студентами направления подготовки «Электроэнергетика и электротехника».

1. СОСТАВЛЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ И СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ

1.1. Основные определения, буквенные обозначения

Коротким замыканием называют замыкание, при котором токи в ветвях электроустановки, примыкающих к месту его возникновения, резко возрастают, превышая наибольший допустимый ток продолжительного режима – К.

Ток короткого замыкания (МЭС 441-11-07) – сверхток, обусловленный замыканием с ничтожно малым полным сопротивлением между точками, которые в нормальных условиях эксплуатации должны иметь различный потенциал (ГОСТ Р 50345-99, п. 3.2.3).

Коротким замыканием (КЗ) называется не предусмотренное нормальной эксплуатацией соединение разноименных фаз между собой или соединение фаз с землей.

Причины КЗ:

- механические повреждения изоляции (проколы и разрушение кабелей при земляных работах, поломка изоляторов и т.д.);
- старение, т.е. износ изоляции, приводящий постепенно к резкому ухудшению электрических свойств изоляции;
- увлажнение изоляции;
- различные набросы на провода воздушных линий;
- перекрытие фаз животными и птицами;
- перекрытие между фазами вследствие атмосферных перенапряжений;
- ошибочные действия персонала (возникновение дуги при отключении нагруженной линии разъединителем).

Значения тока короткого замыкания, протекающего по различным частям оболочки, зависят от путей растекания тока по оболочке, определяемых наличием параллельных цепей, точек повторного заземления или уравнивания потенциалов, сопротивления конструкций и контактных соединений.

Симметричным называют такое короткое замыкание, при котором все фазы остаются в одинаковых условиях, в противном случае короткое замыкание называют несимметричным.

Трехфазным коротким замыканием называют короткое замыкание между тремя фазами в трехфазной электроэнергетической системе – $K^{(3)}$.

Трехфазным коротким замыканием на землю называют короткое замыкание на землю в трехфазной электроэнергетической системе (ЭЭС) с глухо- или эффективно заземленными нейтральными силовыми элементами, при котором с землей соединяются три фазы – $K^{(1,1,1)}$.

Установившийся режим короткого замыкания – режим замыкания электроустановки, наступающий после затухания во всех цепях свободных токов и прекращения изменения напряжения возбудителей синхронных машин под действием автоматических регуляторов возбуждения.

Свободная составляющая тока короткого замыкания – составляющая тока короткого замыкания, определяемая только начальными условиями короткого замыкания, структурой электрической сети и параметрами ее элементов.

Принужденная составляющая тока короткого замыкания есть составляющая тока короткого замыкания, равная разности между током короткого замыкания и его свободной составляющей.

Апериодическая составляющая тока короткого замыкания – свободная составляющая тока короткого замыкания, изменяющаяся во времени без перемены знака.

Периодическая составляющая тока короткого замыкания рабочей частоты – составляющая тока короткого замыкания, изменяющаяся по периодическому закону с рабочей частотой.

Мгновенное значение тока короткого замыкания – значение тока короткого замыкания в рассматриваемый момент времени.

Действующее значение тока короткого замыкания – среднее квадратическое значение тока короткого замыкания за период рабочей частоты, середина которого есть рассматриваемый момент времени.

Действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания – среднее квадратическое значение периодической составляющей тока короткого замыкания за период рабочей частоты, середина которого есть рассматриваемый момент времени.

Начальное действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания – условная величина, равная двойной амплитуде периодической составляющей тока короткого замыкания в начальный момент времени, уменьшенной в $2\sqrt{2}$ раз.

Начальное значение аperiодической составляющей тока короткого замыкания – значение аperiодической составляющей тока короткого замыкания в начальный момент времени.

Установившийся ток короткого замыкания – значение тока короткого замыкания после окончания переходного процесса,

характеризуемого затуханием всех свободных составляющих этого тока и прекращением изменения тока от воздействия устройств автоматического регулирования возбуждения источников энергии.

Ударный ток короткого замыкания – наибольшее возможное мгновенное значение тока короткого замыкания.

Ударный коэффициент тока короткого замыкания – отношение ударного тока короткого замыкания к амплитуде периодической составляющей тока короткого замыкания рабочей частоты в начальный момент времени.

Фаза возникновения короткого замыкания в электроустановке – фаза напряжения электроустановки к моменту возникновения короткого замыкания, выраженная в электрических градусах.

Мощность короткого замыкания – условная величина, равная увеличенному в $\sqrt{3}$ раз произведению тока трехфазного короткого замыкания в начальный момент времени на номинальное напряжение соответствующей сети.

Расчетные условия короткого замыкания элемента электроустановки – наиболее тяжелые, но достаточно вероятные условия, в которых может оказаться рассматриваемый элемент электроустановки при коротких замыканиях.

Расчетная схема электроустановки – электрическая схема электроустановки, при которой имеют место расчетные условия короткого замыкания для рассматриваемого ее элемента.

Расчетный вид короткого замыкания – вид короткого замыкания, при котором имеют место расчетные условия короткого замыкания для рассматриваемого элемента электроустановки.

Расчетная точка короткого замыкания – точка электроустановки, при коротком замыкании в которой для рассматриваемого элемента электроустановки имеют место расчетные условия короткого замыкания.

Стойкость элемента электроустановки к току короткого замыкания – способность элемента электроустановки выдерживать термическое и электродинамическое действия тока короткого замыкания без повреждений, препятствующих его дальнейшей исправной работе.

Буквенные обозначения величин

Буквенное обозначение	Расшифровка обозначений
I	– ток, действующее значение;
i	– ток, мгновенное значение;
\dot{i}	– ток комплексный, действующее значение;
I_m	– ток, амплитудное значение;
$i_{уд}$	– ударный ток КЗ;
$i_{дин}$	– ток электродинамической стойкости;
$I_{откл\ ном}, i_{откл\ ном}$	– номинальный ток отключения электрического аппарата;
I_t, i_t	– ток в момент времени t ;
$I_{тер}$	– ток термической стойкости;
I_y	– ток установившегося режима;
I_k	– ток КЗ, общее обозначение
$I_p; i_p$	– периодическая составляющая тока КЗ;
$I_a; i_a$	– аperiodическая составляющая тока КЗ ($I_a = i_a$);
$I_{п0}$	– начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ ($t = 0$);
i_{a0}	– начальное значение аperiodической составляющей тока КЗ ($t = 0$);
$I_{пт}, i_{ат}$	– периодическая и аperiodическая составляющие тока КЗ в момент $t = \tau$;
$I_{норм. расч}$	– ток нормального режима, расчетный;
I_d, I_q	– токи соответственно по осям d и q ;
I'	– переходный ток;
I''	– сверхпереходный ток;
E	– электродвижущая сила, действующее значение.

1.2. Причины возникновения электромагнитных переходных процессов и следствия. Основные допущения

Основными причинами возникновения электромагнитных переходных процессов являются:

- включение и отключение двигателей и других приемников электрической энергии.
- короткое замыкание в электрической системе, автоматическое повторное включение линии на сохранившееся короткое замыкание.
- возникновение местной несимметрии в системе.
- действие форсировки возбуждения синхронных машин, их развозбуждение.
- несинхронное включение синхронных машин.

Следствиями действия тока короткого замыкания являются:

- дополнительный нагрев токоведущих элементов и проводников выше допустимого.
- возникновение больших механических усилий между проводниками.
- снижение напряжения, приводящее к ухудшению эффективности работы потребителей, авариям на электростанциях и подстанциях.
- нарушение работы линий связи и сигнализации за счет наведения дополнительных магнитных потоков.
- нарушение устойчивости электрических систем.

Токи короткого замыкания с учетом действия устройств релейной защиты обычно существуют непродолжительное время, но их приходится учитывать и тщательно рассчитывать ввиду вышеуказанных последствий.

Термическим действием тока короткого замыкания называют тепловое действие тока короткого замыкания, вызывающее изменение температуры элементов электроустановки.

Электродинамическим действием тока короткого замыкания называют механическое действие электродинамических сил, обусловленных током короткого замыкания, на элементы электроустановки.

Ток термической стойкости электрического аппарата при коротком замыкании – нормированный ток, термическое действие которого электрический аппарат способен выдержать при коротком замыкании в течение нормированного времени термической стойкости.

Ток электродинамической стойкости электрического аппарата при коротком замыкании – нормированный ток, электродинамическое

действие которого электрический аппарат способен выдержать при коротком замыкании без повреждений, препятствующих его дальнейшей исправной работе.

По режиму короткого замыкания должны проверяться в электроустановках выше 1 кВ:

а) электрические аппараты, токопроводы, кабели и другие проводники, а также опорные конструкции для них;

б) воздушные линии при ударном токе короткого замыкания 50 кА и более для предупреждения схлестывания проводов при динамическом действии токов короткого замыкания.

Аппараты, которые предназначены для отключения токов короткого замыкания, должны обладать способностью производить эти операции при всех возможных токах короткого замыкания.

При расчетах токов КЗ допускается:

– не учитывать сдвиг по фазе электродвижущих сил (ЭДС) и изменение частоты вращения роторов синхронных генераторов и компенсаторов в процессе КЗ при продолжительности КЗ, не превышающей 0,5 с, а электродвигателей при продолжительности КЗ, не превышающей 0,2 с;

– принимать полную симметрию по фазам всех элементов системы (за исключением несимметрии в месте КЗ);

– не учитывать ток намагничивания трансформаторов и автотрансформаторов;

– не вводить в расчетную схему источники энергии, которые связаны с частью ЭЭС, где находится расчетная точка КЗ, с помощью электропередачи или вставки постоянного тока;

– приближенно учитывать затухание апериодической составляющей тока КЗ, если исходная расчетная схема имеет несколько независимых контуров;

– не учитывать насыщение магнитных систем электрических машин;

– принимать сопротивление постоянному току различных элементов расчетной схемы равным их активному сопротивлению;

– учитывать приближенно (с помощью эквивалентных параметров) электроприемники, сосредоточенные в отдельных узлах ЭЭС;

– не учитывать поперечную емкость воздушных линий электропередачи напряжением 110–220 кВ при их длине не более 200 км и напряжением 330–500 кВ при их длине не более 150 км;

– пренебрегать высшими гармоническими составляющими токов при расчетах несимметричных КЗ.

1.3. Система относительных единиц

Применение относительных (безразмерных) единиц позволяет быстро сопоставить результаты вычислений для различных точек системы. Подобная система единиц может применяться как в относительно номинальном варианте, где за основу принимаются параметры наиболее ответственного элемента (генератор, трансформатор), так и в относительно базисном варианте. В этом случае за основу принимаются две базисные единицы, остальные получаются из принятых. Приняв за базисные величины в качестве единиц измерения междуфазное напряжение U_6 и базисную мощность трехфазной системы S_6 , через обычные соотношения получим:

базисный ток на расчетной ступени, кА

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_6}; \quad (1.1)$$

базисное сопротивление на расчетной ступени, Ом:

$$Z_6 = \frac{U_6}{\sqrt{3}I_6} = \frac{U_6^2}{S_6}. \quad (1.2)$$

При выбранных базисных единицах относительные значения напряжения U_{6*} , тока I_{6*} , сопротивления Z_{6*} , ЭДС E_{6*} и полной мощности S_{6*} определяют путем деления значения соответствующей величины в именованных единицах на базисную единицу той же размерности, о.е.:

$$U_{6*} = \frac{U}{U_6}; \quad I_{6*} = \frac{I}{I_6}; \quad Z_{6*} = \frac{Z}{Z_6}; \quad E_{6*} = \frac{E}{U_6}, \quad S_{6*} = \frac{S}{S_6}, \quad (1.3)$$

где U – напряжение на расчетной ступени, кВ; I – ток, кА; Z – сопротивление, Ом; E – ЭДС генератора или двигателя, кВ; S – полная мощность, МВ·А; U_6 – базисное напряжение на расчетной ступени, кВ;

Обратный пересчет из относительных единиц в именованные ведется по выражениям

$$U = U_{6*}U_6; \quad I = I_{6*}I_6; \quad \underline{Z} = Z_{6*}Z_6; \quad E = E_{6*}U_6; \quad S = S_{6*}S_6. \quad (1.4)$$

Если параметры элементов, вводимых в расчетную схему, заданы в процентах или в относительных единицах при номинальных условиях, то для их приведения к базисным условиям используют формулы:

$$U_{\delta^*} = U_{ном^*} \frac{U_{ном}}{U_{\delta}}; I_{\delta^*} = I_{ном^*} \frac{I_{ном}}{I_{\delta}}; \quad (1.5)$$

$$Z_{\delta^*} = Z_{ном^*} \frac{Z_{ном}}{Z_{\delta}} = Z_{ном^*} \frac{I_{\delta} U_{ном}}{I_{ном} U_{\delta}} = Z_{ном^*} \frac{S_{\delta} U_{ном}^2}{S_{ном} U_{\delta}^2}; \quad (1.6)$$

$$E_{\delta^*} = E_{ном^*} \frac{U_{ном}}{U_{\delta}}, S_{\delta^*} = S_{ном^*} \frac{S_{ном}}{S_{\delta}}, \quad (1.7)$$

где $U_{ном^*}$, $E_{ном^*}$, $Z_{ном^*}$, $I_{ном^*}$, $S_{ном^*}$ – напряжение, ЭДС, полное сопротивление, ток и мощность в относительных единицах при номинальных условиях; $U_{ном}$, $Z_{ном}$, $I_{ном}$, $S_{ном}$ – номинальные напряжение, кВ; сопротивление, Ом; ток, А и мощность, МВ·А (генератора, трансформатора и т.д.) соответственно.

Таким образом, для расчетов различных режимов электрических систем и токов КЗ прежде всего необходимо привести ЭДС, напряжение и сопротивления всех элементов расчетной схемы к одним базисным условиям.

1.4. Определение параметров элементов системы в относительных единицах

Параметры элементов эквивалентных схем замещения могут быть определены:

- в именованных единицах с приведением значений параметров расчетных схем к выбранной основной (базисной) ступени напряжения сети и с учетом фактических коэффициентов трансформации силовых трансформаторов и автотрансформаторов;

- в относительных единицах с приведением значений параметров расчетных схем к выбранным базисным условиям и с учетом фактических коэффициентов трансформации всех силовых трансформаторов и автотрансформаторов;

- в именованных единицах без приведения значений параметров расчетных схем к одной ступени напряжения сети и с учетом фактических

коэффициентов трансформации силовых трансформаторов и автотрансформаторов.

При отсутствии данных о фактических коэффициентах трансформации силовых трансформаторов и автотрансформаторов допускается использовать приближенный способ их учета. Он состоит в замене фактических коэффициентов трансформации трансформаторов и автотрансформаторов отношением средних номинальных напряжений сетей соответствующих ступеней напряжения. При этом рекомендуется использовать следующую шкалу средних номинальных напряжений сетей: 3,15; 6,3; 10,5; 13,8; 15,75; 18; 20; 24; 27; 37; 115; 154; 230; 340; 515; 770; 1175 кВ.

Расчет токов КЗ в электрических сетях напряжением выше 1 кВ ведется в системе именованных или относительных единиц (о.е.).

Под относительным значением какой-либо величины понимают её отношение к другой одноименной величине, выбранной за единицу измерения. Величины, принятые в качестве единиц измерения, называют базисными. Обычно произвольно выбирают базисную мощность $S_б$, МВ·А, близкую к установленной мощности генераторов в расчетной схеме и округленную до целого числа. Принимают базисное напряжение $U_б$, кВ, на одной из ступеней, базисные напряжения на других ступенях пересчитывают по действительным (точное приведение) или по приближенным (приближенное приведение) коэффициентам трансформации.

Ниже приведены формулы для определения сопротивлений элементов электрической сети в системе относительных единиц при выбранных базисных условиях.

Синхронное индуктивное сопротивление генератора по продольной оси X_{d*} и его сверхпереходное сопротивление X_{d*}'' :

$$X_{d*} = X_{d(н)} \frac{S_б}{S_{ном}}; X_{d*}'' = X_{d(н)}'' \frac{S_б}{S_{ном}}, \quad (1.8)$$

где $S_{ном}$ – номинальная мощность генератора, МВ·А; $X_{d(н)}$ – продольное синхронное сопротивление генератора при номинальных условиях, о.е.; $X_{d(н)}''$ – сверхпереходное сопротивление при номинальных условиях, о.е.

Индуктивное сопротивление двухобмоточного трансформатора $X_{Т*}$:

$$X_{T*} = \frac{U_K}{100} \frac{S_{\delta}}{S_{\text{НОМ}}}, \quad (1.9)$$

где U_K – напряжение короткого замыкания, %; $S_{\text{НОМ}}$ – номинальная мощность трансформатора, МВ·А.

Индуктивные сопротивления обмоток высшего (ВН) X_{B*} и низшего напряжений (НН) $X_{H1*} = X_{H2*}$, о.е. трехобмоточного трансформатора с расщепленной на 2 цепи обмоткой НН:

$$X_{B*} = \frac{U_K}{100} \frac{S_{\delta}}{S_{\text{НОМ}}} \left(1 - \frac{K_p}{4}\right); X_{H1*} = X_{H2*} = \frac{2U_K}{100} \frac{S_{\delta}}{S_{\text{НОМ}}} \frac{K_p}{2}, \quad (1.10)$$

где U_K – напряжение короткого замыкания обмоток ВН и НН, %; $S_{\text{НОМ}}$ – номинальная мощность трансформатора, МВ·А; K_p – коэффициент связи. Для трехфазных трансформаторов, у которых обмотка НН расщеплена на две цепи, $K_p = 3,5$.

Индуктивные сопротивления обмоток высокого напряжения (ВН) X_{B*} , среднего напряжения (СН) X_{C*} и низкого напряжения НН X_{H*} трехобмоточного трансформатора или автотрансформатора в о.е., соответственно:

$$X_{B*} = \frac{U_{KB}}{100} \frac{S_{\delta}}{S_{\text{НОМ}}}; X_{C*} = \frac{U_{KC}}{100} \frac{S_{\delta}}{S_{\text{НОМ}}}; X_{H*} = \frac{U_{KH}}{100} \frac{S_{\delta}}{S_{\text{НОМ}}}, \quad (1.11)$$

где U_{KB} , U_{KC} , U_{KH} – напряжения короткого замыкания обмоток ВН, СН и НН соответственно, %; $S_{\text{НОМ}}$ – номинальная мощность трехобмоточного трансформатора или автотрансформатора, МВ·А.

Напряжения короткого замыкания обмоток ВН U_{KB} , СН U_{KC} и НН U_{KH} , % :

$$U_{KB} = 0,5(U_{BC} + U_{BH} - U_{CH}); \quad (1.12)$$

$$U_{KC} = 0,5(U_{BC} + U_{CH} - U_{BH}); \quad (1.13)$$

$$U_{KH} = 0,5(U_{BH} + U_{CH} - U_{BC}), \quad (1.14)$$

где U_{BC} , U_{BH} , U_{CH} – напряжения короткого замыкания по обмоткам ВН и СН, ВН и НН, СН и НН соответственно, %.

Индуктивное сопротивление одинарного реактора X_{p*} , о.е.,

$$X_{p*} = \frac{X_p S_{\sigma}}{\sqrt{3} U_{\text{ср ном}} I_{\text{ном}}} = \frac{X_p I_{\sigma}}{I_{\text{ном}}}, \quad (1.15)$$

где $U_{\text{ср ном}}$ – среднее номинальное напряжение ступени, где установлен реактор, кВ; $I_{\text{ном}}$ – номинальный ток реактора, кА.

Индуктивное сопротивление ветви сдвоенного реактора со стороны источника питания X_{pc} , о.е.,

$$X_{pc} = -K_{\text{св}} X_p. \quad (1.16)$$

Индуктивное сопротивление ветви сдвоенного реактора со стороны потребителя $X_{pн1} = X_{pн2}$, о.е.,

$$X_{pн1} = X_{pн2} = (1 + K_{\text{св}} X_p), \quad (1.17)$$

где $K_{\text{св}}$ – коэффициент связи между ветвями реактора; X_p – номинальное индуктивное сопротивление реактора.

Индуктивное сопротивление воздушной, кабельной линий $X_{л*}$, о.е.,

$$X_{л*} = \frac{X_0 l S_{\sigma}}{U_{\text{ср ном}}^2}, \quad (1.18)$$

где X_0 – удельное сопротивление линии, Ом/км; $U_{\text{ср ном}}$ – среднее номинальное напряжение линии, кВ; l – длина линии, км.

Индуктивное сопротивление асинхронного двигателя X_{M*} , о.е.,

$$X_{M*} = X_{M(\text{н})} \frac{S_{\sigma}}{S_{\text{ном}}}, \quad (1.19)$$

где $S_{\text{ном}}$ – номинальная мощность двигателя, МВ·А; $X_{M(\text{н})} = 1/I_{\text{п}}$ – сопротивление двигателя при номинальных условиях, о.е; $I_{\text{п}}$ – величина кратности пускового тока двигателя, о.е.

Сопротивление комплексной нагрузки Z_{H*} , о.е.,

$$Z_{H*} = Z_{H(\text{ном})} \frac{S_{\sigma}}{S_{\text{ном}}}, \quad (1.20)$$

где $Z_{H(\text{НОМ})}$ – сопротивление комплексной нагрузки при номинальных условиях, о.е.; $S_{\text{НОМ}}$ – номинальная мощность нагрузки, МВ·А.

Параметры элементов комплексной нагрузки приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Параметры элементов комплексной нагрузки

Потребители комплексной нагрузки	Значение эквивалентной ЭДС	cosφ	Сопротивление, отн.ед.	
			прямой последовательности	обратной последовательности
Синхронные двигатели напряжением свыше 1 кВ	1,074	0,9	0,04 + j0,15	0,04 + j0,15
Синхронные двигатели напряжением до 1 кВ	1,079	0,9	0,03 + j0,16	0,03 + j0,16
Асинхронные двигатели напряжением свыше 1 кВ	0,93	0,87	0,01 + j0,17	0,01 + j0,17
Асинхронные двигатели напряжением до 1 кВ	0,9	0,8	0,07 + j0,18	0,07 + j0,18
Лампы накаливания	0	1,0	1,0	1,33
Газоразрядные источники света	0	0,85	0,85 + j0,53	0,382 + j0,24
Преобразователи	0	0,9	0,9 + j0,45	1,66 + j0,81
Электротермические установки	0	0,9	1 + j0,49	0,4 + j0,2

Значения комплексных сопротивлений отдельных узлов обобщенной нагрузки приведены в табл. 1.3.

В таблице приняты следующие обозначения:

СД – синхронные электродвигатели напряжением свыше 1 кВ; АД – асинхронные электродвигатели напряжением выше 1 кВ; АДН – асинхронные электродвигатели напряжением до 1 кВ; П – преобразователи; ЭТ – электротермические установки; О – освещение.

Активное сопротивление генератора (синхронного двигателя) $R_{Г}$, о.е.,

$$R_{Г*} = \frac{X_{d*}}{\omega T_a}, \quad (1.21)$$

где T_a – постоянная времени апериодической составляющей тока генератора, с; $\omega = 314$ – угловая синхронная скорость, рад/с.

Таблица.1.3

Параметры узлов обобщенной нагрузки

Узел	Наименование элементов узлов нагрузки						Параметры узла нагрузки напряжением, кВ		
	СД	АД	АДН	П	ЭТ	О	6–10 кВ	ЭДС	35–110 кВ
№	СД	АД	АДН	П	ЭТ	О	$Z_{1Н(НОМ)}$	E_H''	$Z_{1Н(НОМ)}$
1	100	–	–	–	–	–	$0,04 + j0,15$	1,11	$0,04 + j0,25$
2	–	100	–	–	–	–	$0,03 + j0,17$	0,936	$0,03 + j0,27$
3	25	10	40	10	11	4	$0,3 + j0,43$	0,865	$0,04 + j0,54$
4	50	10	15	–	–	25	$0,1 + j0,33$	1,03	$0,15 + j0,43$
5	–	–	35	–	–	65	$0,17 + j0,23$	0,788	$0,2 + j0,34$
6	50	50	–	–	–	–	$0,02 + j0,2$	1,0	$0,02 + j0,31$

Активное сопротивление статора асинхронных электродвигателей допускается определять по формуле

$$R_{*a(НОМ)} = \frac{s_{НОМ}}{100}, \quad (1.22)$$

где $s_{НОМ}$ – номинальное скольжение электродвигателя, %.

Активное сопротивление двухобмоточного трансформатора $R_{Т*}$, о.е.,

$$R_{Т*} = \Delta P_K \frac{S_{\delta}}{S_{НОМ}^2}, \quad (1.23)$$

где ΔP_K – потери КЗ, кВт; $S_{НОМ}$ – мощность трансформатора, МВ·А.

Активные сопротивления обмоток ВН $R_{В*}$ и НН $R_{Н1*} = R_{Н2*}$ двухобмоточного трансформатора с расщепленной обмоткой НН, о.е.,

$$R_{В*} = \Delta P_K \frac{S_{\delta}}{2S_{НОМ}^2}; R_{Н1*} = R_{Н2*} = 2R_{*}. \quad (1.24)$$

Активные сопротивления обмоток ВН R_{B^*} , СН R_{C^*} и НН R_{H^*} трехобмоточного трансформатора или автотрансформатора, о.е.,

$$R_{B^*} = \Delta P_{KB} \frac{S_{\delta}}{S_{НОМ}^2}; R_{C^*} = \Delta P_{KC} \frac{S_{\delta}}{S_{НОМ}^2}; R_{H^*} = \Delta P_{KH} \frac{S_{\delta}}{S_{НОМ}^2}, \quad (1.25)$$

где ΔP_{KB} , ΔP_{KC} , ΔP_{KH} – потери короткого замыкания обмоток ВН, СН и НН соответственно, кВт; $S_{НОМ}$ – номинальная мощность трансформатора, МВ·А.

Потери короткого замыкания обмоток ВН ΔP_{KB} , СН ΔP_{KC} и НН ΔP_{KH} , кВт:

$$\Delta P_{KB} = 0,5(\Delta P_{KBC} + \Delta P_{KBH} - \Delta P_{KCH}); \quad (1.26)$$

$$\Delta P_{KC} = 0,5(\Delta P_{KBC} + \Delta P_{KCH} - \Delta P_{KBH}); \quad (1.27)$$

$$\Delta P_{KH} = 0,5(\Delta P_{KBH} + \Delta P_{KCH} - \Delta P_{KBC}), \quad (1.28)$$

где ΔP_{KBC} , ΔP_{KBH} , ΔP_{KCH} – потери короткого замыкания по обмоткам высокого и среднего, высокого и низкого, среднего и низкого напряжений соответственно, кВт.

Активное сопротивление одинарного реактора R_{p^*} , о.е.,

$$R_{p^*} = \frac{\Delta P_{НОМ} S_{\delta}}{U_{ср\ NOМ}^2 I_{НОМ}^2}, \quad (1.29)$$

где $\Delta P_{НОМ}$ – номинальные потери на фазу реактора, мВт; $I_{НОМ}$ – номинальный ток реактора, А.

Активное сопротивление каждой ветви сдвоенного реактора, о.е.,

$$R_{p^*} = \frac{\Delta P_{НОМ} S_{\delta}}{2U_{ср\ NOМ}^2 I_{НОМ}^2}. \quad (1.30)$$

Активное сопротивление воздушной, кабельной линий $R_{л}$, о.е.,

$$R_{л^*} = \frac{R_0 l S_{\delta}}{U_{ср\ NOМ}^2}, \quad (1.31)$$

где R_0 – удельное активное сопротивление линии, Ом/км.

Активное сопротивление асинхронного электродвигателя $R_{дв}$, о.е.,

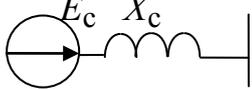
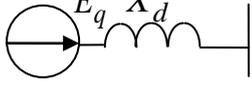
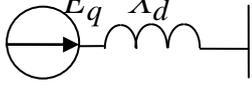
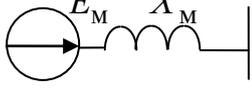
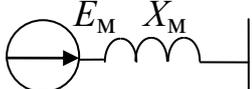
$$R_{M^*} = \frac{M_{\Pi} U_{НОМ}^2 \cos\varphi_{НОМ}}{P_{НОМ} I_{\Pi}^2}, \quad (1.32)$$

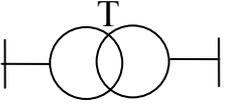
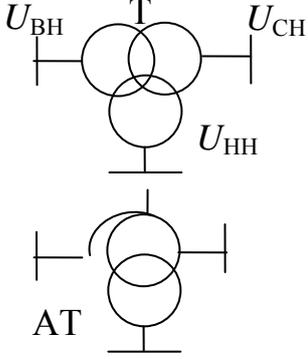
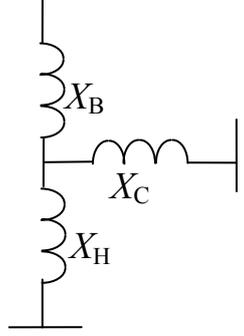
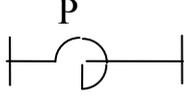
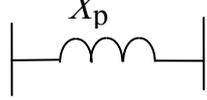
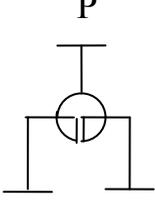
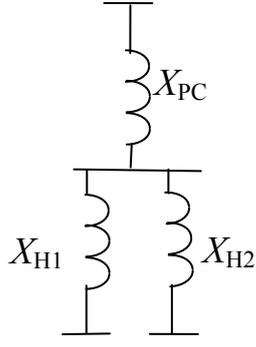
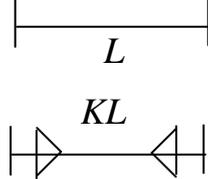
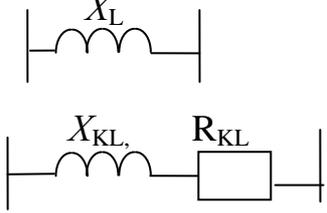
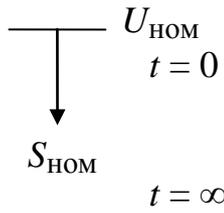
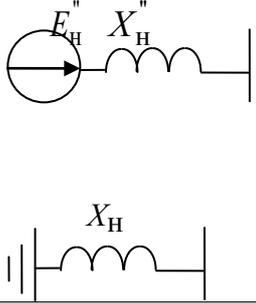
где $P_{НОМ}$ – номинальная активная мощность двигателя, МВт; M_{Π} – величина кратности пускового момента двигателя, о.е., $\cos\varphi_{НОМ}$ – номинальный коэффициент мощности.

В табл. 1.4 приведены схемы замещения основных элементов электрической сети.

Таблица 1.4

Схемы замещения основных элементов электрической сети

Наименование элемента	Принципиальная схема	Схема замещения
1	2	3
Система		
Синхронный генератор		
Синхронный двигатель		
Асинхронный двигатель		
		

1	2	3
Двухобмоточный трансформатор		
Трехобмоточный трансформатор, автотрансформатор		
Одинарный реактор		
Сдвоенный реактор		
Воздушная линия Кабельная линия		
Обобщенная нагрузка		

1.5. Составление схемы замещения

Составление схем замещения сводится к приведению параметров элементов и ЭДС различных ступеней трансформации к какой-либо одной ступени, выбранной за основную. Параметры элементов и ЭДС выражают в именованных или в относительных единицах.

При расчете токов КЗ аналитическим методом следует предварительно по исходной расчетной схеме составить соответствующую схему замещения. При этом сопротивления всех элементов схемы и ЭДС источников энергии могут быть выражены как в именованных, так и в относительных единицах.

Если известны фактические при принятых исходных условиях коэффициенты трансформации всех трансформаторов и автотрансформаторов расчетной схемы, то составление схемы замещения следует производить с учетом этих коэффициентов. Если же фактические коэффициенты трансформации части трансформаторов и автотрансформаторов неизвестны, то допускается при составлении схемы замещения указанные коэффициенты учитывать приближенно.

При выражении параметров элементов эквивалентной схемы замещения в именованных единицах с приведением параметров различных элементов исходной расчетной схемы к выбранной основной (базисной) ступени напряжения сети и с учетом фактических коэффициентов трансформации силовых трансформаторов и автотрансформаторов приведенные значения ЭДС источников энергии и сопротивления различных элементов схемы следует определять по формулам

$$\overset{\circ}{E} = EK_{T1}K_{T2}\dots K_{Tm}; \quad (1.33)$$

$$\overset{\circ}{Z} = ZK_{T1}^2K_{T2}^2\dots K_{Tm}^2, \quad (1.34)$$

где E и Z – истинные значения ЭДС источника энергии и сопротивления какого-либо элемента исходной расчетной схемы; $\overset{\circ}{E}$ и $\overset{\circ}{Z}$ – их приведенные значения; $K_{T1}, K_{T2}, \dots, K_{Tm}$ – коэффициенты трансформации трансформаторов или автотрансформаторов, включенных каскадно между ступенью напряжения сети, где находятся элементы с подлежащими приведению ЭДС E и сопротивлением Z , и основной ступенью напряжения.

Если ЭДС источника энергии и сопротивление какого-либо элемента расчетной схемы выражены в относительных единицах при номинальных условиях (т.е. ЭДС при номинальном напряжении $U_{\text{НОМ}}$, а сопротивление - при номинальном напряжении и номинальной мощности S), то значения соответствующей ЭДС и сопротивления, приведенные к основной ступени напряжения сети, следует определять по формулам

$$\overset{\circ}{E} = E_{\text{НОМ}*} U_{\text{НОМ}} K_{T1} K_{T2} \dots K_{Tm}; \quad (1.35)$$

$$\overset{\circ}{Z} = \underline{Z}_{\text{НОМ}*} \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}} K_{T1}^2 K_{T2}^2 \dots K_{Tm}^2, \quad (1.36)$$

где $E_{\text{НОМ}*}$ и $\underline{Z}_{\text{НОМ}*}$ – значения ЭДС источника энергии и сопротивления элемента расчетной схемы в относительных единицах при номинальных условиях.

Под коэффициентом трансформации трансформатора (автотрансформатора) понимается отношение напряжения холостого хода его обмотки, обращенной в сторону выбранной основной ступени напряжения сети, к напряжению холостого хода другой обмотки.

При выражении параметров элементов эквивалентной схемы замещения в относительных единицах с приведением параметров различных элементов исходной расчетной схемы к базисным условиям и с учетом фактических коэффициентов трансформации силовых трансформаторов и автотрансформаторов необходимо задаться базисной мощностью $S_{\text{б}}$ и для одной из ступеней напряжения исходной расчетной схемы, принимаемой за основную, выбрать базисное напряжение $U_{\text{б.осн}}$;

Базисные напряжения других ступеней напряжения расчетной схемы определяются по формуле :

$$U_{\text{б}i} = \frac{1}{K_1 K_2 \dots K_m} U_{\text{б.осн}}, \quad (1.37)$$

где $K_{T1}, K_{T2}, \dots, K_{Tm}$ – коэффициенты трансформации трансформаторов и автотрансформаторов, включенных каскадно между основной и i -й ступенями напряжения.

Искомые значения ЭДС источников энергии и сопротивлений всех элементов схемы замещения в относительных единицах при выбранных базисных условиях:

а) когда значения ЭДС источника энергии и приводимое сопротивление заданы в именованных единицах :

$$E_{\delta^*} = \frac{E}{U_{\delta i}}, \quad Z_{\delta^*} = Z \frac{S_{\delta}}{U_{\delta i}^2}, \quad (1.38)$$

б) когда значения этих величин заданы в относительных единицах при номинальных условиях :

$$E_{\delta^*} = E_{\text{НОМ}^*} \frac{U_{\text{НОМ}}}{U_{\delta i}}; \quad (1.39)$$

$$Z_{\delta^*} = Z_{*(\text{НОМ})} \frac{S_{\delta}}{S_{\text{НОМ}}} \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{U_{\delta i}^2}, \quad (1.40)$$

где $U_{\delta i}$ – базисное напряжение той ступени напряжения исходной расчетной схемы, на которой находится элемент, подлежащий приведению.

Истинные величины должны быть пересчитаны столько раз, сколько имеется трансформаторов между приводимой цепью и принятой основной ступенью. Для трансформаторов можно принять, что отношение числа витков равно отношению соответствующих напряжений при холостом ходе трансформатора, т.е. $K_T = \omega_1 / \omega_2 \approx U_{1\text{ХХ}} / U_{2\text{ХХ}}$. Поэтому в вышеприведенных выражениях под коэффициентом трансформации трансформатора (автотрансформатора) понимается отношение междуфазного напряжения холостого хода его обмотки, обращенной в сторону основной ступени напряжения, к аналогичному напряжению его другой обмотки, находящейся ближе к ступени, элементы которой подлежат приведению [2]. Для пояснения данного положения рассмотрим схему на рис. 1.1, где представлена электрическая система, состоящая из генератора Г, трансформаторов Т1 и Т2, линий Л1 и Л2 с тремя ступенями напряжения: первой (I), второй (II) и третьей (III).

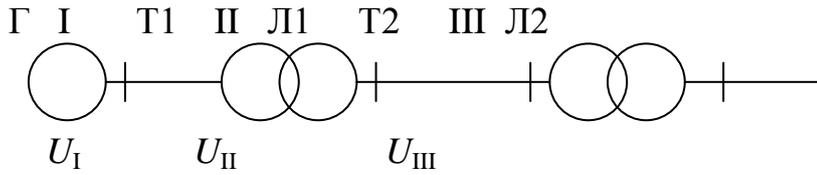


Рис. 1.1. Схема электрической сети с несколькими магнитно-связанными цепями

В качестве основной ступени примем третью ступень напряжения – III. Приведенное к III (основной) ступени напряжения, сопротивление генератора $\overset{\circ}{X}_d$, Ом, определяется как

$$\overset{\circ}{X}_d = X_d \left(\frac{U_{II}}{U_I} \right)^2 \left(\frac{U_{III}}{U_{II}} \right)^2 = X_d K_{T1}^2 K_{T2}^2. \quad (1.41)$$

ЭДС генератора $\overset{\circ}{E}_\Gamma$, кВ, определяется по выражению

$$\overset{\circ}{E}_\Gamma = E_\Gamma \frac{U_{II}}{U_I} \frac{U_{III}}{U_{II}} = E_\Gamma K_{T1} K_{T2}. \quad (1.42)$$

Ток генератора $\overset{\circ}{I}_\Gamma$, кА, определяется по выражению

$$\overset{\circ}{I}_\Gamma = \frac{I_\Gamma}{\frac{U_{II}}{U_I} \frac{U_{III}}{U_{II}}} = \frac{I_\Gamma}{K_{T1} K_{T2}}, \quad (1.43)$$

где $K_{T1} = \frac{U_{II}}{U_I}$ – действительный коэффициент трансформации трансформатора Т1; $K_{T2} = \frac{U_{III}}{U_{II}}$ – действительный коэффициент трансформации трансформатора Т2.

Рассмотренное приведение по действительным коэффициентам трансформации называют точным приведением.

Источники энергии (генераторы, синхронные компенсаторы, а также электродвигатели мощностью 100 кВт и более, если они не отделены от расчетной точки КЗ токоограничивающим реактором или трансформатором) и обобщенные нагрузки узлов должны быть введены в схему ЭДС и индуктивными сопротивлениями, соответствующими рассматриваемому моменту времени. При расчете начального значения

периодической составляющей тока КЗ они должны быть представлены в схеме замещения сверхпереходными ЭДС и сопротивлениями. Все остальные элементы исходной расчетной схемы должны быть представлены в схеме замещения сопротивлениями прямой последовательности. Трехобмоточные трансформаторы, авто-трансформаторы, трансформаторы с расщепленной обмоткой низшего напряжения, а также сдвоенные реакторы должны быть представлены своими схемами замещения.

Для определения токов и напряжений в месте КЗ необходимо полную схему замещения преобразовать путем эквивалентирования к простейшей радиальной ветви согласно рис. 1.2.

Начальный ток $I_{п0}^*$, о. е., в месте КЗ равен

$$I_{п0}^* = \frac{E_{\mathcal{E}}^*}{Z_{\mathcal{E}}^*}, \quad (1.44)$$

где $E_{\mathcal{E}}^*$, $Z_{\mathcal{E}}^*$ – соответственно эквивалентные ЭДС и сопротивление.

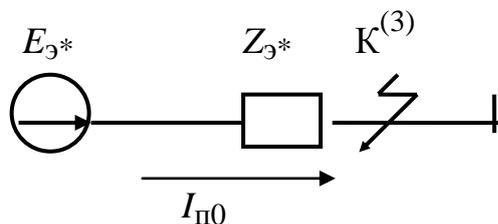


Рис. 1.2. Эквивалентная схема замещения

При преобразовании схем замещения используются следующие приемы:

- 1) преобразование последовательной и параллельной цепи в эквивалентную;
- 2) преобразование «треугольника» сопротивлений в эквивалентную «звезду» сопротивлений и наоборот;
- 3) замена нескольких параллельно включенных источников эквивалентным.

Рекомендации по преобразованию схем замещения:

- 1) преобразование выгодно вести так, чтобы аварийная ветвь до конца преобразования была сохранена;

2) при металлическом трехфазном КЗ узел с несколькими сходящимися в нем ветвями можно разрезать, сохранив на конце каждой образовавшейся ветви такое же КЗ.

Формулы преобразования «треугольника» сопротивлений в эквивалентную «звезду» сопротивлений (рис. 1.3)

$$Z_A = \frac{Z_{AB}Z_{CA}}{Z_{AB} + Z_{CA} + Z_{BC}}; Z_B = \frac{Z_{AB}Z_{CA}}{Z_{AB} + Z_{CA} + Z_{BC}}; Z_C = \frac{Z_{BC}Z_{CA}}{Z_{AB} + Z_{CA} + Z_{BC}}; \quad (1.45)$$

$$I_{AB} = (I_A Z_A - I_B Z_B)/Z_{AB}; I_{CA} = (I_C Z_C - I_A Z_A)/Z_{CA}; \quad (1.46)$$

$$I_{BC} = (I_B Z_B - I_C Z_C)/Z_{BC}. \quad (1.47)$$

Формулы преобразования «звезды» сопротивлений в эквивалентный «треугольник» сопротивлений (рис. 1.4)

$$Z_{AAB} = Z_A + Z_B + \frac{Z_A Z_B}{Z_C}; Z_{CA} = Z_A + Z_C + \frac{Z_A Z_C}{Z_B}; \quad (1.48)$$

$$Z_{BC} = Z_B + Z_C + \frac{Z_B Z_C}{Z_A}; \quad (1.49)$$

$$I_A = I_{AB} - I_{CA}; I_B = I_{BC} - I_{AB}; I_C = I_{CA} - I_{BC}. \quad (1.50)$$

Формулы преобразования нескольких параллельно включенных источников эквивалентным (рис. 1.5)

$$E_3 = Y_3 \sum Y_i E_i; Y_3 = \sum Y_i; Y_i = 1/Z_i; \quad (1.51)$$

при $n = 2$

$$E_3 = \frac{E_1 Z_2 + E_2 Z_1}{Z_1 + Z_2}; Z_3 = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}; \quad (1.52)$$

$$I_1 = (E_1 - U)/Z_1; I_2 = (E_2 - U)/Z_2. \quad (1.53)$$

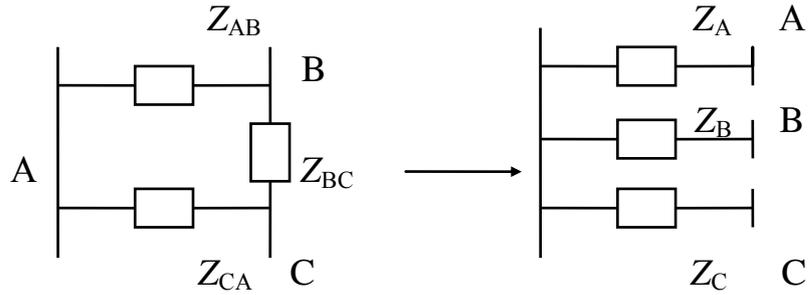


Рис. 1.3. Преобразование «треугольника» сопротивлений в эквивалентную «звезду»

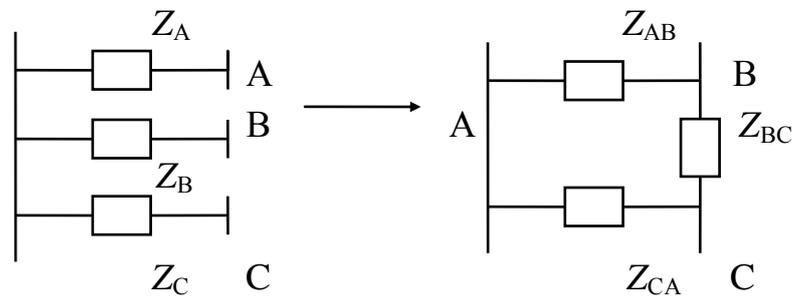


Рис. 1.4. Преобразование «звезды» сопротивлений в эквивалентный «треугольник»

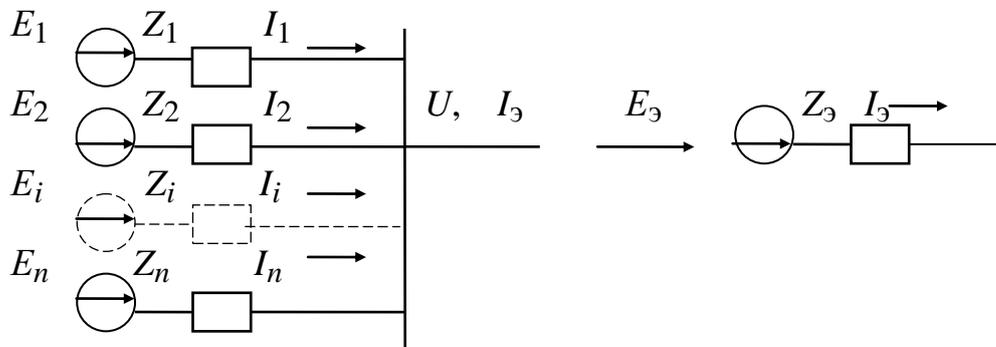


Рис. 1.5. Замена нескольких параллельно включенных источников с ЭДС $E_1 - E_n$ и сопротивлениями $Z_1 - Z_n$ эквивалентным с ЭДС E_3 и сопротивлением Z_3

Если известно доаварийное значение напряжения в точке КЗ U_{K0} , то расчет тока КЗ можно упростить, используя метод наложения собственно аварийного режима на предшествующий. Тогда ток в точке КЗ можно получить путем суммирования (наложения) токов разных режимов – предшествующего тока $I_{/0/}$ и аварийной составляющей тока I_K , получаемой

от действия одной ЭДС, приложенной в точке КЗ и равной $U_{к0} = U_{/0/}$, где $U_{/0/}$ – напряжение, которое было до возникновения КЗ в расчетной схеме.

Аварийная составляющая тока КЗ

$$I_{к} = - \frac{U_{к0}}{Z_{\Sigma}}, \quad (1.54)$$

где Z_{Σ} – модуль результирующего сопротивления схемы замещения относительно места КЗ при равенстве нулю ЭДС всех генерирующих ветвей.

Ток в произвольной ветви j расчетной схемы при КЗ в точке α равен

$$I_{кj} = I_{/0/j} + I_{кj} \quad (1.55)$$

Контрольные вопросы

1. Как определяются параметры схемы замещения электрической сети в относительных единицах при точном приведении?
2. Какой схемой замещения могут быть представлены трехобмоточный трансформатор, автотрансформатор?
3. Запишите выражение для определения сверхпереходной ЭДС асинхронного двигателя.
4. Зарисуйте схему замещения реактора.
5. Как записываются выражения для определения ЭДС синхронных машин в установившемся режиме?
6. Какие последствия в электрической системе может вызвать протекание тока короткого замыкания?
7. Каковы причины возникновения электромагнитных переходных процессов в электрической системе?
8. Какими схемами замещения могут представляться воздушная и кабельная линии?
9. С какой целью необходимо рассчитывать электромагнитные переходные процессы?
10. Что понимается под базисными условиями?
11. Какие существуют методы преобразования электрических систем?
12. Как вводятся в схему замещения пассивные элементы электрической сети?

13. Как представляется комплексная нагрузка в схему замещения?
14. Какие допущения принимаются при расчетах токов КЗ в ЭУ напряжением выше 1 кВ?
15. В чем заключаются особенности составления схем замещения при пуске электродвигателей?
16. Какими параметрами вводится в схему замещения асинхронный и синхронный электродвигатели при пуске?
17. Каким образом определяются параметры системы и режима в именованных единицах при точном приведении?
18. Укажите преимущества расчета тока короткого замыкания в относительных единицах.
19. К чему сводится составление схем замещения электрической сети, имеющей несколько ступеней трансформации?
20. Назовите методы эквивалентирования.
21. Какие имеются рекомендации по преобразованию схем замещения?

Задача для самопроверки

Задача 1.1.

Схема исследуемой сети представлена на рис. 31.1.

Генератор Г: $S_{\text{НОМ}} = 176 \text{ МВ}\cdot\text{А}$, $U_{\text{НОМ}} = 15,75 \text{ кВ}$, $X_{d^*}'' = 0,15$, $\cos\varphi_{\text{НОМ}} = 0,85$, $K_3 = 0,9$.

Трансформатор Т: $S_{\text{НОМ}} = 180 \text{ МВ}\cdot\text{А}$, $U_{\text{ВН}} = 242 \text{ кВ}$, $U_{\text{НН}} = 242 \text{ кВ}$, $U_{\text{К}} = 12 \%$,

Линия Л: $l = 100 \text{ км}$, $X_0 = 0,4 \text{ Ом/км}$,

Автотрансформатор АТ: $S_{\text{НОМ}} = 180 \text{ МВ}\cdot\text{А}$, $U_{\text{ВН}} = 220 \text{ кВ}$, $U_{\text{НН}} = 11 \text{ кВ}$, $U_{\text{СН}} = 38,5 \text{ кВ}$, $U_{\text{КВС}} = 12 \%$, $U_{\text{КВН}} = 20 \%$, $U_{\text{КСН}} = 8 \%$.

Требуется: определить при точном приведении относительные ЭДС и реактивности элементов схемы замещения.

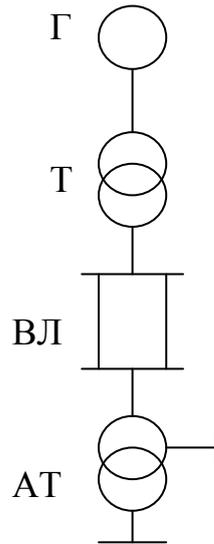


Рис. 31.1. Схема исследуемой сети к задаче 1.1.

2. РАСЧЕТ ТОКА ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Для упрощения расчета трехфазного КЗ при составлении схемы замещения принимают следующие допущения:

- 1) все элементы схемы считают линейными;
- 2) токами намагничивания трансформаторов пренебрегают;
- 3) параметры всех фаз считают одинаковыми;
- 4) емкостными проводимостями линий пренебрегают (или учитывают их в виде емкостей, сосредоточенных по концам линии);
- 5) нагрузки учитывают приближенно;
- 6) скорости вращения всех машин считают синхронными;
- 7) пренебрегают активными сопротивлениями элементов схемы.

Последнее допущение приемливо только при определении начального и конечного значений параметров режима переходного процесса в основных звеньях сети высокого напряжения. При этом приближенный учет активных сопротивлений находит отражение при оценке постоянных времени затухания свободных составляющих токов. В тех случаях, когда расчет тока КЗ производится для протяженных кабельных или воздушных линий сети с относительно небольшими сечениями проводников, данное допущение не пригодно.

2.1. Расчет действующего значения периодической составляющей тока трехфазного короткого замыкания в начальный момент времени

При внезапном изменении режима в обмотке возбуждения наводится ток, который создает магнитный поток, направленный навстречу магнитному потоку статора. При наличии демпферных контуров вытеснение внезапно изменившегося магнитного потока статора получается более интенсивным. Для расчета начального значения периодической составляющей тока КЗ можно воспользоваться тем, что при внезапном изменении режима результирующее потокосцепление ротора и его угловая скорость вращения остаются неизменными: $\Psi_{f0} = \Psi_{f(0)}$; $\omega_{Г0} = \omega_{Г(0)}$. Результирующему потокосцеплению соответствует определенная ЭДС, также неизменная в первый момент переходного процесса. Результирующая или так называемая переходная ЭДС, а также переходная реактивность синхронной машины могут быть получены из схемы замещения и векторных диаграмм.

В начальный момент синхронные машины без демпферных обмоток вводят в схему замещения своими переходными ЭДС E' и сопротивлениями X'_d , синхронные машины с демпферными обмотками вводятся сверхпереходными ЭДС E'' и сопротивлениями X''_d .

Сверхпереходные ЭДС синхронных генераторов E''_0 , синхронных двигателей $E''_{0дв}$, работающих в режиме перевозбуждения и синхронных компенсаторов (СК) определяют по выражениям:

$$E''_0 = \sqrt{(U_0 \cos \varphi_0)^2 + (U_0 \sin \varphi_0 + I_0 X''_d)^2} \quad (2.1)$$

или

$$E''_0 = U_0 + I_0 X''_d \sin \varphi_0 \quad (2.2)$$

Сверхпереходные ЭДС асинхронных двигателей $E''_{0дв}$, работающих в режиме недовозбуждения определяют по формуле:

$$E''_{0дв} = \sqrt{(U_{0дв} \cos \varphi_{0дв})^2 + (U_{0дв} \sin \varphi_{0дв} - I_{0дв} X''_{дв})^2} \quad (2.3)$$

где $U_{0дв}$, $I_{0дв}$, $\cos \varphi_{0дв}$ – параметры доаварийного режима на зажимах асинхронного двигателя, о.е.

Сверхпереходные ЭДС синхронных компенсаторов (СК)

$$E_{0\text{ СК}}'' = U_{0\text{ СК}} \pm I_{0\text{ СК}} X_d'' \quad (2.4)$$

где $U_{0\text{ СК}}$, $I_{0\text{ СК}}$ – параметры доаварийного режима на зажимах СК, о.е.

Переходные ЭДС синхронных машин определяются также как сверхпереходные, только в формулы ЭДС вводятся переходные сопротивления. При отсутствии необходимых данных о доаварийном режиме принимают средние значения ЭДС E_0'' и сопротивлений X_d'' [2].

Для обобщенной нагрузки при номинальных условиях значения ЭДС и сопротивления в системе относительных единиц принимают соответственно равными $E_H'' = 0,85$ и $X_H'' = 0,35$.

Если доаварийным режимом является холостой ход, то нагрузка в схеме отсутствует, а ЭДС всех генераторов и СК принимают $E_0'' = U_0 = 1$.

Начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ в радиальной ветви $I_{\text{по}}$, кА, содержащей сверхпереходную ЭДС E_0'' , о.е., и эквивалентное сопротивление X_3 , о.е., составляет

$$I_{\text{по}} = \frac{E_0''}{X_3} I_6 \quad (2.5)$$

Порядок расчета тока в начальный момент КЗ:

- 1) составляется схема замещения, в которую генераторы вводятся ЭДС E' или E'' и сопротивлениями соответственно X_d' или X_d'' ;
- 2) схема замещения преобразуется относительно точки короткого замыкания к простейшему виду, и находится начальный ток в месте КЗ;
- 3) определяются токи в ветвях схемы.

2.2. Учет синхронных и асинхронных электродвигателей при расчете начального тока короткого замыкания

При расчете начального действующего значения периодической составляющей тока трехфазного КЗ в электроустановках напряжением свыше 1 кВ в исходную расчетную схему должны быть введены все синхронные и асинхронные электродвигатели мощностью 100 кВт и более, если между электродвигателями и точкой КЗ отсутствуют

токоограничивающие реакторы или силовые трансформаторы. В автономных электрических системах следует учитывать и электродвигатели меньшей мощности, если сумма их номинальных токов составляет не менее 1 % от тока в месте КЗ, определенного без учета этих электродвигателей.

Степень влияния синхронных и асинхронных электродвигателей на ток КЗ зависит от характера исходной расчетной схемы, положения расчетной точки КЗ, удаленности последней от электродвигателей и многих других факторов.

Расчет начального действующего значения периодической составляющей тока КЗ от синхронных и асинхронных электродвигателей (или с учетом электродвигателей) зависит от места их размещения в расчетной схеме:

– двигатель подключен непосредственно к шинам, где произошло КЗ (рис. 2.1);

– точка КЗ находится за общим сопротивлением двигателя или группы двигателей и системы (рис. 2.2).

При включении по радиальной схеме начальный периодический ток от двигателей при КЗ находится от каждого двигателя отдельно. При этом начальный ток подпитки от двигателя определяется по выражению

$$I_{п0дв} = \frac{E_{0дв}''}{X_{двэ}''} I_{б}, \quad (2.6)$$

где $X_{дв}''$, $E_{0дв}''$ – сверхпереходные сопротивление и ЭДС двигателя (асинхронного или синхронного).

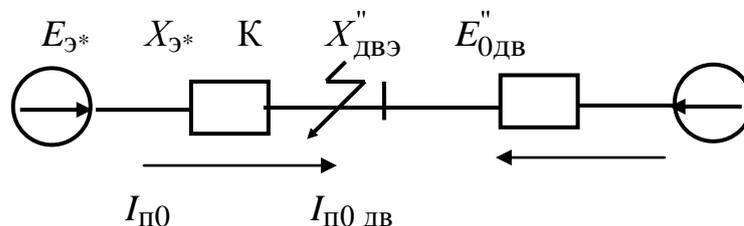


Рис. 2.1. Эквивалентная схема замещения

Начальный периодический ток в месте КЗ

$$I_{п0к} = I_{п0э} + I_{п0дв}.$$

2.3. Учет комплексной нагрузки при расчете начального тока короткого замыкания

При расчетах токов КЗ следует учитывать влияние каждой комплексной нагрузки, если ток в месте КЗ от той нагрузки составляет не менее 5 % тока в месте КЗ, определенного без учета нагрузки.

В общем случае ток КЗ от комплексной нагрузки следует определять как геометрическую сумму токов от отдельных ее элементов.

В приближенных расчетах допускается эквивалентирование комплексной нагрузки с представлением ее в виде эквивалентной ЭДС и эквивалентного сопротивления.

Эквивалентное сопротивление прямой (обратной) последовательности $Z_{1н(ном)}$, $Z_{2н(ном)}$ в относительных единицах в зависимости от относительного состава потребителей узла при номинальных условиях допускается рассчитывать по формуле

$$Z_{1н(ном)}^* = S_{\Sigma} \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{S_i}{\sqrt{R_{iн(ном)}^2 + X_{iн(ном)}^2}}}, \quad (2.7)$$

где $R_{iн(ном)}$ и $X_{iн(ном)}$ – активная и индуктивная составляющие сопротивления прямой (обратной) последовательности i -го потребителя, включая составляющие сопротивления элементов, связывающих потребителя с шинами узла; их значения в относительных единицах при суммарной номинальной мощности нагрузки S_{Σ} , кВ·А, и среднем номинальном напряжении той ступени напряжения сети, где она присоединена; S_i – полная установленная мощность i -го потребителя нагрузки, кВ·А.

При отсутствии достоверных данных об относительном составе потребителей комплексной нагрузки можно использовать типовой состав нагрузки отдельных отраслей, выраженный в процентах от суммарной установленной мощности узла и приведенный в [3].

Метод расчета тока КЗ от комплексной нагрузки зависит от характера исходной схемы замещения узла и положения точки КЗ (рис. 2.2, рис. 2.3).

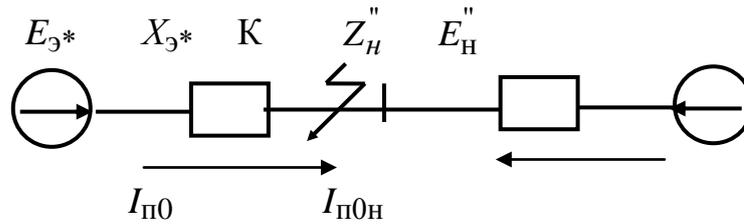


Рис. 2.2. Радиальная расчетная схема замещения при непосредственном КЗ на шинах нагрузки

При радиальной расчетной схеме (рис. 2.2) допускается не учитывать влияние статических потребителей (преобразователей, электро-термических установок и др.).

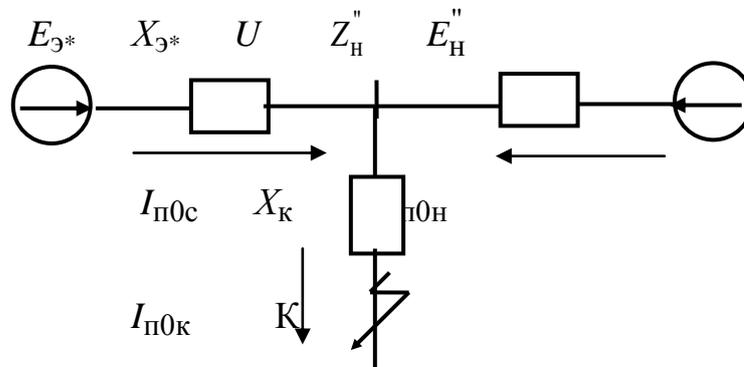


Рис. 2.3. Эквивалентная схема замещения при КЗ за общим сопротивлением

Начальное значение периодической составляющей тока КЗ при непосредственном КЗ на шинах нагрузки рекомендуется определять, используя выражение (рис. 2.2)

$$\dot{I}_{п0H} = \dot{E}_H'' / Z_H'' \quad (2.8)$$

где \dot{E}_H'' и Z_H'' – результирующая ЭДС и сопротивление узла нагрузки. Их значения можно определить по данным табл. 1 или 2, в зависимости от относительного состава потребителей.

При КЗ за общим для узла нагрузки и системы сопротивлением (рис. 2.3) начальное значение периодической составляющей тока в точке короткого замыкания K определяется по выражению

$$i_{п0к} = \frac{E_c Z_H'' + E_H'' Z_c}{Z_H'' Z_c + Z_H'' Z_k + Z_c Z_k}, \quad (2.9)$$

где E_c – ЭДС системы; Z_c – результирующее сопротивление со стороны системы до сборных шин узла; Z_k – эквивалентное сопротивление элементов, включенных между точкой КЗ и шинами узла нагрузки.

Начальное значение периодической составляющей тока КЗ от узла нагрузки (рис. 2.3):

$$i_{п0н} = \frac{E_H'' - U}{Z_H''}, \quad (2.10)$$

где U – напряжение в узле присоединения нагрузки:

$$\dot{U} = i_{п0к} Z_k. \quad (2.11)$$

2.4. Расчет аperiodической составляющей тока трехфазного короткого замыкания

Наибольшее значение аperiodической составляющей i_{a0} , кА, тока трехфазного КЗ имеет место при нулевой фазе включения на КЗ ($\alpha = 0$) и фазе тока $\varphi_k \approx 90^\circ$ и принимается равным амплитуде начального значения периодической составляющей

$$i_{a0} = I_{пm} = \sqrt{2} I_{п0}. \quad (2.12)$$

Значение аperiodической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени t в радиальной ветви определяется по выражению

$$i_{at} = i_{a0} e^{-t/T_a}, \quad (2.13)$$

где $T_a = X_3/\omega_0 R_3$ – постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ, с; ω_0 – промышленная угловая частота напряжения сети, рад/с, $\omega_0 = 314$ рад/с; X_3 , R_3 – соответственно эквивалентное индуктивное и активное сопротивления схем замещения.

За время T_a аperiodическая составляющая тока КЗ практически затухает (составляет 5 % первоначального значения). Чем меньше величина T_a , тем быстрее затухает аperiodическая составляющая. В

сложной схеме аperiodическую составляющую считают затухающей с эквивалентной постоянной времени $T_3 = X_3 / \omega_0 R_3$.

Аperiodическую составляющую тока КЗ, создаваемую асинхронным и синхронным двигателями в произвольный момент времени t переходного процесса в радиальной ветви, рассчитывают по выражению

$$i_{at \text{ ДВ}} = i_{a0 \text{ ДВ}} e^{-t/T_{a \text{ ДВ}}}, \quad (2.14)$$

где $T_{a \text{ ДВ}} = X''_{\text{ДВ}} / \omega_0 R_{\text{ДВ}}$ – постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ на зажимах двигателей; $X''_{\text{ДВ}}$, $R_{\text{ДВ}}$ – соответственно сверхпереходное индуктивное и активное сопротивления схем замещения.

Если внешнее сопротивление $X_{\text{ВН}} \leq 0,1 \div 0,2 X''_{\text{ДВ}}$, то его можно не учитывать.

2.5. Расчет полного и ударного тока трехфазного короткого замыкания

Полный ток в цепи КЗ состоит из двух слагающих: принужденного тока (периодического) $i_{\text{пт}}$, изменяющегося с постоянной амплитудой $I_{\text{пт}}$ и свободного (аperiodического) $i_{\text{ат}}$, затухающего по экспоненте.

Для упрощения подсчета полного тока принимают, что питание цепи осуществляется от источника, собственное сопротивление которого равно нулю, напряжение источника изменяется с постоянной частотой и неизменной амплитудой. Тогда за рассматриваемый период амплитуды периодической и аperiodической слагающих тока неизменны. Каждая равна своему значению в данный момент времени.

Полный ток в цепи КЗ является функцией двух переменных: времени t , фазы включения α и определяется выражением

$$i_t = I_{\text{пт}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_{\text{к}}) + I_{\text{пт}} e^{-t/T_a} = i_{\text{пт}} + i_{\text{ат}} \quad (2.15)$$

или при $\alpha = 0$

$$i_t = \sqrt{2} I_{\text{п0}} \sin(\omega t - \varphi_{\text{к}}) + \sqrt{2} I_{\text{п0}} Z_{\text{к}} e^{-t/T_a}, \quad (2.16)$$

где $\varphi_{\text{к}} = \arctg X_{\text{к}} / R_{\text{к}}$ – угол сдвига в короткозамкнутой цепи, T_a – постоянная времени аварийной цепи, $\varphi_{\text{к}} = 90^\circ$ для цепей с преобладающей

индуктивностью; $I_{п0}$ – начальный ток короткого замыкания, X_k , R_k – соответственно индуктивное и активное сопротивления цепи КЗ; ω – угловая скорость.

Ударный ток i_y – это максимальное мгновенное значение тока КЗ для момента времени $t = 0,01$ с при наиболее неблагоприятных условиях. Его определяют по формуле

$$i_y = I_{пm} + I_{пm} e^{-t/T_a} = K_y I_{пm} = \sqrt{2} K_y I_{п0}, \quad (2.17)$$

где $K_y = 1 + e^{-t/T_a}$ – ударный коэффициент, зависящий от постоянной времени затухания T_a (рис. 2.4).

Ударный коэффициент изменяется в пределах $1 < K_y < 2$, если отношение $X/R \rightarrow 0$, то $K_y \rightarrow 1$; если отношение $X/R \rightarrow \infty$, то $K_y \rightarrow 2$. Величину K_y можно определить по величине T_a , пользуясь соответствующими кривыми. Значения активных сопротивлений можно определить по величине отношения X/R .

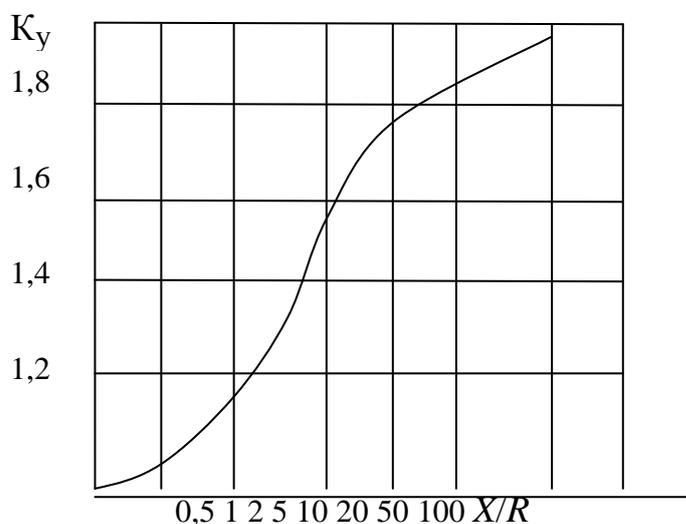


Рис. 2.4. Кривая зависимости $K_y = f(X/R)$

Характерные соотношения X/R для элементов электрической системы приведены ниже:

Трансформаторы мощностью, МВА:

5–30 7–17

60–500 20–50

Реакторы 6–10 кВ на ток, А:

до 1000 15–70

1500 и выше 40–80

Воздушные линии 2–8

Кабели 6 – 10 кВ сечением 3x95 – 3x85 мм² 0,2–0,8

Действующее значение ударного тока находят по формуле

$$I_y = \sqrt{1 + 2(K_y - 1)^2} I_{nm}. \quad (2.18)$$

Ударный ток, создаваемый синхронными и асинхронными двигателями $i_{y \text{ дв}}$, определяется выражением

$$i_{y \text{ дв}} = \sqrt{2} K_y I_{\text{подв}}, \quad (2.19)$$

где $K_{y \text{ дв}} = 1 + e^{-t/T_{a \text{ дв}}}$ – ударный коэффициент, зависящий от постоянной времени затухания $T_{a \text{ дв}}$.

2.6. Расчет установившегося тока трехфазного короткого замыкания при отсутствии автоматического регулирования возбуждения генераторов

Установившийся ток трехфазного КЗ I при отсутствии автоматического регулирования возбуждения (АРВ) генераторов в радиальной ветви, содержащей ЭДС E_3 , о.е., и эквивалентное сопротивление X_3 , о.е., определяется по формуле

$$I = \frac{E_3}{X_3} I_6. \quad (20)$$

Генераторы без АРВ в установившемся режиме вводятся в схему замещения синхронной ЭДС E_q и синхронным сопротивлением X_d . Величина ЭДС E_q определяется по формуле

$$E_q = \sqrt{(U_0 \cos \varphi_0)^2 + (U_0 \sin \varphi_0 + I_0 X_d)^2}, \quad (2.21)$$

где U_0 , I_0 , φ_0 – параметры доаварийного режима на зажимах генератора.

Нагрузки учитывают эквивалентным сопротивлением в системе относительных единиц $X_H \approx 1,2$. Если доаварийным режимом является холостой ход, то нагрузка в схеме замещения отсутствует, а ЭДС генераторов принимают $E_q = 1$. Если до аварийного режима генератор работал при токе возбуждения I_{f0} , то ЭДС принимают в системе относительных единиц $E_q = I_{f0} I_{f0}$.

2.7. Расчет установившегося тока трехфазного короткого замыкания при наличии автоматического регулирования возбуждения (АРВ) генераторов

Расчет установившегося тока трехфазного короткого замыкания при наличии у генераторов АРВ определяется режимом работы устройства форсировки возбуждения. Предельная величина ЭДС, которую может обеспечить при этом АРВ, определяется как

$$E_{qпр} = K_{\phi} U_{ном}, \quad (2.22)$$

где $K_{\phi} = 3 \div 5$ – коэффициент форсировки.

В начальный момент КЗ в силу инерции магнитных потоков, сцепленных с обмотками, никакого влияния АРВ быть не может. В дальнейшем затухание свободных токов статора и обмотки возбуждения, возникших при КЗ, компенсируются от действия АРВ. Сверхпереходный ток в схемах, содержащих генераторы с АРВ, определяется так же, как и при отсутствии АРВ.

В режиме установившегося КЗ генератор может работать в одном из двух режимов: предельного возбуждения и нормального напряжения. Если величина внешнего сопротивления $X_{вн}$ (сопротивление между зажимами генератора и точкой КЗ) меньше критического $X_{кр}$, то генератор работает в режиме предельного возбуждения и вводится в схему замещения ЭДС $E_{qпр}$ и сопротивлением X_d , а в режиме нормального напряжения вводится ЭДС, равная напряжению генератора U_H и сопротивлением $X_d = 0$.

Ток КЗ I_k при работе генератора в режиме предельного возбуждения

$$I_{\text{к}} = \frac{E_{\text{гпр}}}{X_{\text{э}}} = \frac{K_{\text{ф}} U_{\text{н}}}{X_{\text{д}} + X_{\text{вн}}} > I_{\text{кр}}, \quad (2.23)$$

в режиме нормального напряжения $I_{\text{к}} = \frac{U_{\text{н}}}{X_{\text{вн}}} < I_{\text{кр}}$.

Величина критического сопротивления определяется по формуле:

$$X_{\text{кр}} = \frac{X_{\text{д}}}{K_{\text{ф}} - 1}. \quad (2.24)$$

Соответственно критический ток : $I_{\text{кр}} = \frac{U_{\text{н}}}{X_{\text{кр}}}$.

При расчете переходного процесса КЗ в системе с большим количеством генераторов понятие внешней реактивности теряет смысл. Здесь можно воспользоваться методом преобразования схемы, в результате которого находят взаимные сопротивления между каждым из генераторов и точкой КЗ. Удобнее пользоваться понятием критического тока $I_{\text{кр}}$. Расчет ведется методом последовательных приближений. Произвольно задаваясь для каждого из генераторов с АРВ той или иной схемой замещения в зависимости от режима его работы, находят ток в месте КЗ. Развертывая схему в обратном направлении, определяют токи генераторов, делают проверку правильности выбранных режимов. В режиме предельного возбуждения должно выполняться условие $I_{\text{к}} > I_{\text{кр}}$, в режиме нормального напряжения $I_{\text{к}} < I_{\text{кр}}$. Если это условие не выполняется, то весь расчет проводят заново до тех пор, пока режимы всех генераторов с АРВ не станут соответствовать их схемам замещения.

2.8. Расчет периодической составляющей тока короткого замыкания для произвольного момента времени

Периодическая составляющая тока КЗ от источника питания бесконечной мощности $I_{\text{птс}}$ в произвольный момент времени t считается не зависящей от времени, амплитуда которой равна $I_{\text{птм}} = \sqrt{2} I_{\text{птс}} = \sqrt{2} I_{\text{пос}}$.

Периодическая составляющая тока в месте КЗ в произвольный момент времени t изменяется по следующему закону

$$i_{\text{пт}} = I_{\text{птм}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_{\text{к}}). \quad (2.25)$$

Амплитуда принужденного тока определяется по выражению:

$$I_{\text{пм}} = \frac{U_m}{Z_{\text{к}}}, \quad (2.26)$$

где U_m – амплитуда источника тока, $Z_{\text{к}}$ – модуль полного сопротивления, присоединенного к источнику тока участка короткозамкнутой цепи.

При рассмотрении осциллограммы тока внезапного переходного КЗ синхронного генератора без АРВ можно установить, что периодические составляющие токов КЗ всех фаз имеют одинаковые огибающие, которые затухают до значения установившегося тока I . Синусоиды их смещены относительно друг друга на 120° . Вычитая из результирующей кривой тока КЗ установившийся ток КЗ, получаем периодически изменяющийся экспоненциальный ток. В машинах без демпферных обмоток он изменяется с постоянной времени T_d' и называется переходной слагающей тока КЗ I' . В машинах с демпферными обмотками он состоит из двух слагающих: переходной I' и сверхпереходной слагающей I'' тока КЗ, которая изменяется с постоянной времени T_d'' .

Если исходная расчетная схема является радиальной и содержит одну синхронную машину (или группу однотипных машин) без демпферных обмоток, то действующее значение периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени t $I_{\text{пт}}$ приближенно, без учета поперечной составляющей тока КЗ, может быть определено с использованием формулы

$$I_{\text{пт}} = I + I' e^{-t/T_d'} \quad (2.27)$$

или

$$I_{\text{пт}} = \frac{E_q}{X_d + X_{\text{вн}}} + \left(\frac{E_q'}{X_d + X_{\text{вн}}} - \frac{E_q}{X_d + X_{\text{вн}}} \right) e^{-t/T_d'}, \quad (2.28)$$

где E_q , E_q' – синхронная и переходная ЭДС генератора.

Действующее значение периодической составляющей тока КЗ в момент времени t с демпферными обмотками определяется выражением

$$I_{\text{пт}} = I + I_0' e^{-t/T_d'} + I_0'' e^{-t/T_d''} \quad (2.29)$$

или

$$I_{пт} = \frac{E_q}{X_d + X_{вн}} + \left(\frac{E'_q}{X'_d + X_{вн}} - \frac{E_q}{X_d + X_{вн}} \right) e^{-t/T'_d} + \left(\frac{E''_q}{X''_d + X_{вн}} - \frac{E'_q}{X'_d + X_{вн}} \right) e^{-t/T''_d}, \quad (2.30)$$

где $T'_d = T_{f0}(X'_d + X_{вн})/(X_d + X_{вн})$ – постоянная времени обмотки возбуждения при закороченной обмотке статора; T_{f0} – постоянная времени обмотки возбуждения; E''_q – сверхпереходная ЭДС генератора.

Расчет параметров режима переходного процесса при наличии АРВ у генераторов можно упростить, если воспользоваться методом наложения. При этом рассматриваются два независимых режима: при неизменном напряжении возбуждения ($U_f = \text{const}$), т.е. приращение за счет АРВ отсутствует ($\Delta U_f = 0$), и дополнительного напряжения за счет действия АРВ ΔU_f . Из первого режима находят приращение тока при неизменном возбуждении $\Delta I_{птб}$ АРВ, из второго – от действия АРВ $\Delta I_{пт}$ АРВ.

Естественно, что этот ток, благодаря действию регулятора, не может превысить ток генератора при номинальном напряжении $U_{ном}$. Как только на выводах генератора установится режим нормального напряжения, дальнейшее изменение тока прекращается.

Величину $\Delta I_{птАРВ}$ можно определить, если известна система возбуждения и закон регулирования возбуждения. Пусть нам задана функция $F(t)$, характеризующая закон изменения единичного тока статора при действии АРВ. Её граничные значения известны: для $t = 0$ $F(t) = 0$ и для $t = \infty$ функция $F(t) = 1$.

Действующее значение периодической слагающей тока КЗ с учетом АРВ определяется выражением

$$I_{пт АРВ} = I_{птб АРВ} + \Delta I_{пр} F(t), \quad (2.31)$$

где $I_{птб АРВ}$ – периодическая слагающая тока при отсутствии АРВ; $\Delta I_{пр}$ – предельное приращение установившегося тока КЗ, равное разности установившихся токов при предельном и предшествующем возбуждениях.

При машинном возбуждении для генератора без демпферных обмоток функция $F(t)$ имеет вид

$$F(t) = 1 - (\tau'_d e^{-t/\tau'_d} - T_e e^{-t/T_e}) / (\tau'_d - T_e), \quad (2.32)$$

где T_e – постоянная времени экспоненциальной функции, приближенно заменяющей сложную функцию нарастания возбуждения.

Для машин с демпферными обмотками функция $F(t)$ имеет более сложный вид. В случае тиристорной системы возбуждения

$$F(t) = 1 - e^{-t/\tau'_d}. \quad (2.33)$$

Для машин без демпферных обмоток при $T_e \cong 0$ периодическая составляющая тока КЗ генератора с АРВ выражается зависимостью

$$I_{\text{пт}} = \frac{E_q}{X_d + X_{\text{вн}}} + \left[\frac{E'_q}{X_d + X_{\text{вн}}} - \frac{E_q}{X_d + X_{\text{вн}}} \right] e^{-t/\tau'_d}. \quad (2.34)$$

При известных значениях $I_{\text{пт}}$ можно определить ЭДС E_{qt} и E'_{qt}

$$E_{qt} = I_{\text{пт}}(X_d + X_{\text{вн}}); \quad E'_{qt} = I_{\text{пт}}(X'_d + X_{\text{вн}}). \quad (2.35)$$

Напряжение на выводах генератора рассчитывается как $U_{\text{Гт}} = I_{\text{пт}}X_{\text{вн}}$. При отключении генератора от поврежденных шин ток статорной обмотки прерывается. Размагничивающая реакция статора прекращается. Однако она компенсируется благодаря возникновению размагничивающего свободного тока в обмотке возбуждения так, что результирующее потокосцепление в генераторе не изменяется. В начальный момент отключения переходная ЭДС E'_q , обусловленная результирующим потокосцеплением также не изменяется. Отключенный генератор находится в режиме холостого хода. Очевидно, что при этом $E'_{qt} = E_q = U$ в любой момент времени.

Если в момент коммутации t_1 величина $E'_{qt1} = E_{qt1} = U_{t1} < U_{\text{ном}}$, то даже при отключении генератора с АРВ от поврежденной цепи форсировка

будет продолжаться до тех пор, пока напряжение на выводах генератора не станет равным $U_{\text{ном}}$. С учетом действия форсировки режим будет изменяться по закону

$$E'_{qt1} = E_{qt1} = U_{t1} = E_{qпр} + (E'_{qt1} - E_{qпр}) e^{-(t-t_1)/T_{f0}} \leq U_{\text{ном}}, \quad (2.36)$$

где t_1 – момент времени, когда произошло отключение генератора (момент коммутации).

Форсировка возбуждения не всегда действует в момент отключения. При отключенных удаленных КЗ может возникнуть расфорсировка возбуждения, если $E'_{qt1} = E_{qt1} = U_{t1} > U_{\text{ном}}$.

При неограниченно длительном процессе (т.е. $I_f = 0$ и $E_q = 0$) расфорсировку генератора, работающего вхолостую, можно описать уравнением

$$E'_{qt1} = E_{qt1} = U_{t1} = E_{qt1} e^{-(t-t_1)/T_{f0}} \leq U_{\text{ном}}. \quad (2.37)$$

При аварийных отключениях генератора от сети, а также при эксплуатационных отключениях вступает в действие (автоматически или полуавтоматически) автомат гашения поля. Его контактная система сначала подключает к обмотке возбуждения (возбудителю) резистор, а затем быстро отключает возбудитель (тиристорный возбудитель запирается). Электромагнитная энергия, запасенная обмоткой возбуждения, поглощается резистором, генератор развозбуждается.

Процесс развозбуждения отключенного от сети генератора протекает без скачкообразного изменения режимных параметров генератора с постоянной времени

$$T_{\Gamma} = T_{f0} / (1 + R_{\Gamma} / R_f), \quad (2.38)$$

где R_{Γ} , R_f – активные сопротивления соответственно резистора и обмотки возбуждения.

При полном развозбуждении $I_f = 0$ и $E_q = 0$ уравнение имеет вид

$$E'_{qt1} = E_{qt} = U_t = E_{qt2} e^{-(t-t_2)/T_{\Gamma}}, \quad (2.39)$$

где E_{qt2} – значение синхронной ЭДС в момент включения автомата t_2 .

Если автомат гашения поля (АГП) вступает в действие не при отключенном от сети генераторе, то уравнение, описывающее переходной процесс, имеет вид

$$E_{qt} = E_{qt2} e^{-(t-t_2)/T'_T}, \quad U_{пт} = U_{t2} e^{-(t-t_2)/T'_T}, \quad (2.40)$$

$$I_{пт} = I_{пт2} e^{-(t-t_2)/T'_T}, \quad (2.41)$$

где $T'_T = T'_d / (1 + R_r/R_f)$ – постоянная времени АГП.

2.9. Определение действующего значения периодической составляющей тока КЗ от синхронных генераторов в произвольный момент времени

При приближенных расчетах токов КЗ для определения действующего значения периодической составляющей тока от синхронных генераторов в произвольный момент времени при радиальной расчетной схеме следует применять метод типовых кривых.

Суть метода состоит в применении специальных кривых, использующих зависимости изменения во времени отношения тока КЗ генератора в произвольный момент времени к начальному $\gamma_t = I_{пт}/I_{п0} = f(t)$ при различных удаленностях точки КЗ. Упомянутые кривые справедливы для турбогенераторов мощностью от 12,5 до 800 мВт, гидрогенераторов мощностью до 500 мВт и для всех крупных синхронных компенсаторов.

При этом электрическая удаленность точки КЗ от синхронной машины характеризуется отношением действующего значения периодической составляющей тока генератора в начальный момент КЗ к его номинальному току, т.е.

$$I_{* \text{ п0(ном)}} = \frac{I_{Г0}}{I_{Гном}} = I_{* \text{ п0(б)}} \frac{S_{б}}{S_{ном}}, \quad (2.42)$$

где $I_{* \text{ п0(б)}}$ – начальное значение периодической составляющей тока КЗ от машины в относительных единицах при выбранных базисных условиях.

Типовые кривые представляют собой семейство основных кривых (рис. 2.5)

$$\frac{I_{\Gamma t}}{I_{\Gamma 0}} = f(t) \text{ при } \frac{I_{\Gamma 0}}{I_{\Gamma \text{НОМ}}} = I_{\Gamma \text{НОМ}} = \text{var} \quad (2.43)$$

и семейство дополнительных кривых (рис. 2.6)

$$\frac{I_{\text{кт}}}{I_{\text{к0}}} = f\left(\frac{I_{\Gamma t}}{I_{\Gamma 0}}\right) \text{ при } \frac{I_{\Gamma 0}}{I_{\text{к0}}} = \text{var}, \quad (2.44)$$

где $I_{\Gamma t}$ – периодическая составляющая тока генератора в произвольный момент времени t ($t = 0 \div 0,5$ с); $I_{\Gamma 0}$ – периодическая составляющая тока генератора в начальный момент КЗ; $I_{\Gamma \text{НОМ}}$ – номинальный ток генератора; $I_{\text{кт}}$ – ток в месте КЗ в произвольный момент времени t ; $I_{\text{к0}}$ – ток в месте КЗ в начальный момент времени.

Для различных групп турбогенераторов с учетом современной тенденции оснащения генераторов разных типов определенными системами возбуждения типовые кривые приведены в [1].

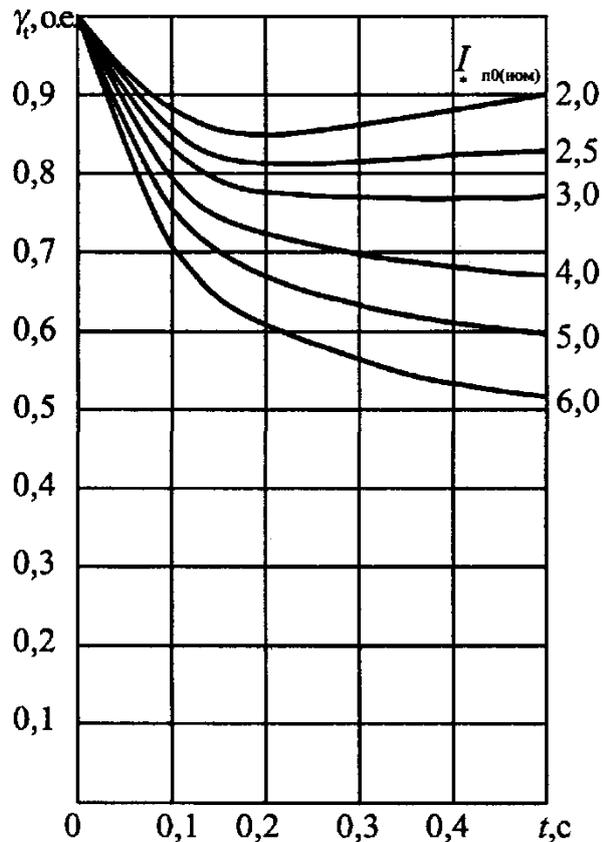


Рис. 2.5. Основные типовые кривые изменения периодической составляющей тока КЗ от турбогенераторов

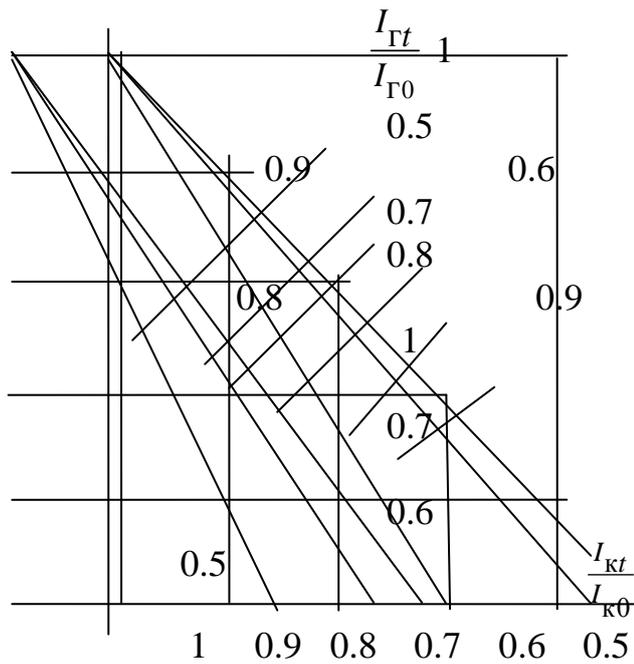


Рис. 2.6. Дополнительные типовые кривые

Порядок расчета периодической слагающей тока КЗ в схеме с одним генератором:

1) составляют схему замещения, в которую генератор вводят его ЭДС E_q'' и сопротивлением X_d'' ; нагрузочные ветви сети не учитывают;

2) свертывают схему относительно точки КЗ и находят начальное значение тока в месте КЗ $I_{к0}$, равное току генератора $I_{Г0}$;

3) находят отношение токов $\frac{I_{Г0}}{I_{ГНОМ}} = I_{Г0(Н)*}$;

4) по основным типовым кривым находят для интересующего момента времени t отношение токов $\frac{I_{Гt}}{I_{Г0}} = \gamma_t$;

5) находят искомый ток в месте КЗ $I_{Гt} = I_{кт} = \gamma_t I_{Г0}$.

В зависимости от способа выполнения расчета начальный относительный ток определяется по различным формулам:

$I_{Г0(Н)*} = I_{Г0}/I_{ГНОМ}$ – при расчете в именованных единицах в случае отсутствия трансформаторной связи между генератором и точкой КЗ;

$I_{Г0(Н)*} = I_{Г0}/I_{ГНОМ}^o$ – при расчете в именованных единицах в случае наличия трансформаторной связи между генератором и точкой КЗ, где $I_{ГНО} = S_{\sigma}/\sqrt{3} U_{ср.НОМ}$ – номинальный ток генератора, приведенный к

среднему номинальному напряжению той ступени, где возникло КЗ; $I_{Г0(н)*} = I_{Г0(б)*} S_{б}/S_{ном}$ – при расчете в относительных единицах при произвольно выбранных базисных условиях.

При удаленных КЗ величина тока $I_{Г0(н)*}$ составляет 1–2. По мере приближения точки КЗ к шинам генератора этот ток увеличивается до 6–8. Если значение тока оказывается дробным числом, то его округляют до ближайшего целого числа.

Следует иметь в виду, что найденный ток КЗ получается выраженным в тех же единицах, что и ток $I_{Г0}$. Чтобы получить искомый ток в именованных единицах, необходимо значение тока $I_{Г0}$ также выразить в именованных единицах.

Порядок расчета периодической слагающей тока КЗ в схеме с несколькими генераторами, находящимися в одинаковых условиях относительно точки КЗ:

1) составляют схему замещения, в которую генераторы вводят их ЭДС E_q'' и сопротивлениями X_d'' ; нагрузочные ветви сети не учитывают;

2) свертывают схему относительно точки КЗ и находят начальные значения токов генераторов $I_{Г01}, I_{Г02}, \dots, I_{Г0i}, \dots, I_{Г0n}$ (n – количество генераторов);

3) находят отношение токов

$$I_{Г01}/I_{Гном1} = I_{Г01(н)*}; \dots; I_{Г0i}/I_{Гномi} = I_{Г0i(н)*}; \dots; I_{Г0n}/I_{Гномn} = I_{Г0n(н)*};$$

4) по основным типовым кривым находят для интересующего момента времени t отношение токов

$$I_{Гt1}/I_{Г01} = \gamma_{t1}; I_{Гt2}/I_{Г02} = \gamma_{t2}; \dots; I_{Гti}/I_{Г0i} = \gamma_{ti}; \dots; I_{Гtn}/I_{Г0n} = \gamma_{tn};$$

5) находят искомые токи генераторов

$$I_{Гt1} = \gamma_{t1}I_{Г01}; I_{Гt2} = \gamma_{t2}I_{Г02}; \dots; I_{Гti} = \gamma_{ti}I_{Г0i}; \dots; I_{Гtn} = \gamma_{tn}I_{Г0n};$$

6) находят ток в месте КЗ

$$I_{кт} = I_{Гt1} + I_{Гt2} + \dots + I_{Гti} + \dots + I_{Гtn}.$$

Если в схеме имеется несколько генераторов, находящихся в неодинаковых условиях относительно точки КЗ, а также система неизменного напряжения, то целесообразно все источники разбить на две группы. В одну из них включить источники, электрически близко расположенные к точке КЗ (связанные с точкой КЗ непосредственно или через одну ступень трансформации или у которых ток $I_{Г0(Н)*} > 1$, а в другую – все прочие источники, приняв их в качестве системы неизменного напряжения. Для нахождения тока КЗ используется семейство как основных кривых, так и дополнительных.

Порядок расчета периодической слагающей тока КЗ в схеме с несколькими генераторами, находящимися в разных условиях относительно точки КЗ:

1) составляют схему замещения (рис. 2.7), в которую генераторы вводят их ЭДС E_q'' и сопротивлениями X_d'' ; нагрузочные ветви сети не учитывают;

2) свертывают схему относительно точки КЗ с выделением двух групп источников; находят эквивалентное сопротивление ветвей этих групп X_G, X_C ; результирующие ЭДС E_Σ и сопротивление X_Σ схемы;

3) определяют начальный ток в месте КЗ $I_{К0} = E_\Sigma / X_\Sigma$ и в ветви генератора

$$I_{Г0} = \frac{E_\Sigma - I_{К0} X_K}{X_G};$$

4) находят отношение токов $I_{Г0} / I_{К0}$ и начальный относительный ток генератора $I_{Г0(Н)*}$;

5) если отношение $I_{Г0} / I_{К0} < 0,5$ то изменением во времени тока в месте КЗ можно пренебречь и принять $I_{Кt} = I_{К0}$; а если отношение $I_{Г0} / I_{К0} > 0,5$, то по основным типовым кривым находят для интересующего момента времени t отношение $I_{Гt} / I_{Г0} = \gamma_t$;

6) по дополнительным кривым при известных величинах $I_{Г0} / I_{К0}$ и γ_t находят отношение $I_{Кt} / I_{К0} = \beta_t$ и определяют искомым ток $I_{Кt} = \beta_t I_{К0}$.

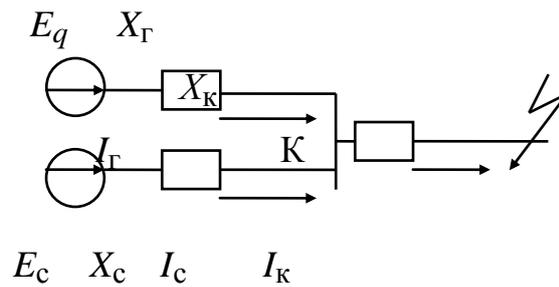


Рис. 2.7. Схема трехлучевой звезды

Типовые кривые учитывают изменение действующего значения периодической составляющей тока КЗ, если отношение такого значения тока генератора в начальный момент КЗ к его номинальному току равно или больше двух. При меньших значениях этого отношения следует считать, что действующее значение периодической составляющей тока КЗ не изменяется во времени, т.е. $I_{пт} = I_{п0} = \text{const}$.

Для приближенного определения действующего значения периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени от синхронных генераторов напряжением 6–10 кВ в автономных системах электроснабжения следует использовать типовые кривые, представленные в [1].

2.10. Определение действующего значения периодической составляющей тока КЗ от синхронных и асинхронных электродвигателей в произвольный момент времени

В приближенных расчетах для определения действующего значения периодической составляющей тока КЗ от синхронных или асинхронных электродвигателей в произвольный момент времени при радиальной схеме следует применять метод типовых кривых, который основан на использовании кривых изменения во времени отношений

$$\gamma_{тсд} = I_{птсд}/I_{п0сд} \text{ и } \gamma_{тад} = I_{птад}/I_{п0ад}$$

при разных удаленностях точки КЗ.

При этом электрическую удаленность точки КЗ следует определять, используя формулу

$$I_{*п0дв(ном)} = \frac{I_{п0дв}}{I_{номдв}} = I_{*п0дв(б)} \frac{S_б}{S_{номдв}}.$$

Типовые кривые для синхронного электродвигателя приведены на рис. 2.8, а для асинхронного электродвигателя – на рис. 2.9 [1].

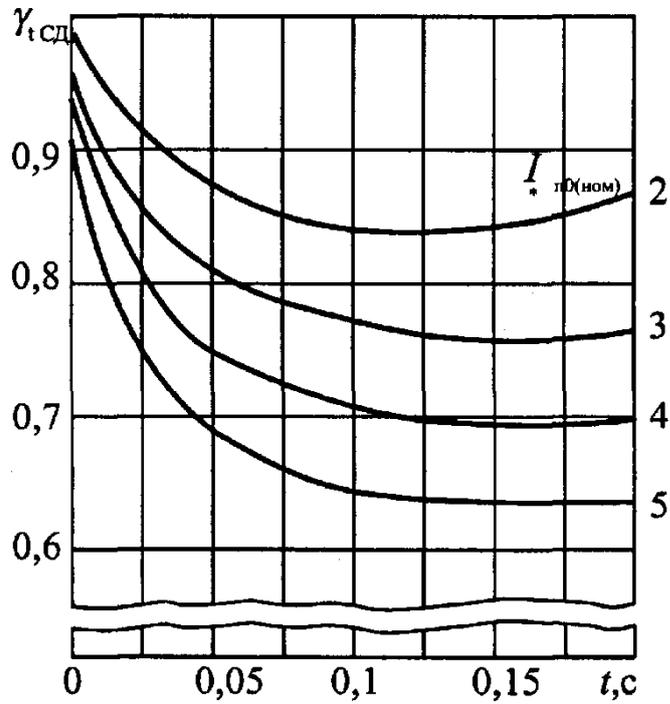


Рис. 2.8. Типовые кривые для синхронного электродвигателя

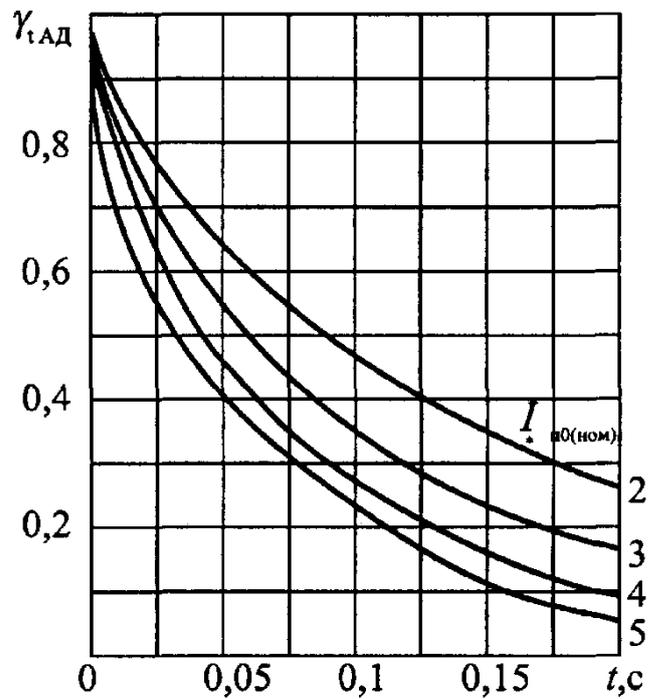


Рис. 2.9. Типовые кривые для асинхронного электродвигателя

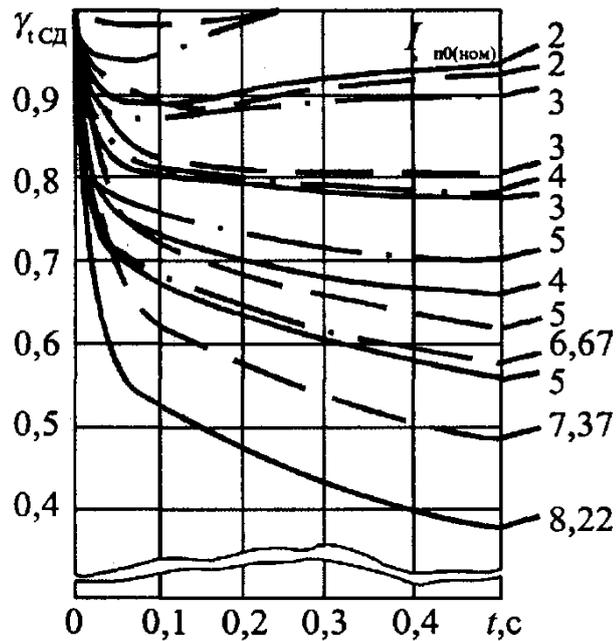


Рис. 2.10. Типовые кривые изменения тока КЗ от синхронных электродвигателей серии СДН (сплошные линии), серии СД с частотой вращения 1500 об/мин (штрихпунктирные линии) и серии СТД (пунктирные линии со звездочками)

Если в каком-либо узле мощность подключенных неявнополусных синхронных электродвигателей (серии СТД, СТМ и др.) выходит за пределы 30 % суммарной мощности всех электродвигателей, то использование типовых кривых, показанных на рис. 2.10, приводит к погрешности, превышающей допустимую. Поэтому в указанном случае при расчете периодической составляющей тока КЗ неявнополусные синхронные электродвигатели следует учитывать индивидуально, используя кривые зависимости $\gamma_{т сд} = f(t)$, приведенные в [1].

При необходимости индивидуального учета асинхронных электродвигателей разных серий следует использовать типовые кривые, приведенные в [1].

Порядок расчета действующего значения периодической составляющей тока КЗ от синхронного $I_{пт сд}$ и асинхронного $I_{пт ад}$ электродвигателей в произвольный момент времени с использованием этих кривых аналогичен изложенному для генератора.

Значение периодической составляющей тока электродвигателей в кА в момент времени t равно

$$\left. \begin{aligned} I_{пт\ сд} &= \gamma_{t\ сд} I_{п0(ном)} * I_{ном\ сд} = \gamma_{t\ сд} I_{п0(б)} * I_{б}; \\ \text{и} \\ I_{пт\ ад} &= \gamma_{t\ ад} I_{п0(ном)} * I_{ном\ ад} = \gamma_{t\ ад} I_{п0(б)} * I_{б}, \end{aligned} \right\}$$

где $I_{ном\ сд}$ и $I_{ном\ ад}$ – номинальные токи соответственно синхронного и асинхронного электродвигателей; $I_{б}$ – базисный ток той ступени напряжения сети, на которой находятся точка КЗ и электродвигатель.

Порядок расчета периодической слагающей тока КЗ в схеме с несколькими группами синхронных и асинхронных электродвигателей

Порядок расчета периодической слагающей тока КЗ в схеме с несколькими группами синхронных и асинхронных электродвигателей, удаленных от расчетной точки КЗ источника энергии, связанных с ним общим сопротивлением X_K (ветвь КЗ), рекомендуется проводить в следующей последовательности:

1) группу подлежащих учету синхронных явнополюсных или асинхронных электродвигателей заменить одним эквивалентным электродвигателем, номинальная мощность которого равна сумме номинальных мощностей заменяемых электродвигателей, т.е.

$$S_{ном\ эк} = \sum_{i=1}^{i=n} S_{ном\ i},$$

где n – число электродвигателей в группе; $S_{ном\ i}$ – номинальная мощность i -го электродвигателя, МВ·А;

2) по исходной расчетной схеме составить соответствующую схему замещения для определения начального значения периодической составляющей тока КЗ, преобразовать ее в эквивалентную Т-образную схему и определить параметры ветвей последней – ветви двигательной нагрузки (без учета сопротивления двигателей) X_d , ветви системы X_c и ветви КЗ общей для двигателей и системы – X_K (см. схемы в верхней части рис. 2.11 и 2.12);

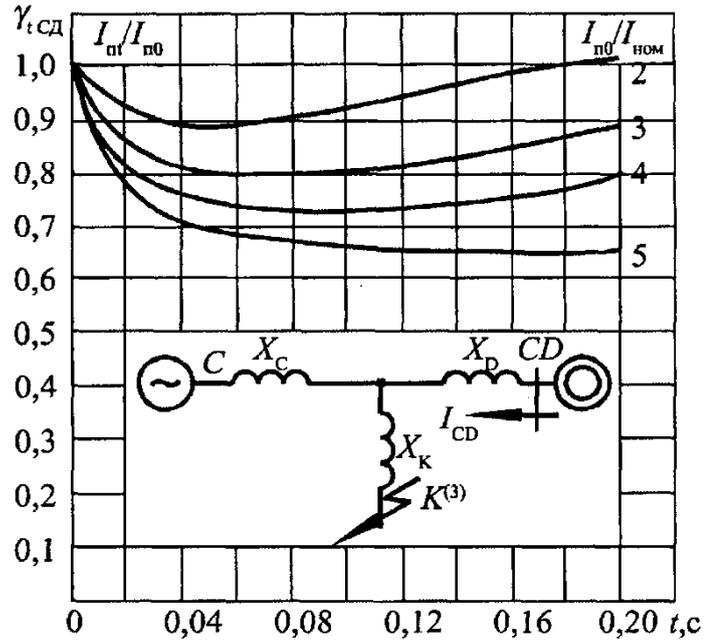


Рис. 2.11. Типовые кривые для определения тока КЗ от эквивалентного синхронного электродвигателя напряжением 6 кВ при трехфазном КЗ в сети

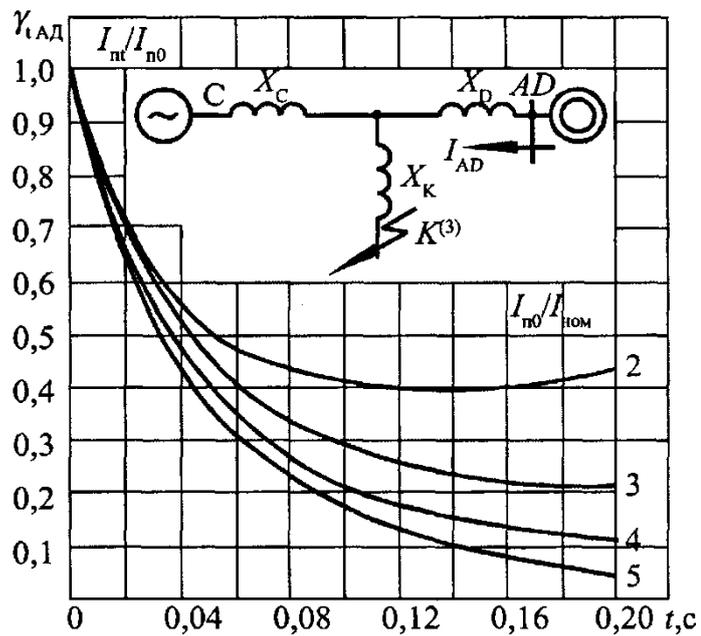


Рис. 2.12. Типовые кривые для определения тока КЗ от эквивалентного асинхронного электродвигателя напряжением 6 кВ при трехфазном КЗ в сети

3) вычислить периодическую составляющую тока от эквивалентного электродвигателя в начальный момент КЗ при принятых базисных условиях:

$$I_{п0д(б)} = \frac{E_{0д(б)}'' - E_{*с(б)} X_{*к(б)} / (X_{*с(б)} + X_{*к(б)})}{X_{*с(б)} X_{*к(б)} / (X_{*с(б)} + X_{*к(б)}) + X_{*д(б)} + X_{*д(б)}''},$$

где $E_{0д(б)}''$ – начальное значение сверхпереходной ЭДС эквивалентного электродвигателя; $E_{*с(б)}$ – ЭДС удаленных источников энергии (системы); $X_{*д(б)}''$ – сверхпереходное индуктивное сопротивление эквивалентного электродвигателя;

4) определить значение величины, характеризующей электрическую удаленность расчетной точки КЗ от эквивалентного электродвигателя

$$I_{n0(ном)} = \frac{I_{п0}}{I_{ном}} = I_{*п0д(б)} \frac{S_{б}}{S_{номэк}};$$

5) по найденному значению $I_{n0(ном)}$ на рис. 2.11 или рис. 2.12 (в зависимости от типа электродвигателей) выбрать соответствующую типовую кривую (возможна линейная экстраполяция между смежными кривыми) и для заданного момента времени t определить коэффициент γ_t ;

6) определить действующее значение периодической составляющей тока эквивалентного электродвигателя в момент времени t

$$I_{*птд(б)} = \gamma_t I_{*п0д(б)};$$

7) вычислить искомое действующее значение периодической составляющей тока в месте КЗ в момент времени t

$$I_{kt} = \frac{E_{*с(б)} - I_{*птд(б)} X_{*с(б)}}{X_{*с(б)} + X_{*к(б)}} I_{б},$$

где I_6 – базисный ток той ступени напряжения сети, на которой находится точка КЗ.

Значение периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени от узла нагрузки следует рассчитывать с учетом влияния электродвигателей, причем коэффициенты $\gamma_{тсд}$ и $\gamma_{тад}$ рекомендуется определять по расчетным кривым, приведенным в [1], в зависимости от значения напряжения в точке присоединения узла нагрузки Н.

Контрольные вопросы

1. Какими параметрами характеризуется отключающая способность выключателей переменного тока высокого напряжения?
2. Каков порядок расчета тока в начальный момент КЗ?
3. Какие элементы системы в электроустановках до 1 кВ проверяются по условиям короткого замыкания согласно ПУЭ?
4. Как влияют синхронные и асинхронные электродвигатели в начальный момент переходного процесса?
5. Каков порядок расчета установившегося тока КЗ?
6. Как определяется апериодическая составляющая тока КЗ?
7. Как определяется периодическая составляющая тока КЗ?
8. В каких случаях при определении периодической составляющей тока короткого замыкания учитывается активное сопротивление элементов сети согласно ПУЭ?
9. Как учитываются синхронные и асинхронные электродвигатели при расчете начального тока короткого замыкания?
10. Каков порядок расчета тока КЗ в произвольный момент времени?
11. Как рассчитать ударный ток и ударный коэффициент?
12. Как учесть комплексную нагрузку при расчете начального тока короткого замыкания?
13. Как вводятся в схему замещения синхронные машины и асинхронные двигатели?
14. Как определяется дополнительное сопротивление?
15. Каков порядок расчета несимметричных токов короткого замыкания?
16. Каковы особенности расчета начального тока КЗ в электроустановках, получающих питание от системы и от автономных источников питания?
17. Как рассчитать периодический ток в произвольный момент времени t от генератора?

18. Как учитываются асинхронные и синхронные электродвигатели при расчете тока короткого замыкания в произвольный момент времени t ?
19. Как определить остаточное напряжение на шинах ЭД при пуске?
20. Как определяется ударный коэффициент?
21. Каков порядок расчета установившегося тока трехфазного короткого замыкания при отсутствии автоматического регулирования возбуждения (АРВ) генераторов?
22. Какими параметрами вводятся в схему замещения генераторы без АРВ в установившемся режиме?
23. Каков порядок расчета установившегося тока трехфазного короткого замыкания при наличии АРВ генераторов?
24. По какому закону изменяется периодическая составляющая тока КЗ от источника питания бесконечной мощности в произвольный момент времени t ?
25. По какому закону изменяется периодическая составляющая тока КЗ от генератора с АРВ?
26. Как изображаются основные и дополнительные типовые кривые для генераторов?
27. Каков порядок расчета периодического тока КЗ в произвольный момент времени t в схеме с одним генератором?
28. Каков порядок расчета периодического тока КЗ в произвольный момент времени t в схеме с генераторами, находящимися в одинаковых условиях относительно точки КЗ?
29. Каков порядок расчета периодического тока КЗ в произвольный момент времени t в схеме с несколькими группами асинхронных и синхронных электродвигателей?

Задачи для самопроверки

Задача 2.1

При трехфазном КЗ в точке К исходной схемы (рис.32.1) определить величину начального тока при трехфазном КЗ в конце линии ВЛ.

Исходные данные

Трансформатор Т: $S_{\text{НОМ}} = 40 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $U_{\text{ВН}} = 220 \text{ кВ}$, $U_{\text{НН}} = 35 \text{ кВ}$, $U_{\text{К}} = 10 \%$.

Линия ВЛ: $l = 80 \text{ км}$, $X_0 = 0,33 \text{ Ом/км}$,

Система С: $U_{\text{С}} = 220 \text{ кВ} = \text{const}$.

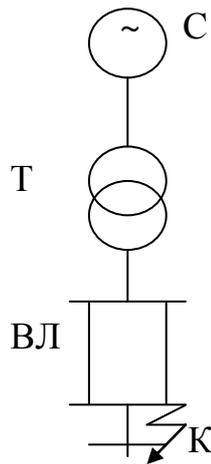


Рис. 32.1. Исходная схема к задаче 1

Задача 2.2

Блок, состоящий из двух генераторов Г1 и Г2, трансформатора с расщепленной обмоткой Т, связан линией Л с узлом системы С (рис. 32.2). Напряжение в узле системы постоянно $U_C = 220$ кВ. В точке К произошло трехфазное короткое замыкание.

Требуется определить величину периодического тока КЗ, используя метод типовых кривых. Принять собственное время выключателя $t = 0,2$ с.

Исходные данные:

Генераторы Г1 и Г2: $S_{\text{НОМ}} = 75$ МВ·А, $U_{\text{НОМ}} = 10,5$ кВ, $X_d'' = 0,15$, $X_{2Г} = 0,12$, имеется АРВ, $\cos\varphi = 0,85$, $T_{f0} = 6$ с, $I_H = 4,13$ кА.

Трансформатор Т: $S_{\text{НОМ}} = 160$ МВ·А, $U_{\text{ВН}} = 230$ кВ, $U_{\text{НН}} = 11$ кВ, $U_K = 12\%$; $K_p = 3,5$.

Линия Л: $l = 150$ км, $X_0 = 0,4$ Ом/км.

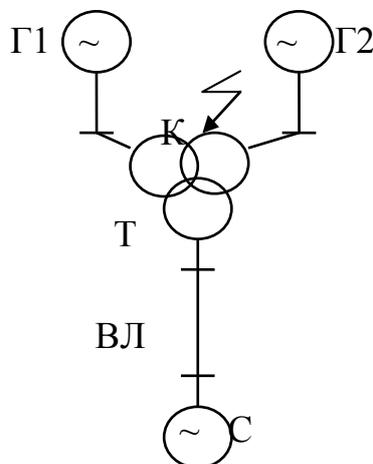


Рис. 32.2. Исходная схема к задаче 2

Задача 2.3

При установившемся режиме трехфазного короткого замыкания в точке К (рис. 32.3) определить токи в генераторе и в трансформаторе на стороне 10,5 кВ. Решение провести для случаев, когда а) генератор Г имеет АРВ; б) генератор имеет постоянное возбуждение $I_f = 1,2$.

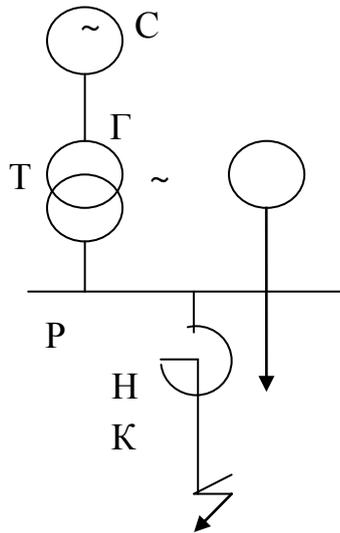


Рис. 32.3. Исходная схема к задаче 2.3.

Исходные данные: Система С: $X_c = 48$ Ом, $U_c = 110$ кВ.

Нагрузка Н: $S_{\text{НОМ}} = 20$ МВ·А.

Реактор Р: $U_{\text{НОМ}} = 10$ кВ; $I_{\text{НОМ}} = 1000$ А; $X_p = 10$ %.

Генератор Г: $S_{\text{НОМ}} = 62,5$ МВ·А; $U_{\text{НОМ}} = 10,5$ кВ; $X_d = 1,84$; $I_{f\text{пр}} = 4$.

Трансформатор Т: $S_{\text{НОМ}} = 80$ МВ·А; $K_T = 115/10,5$ кВ; $U_K = 10,5$ %.

3. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ТОКА ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1 КВ

3.1. Общие положения

В электроустановках напряжением до 1 кВ рекомендуется проверять:

1) на электродинамическую стойкость – токопроводы, ошиновку распределительных устройств и щитов, сборок и распределительных пунктов, а также коммутационные аппараты, установленные в распределительных щитах, силовых сборках и силовых шкафах;

2) на термическую стойкость – автоматические выключатели, самонесущие изолированные провода и кабели с бумажной и пластмассовой изоляциями. Проверка может не производиться для самонесущих изолированных проводов и кабелей, защищенных плавкими предохранителями или автоматическими выключателями, если последние выбраны по условиям обеспечения работы токовой отсечки в конце защищаемой линии;

3) на коммутационную способность – предохранители и автоматические выключатели;

4) на невозгораемость – кабели и изолированные проводники.

Эти проверки позволят достичь более высокого уровня надежности электрооборудования при эксплуатации благодаря снижению вероятности возникновения пожаров при коротких замыканиях. Требования циркуляра от 16.03.1998 № Ц-02-98(э) обязательны для организаций РАО «ЕЭС России». Другие организации по своему усмотрению также могут применять их на своих объектах с целью уменьшения вероятности возникновения пожара при коротких замыканиях.

При расчетах токов КЗ в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ допускается:

1) использовать упрощенные методы расчетов, если их погрешность не превышает 10 %;

2) максимально упрощать и эквивалентировать всю внешнюю сеть по отношению к месту КЗ и индивидуально учитывать только автономные источники электроэнергии и электродвигатели, непосредственно примыкающие к месту КЗ;

3) не учитывать ток намагничивания трансформаторов;

4) не учитывать насыщение магнитных систем электрических машин;

5) принимать коэффициенты трансформации трансформаторов равными отношению средних номинальных напряжений тех ступеней напряжения сетей, которые связывают трансформаторы. При этом следует использовать следующую шкалу средних номинальных напряжений: 37; 24; 20; 15,75; 13,8; 10,5; 6,3; 3,15; 0,69; 0,525; 0,4; 0,23;

6) не учитывать влияние синхронных и асинхронных электродвигателей или комплексной нагрузки, если их суммарный номинальный ток не превышает 1,0 % начального значения периодической составляющей тока в месте КЗ, рассчитанного без учета электродвигателей или комплексной нагрузки.

Расчеты токов КЗ в электроустановках до 1 кВ обычно проводят в именованных единицах. При составлении схем замещения необходимо учитывать:

- индуктивные сопротивления всех элементов короткозамкнутой цепи (включая проводники, трансформаторы тока, реакторы, токовые катушки автоматических выключателей);
- активные сопротивления всех элементов короткозамкнутой цепи;
- активные сопротивления различных контактов и контактных соединений;
- сопротивление электрической дуги в месте КЗ;
- значения параметров синхронных и асинхронных двигателей.

Параметры элементов расчетной схемы следует приводить к ступени напряжения, на которой находится точка КЗ, а активные и индуктивные сопротивления всех элементов схемы замещения выражать в миллиомах (МОм).

При составлении схемы замещения допускается максимально упрощать и эквивалентировать внешнюю сеть по отношению к месту КЗ и индивидуально учитывать только автономные источники электроэнергии и электродвигатели, непосредственно примыкающие к месту КЗ.

3.2. Определение параметров элементов электрической сети

Если питание электроустановок осуществляется непосредственно от энергосистемы, то можно считать, что понижающие трансформаторы подключены к источнику неизменного напряжения через эквивалентное сопротивление системы X_c . Значение сопротивления X_c в миллиомах, приведенное к ступени низшего напряжения (НН) трансформатора

$$X_c = \frac{U_{\text{ср НН}}^2}{\sqrt{3} I_{\text{п0}} U_{\text{ср ВН}}^2}, \quad (3.1)$$

где $U_{\text{ср НН}}$ – среднее номинальное напряжение сети, подключенной к обмотке НН трансформатора, кВ; $U_{\text{ср ВН}}$ – среднее номинальное напряжение сети, подключенной к обмотке высшего напряжения (ВН) трансформатора, кВ; $I_{\text{п0}}$ – действующее значение периодической составляющей тока трехфазного КЗ у выводах обмотки ВН трансформатора, кА.

При отсутствии указанных данных сопротивление X_c допускается рассчитывать по формуле, мОм

$$X_c = \frac{U_{\text{ср нн}}^2}{\sqrt{3} I_{\text{ном отк}} U_{\text{ср вн}}^2}, \quad (3.2)$$

где $I_{\text{ном отк}}$ – номинальный ток отключения выключателей, установленных на стороне ВН трансформатора, кА.

Если трансформатор подключен к сети через реактор, воздушную или кабельную линию длиной более 1 км, необходимо учитывать активные и индуктивные сопротивления этих элементов.

При расчетах токов КЗ рекомендуется учитывать:

– изменение активного сопротивления проводников короткозамкнутой цепи вследствие их нагрева при КЗ;

– влияние комплексной нагрузки на ток КЗ, если номинальный ток нагрузки превышает 10 % начального значения периодической составляющей тока трехфазного КЗ, рассчитанного без учета нагрузки;

– влияние конденсаторных батарей при расчете тока КЗ для выбора предохранителей.

Активные и индуктивные сопротивления понижающего трансформатора (R_T и X_T), приведенные к ступени НН сети рассчитываются по формулам, мОм

$$R_T = \frac{\Delta P_{\text{к ном}} U_{\text{нн ном}}^2}{S_{\text{Т ном}}^2} 10^6; \quad (3.3)$$

$$X_T = \sqrt{U_{\text{к}}^2 - \left(\frac{100 P_{\text{к ном}}}{S_{\text{Т ном}}} \right)^2} \frac{U_{\text{нн ном}}^2}{S_{\text{Т ном}}} 10^4, \quad (3.4)$$

где $S_{\text{Т ном}}$ – номинальная мощность трансформатора, кВА; $\Delta P_{\text{к ном}}$ – номинальные потери КЗ в трансформаторе, кВт; $U_{\text{нн ном}}$ – номинальное напряжение обмотки низшего напряжения трансформатора, кВ; $U_{\text{к}}$ – напряжение КЗ трансформатора, %.

Активное и реактивное сопротивления токоограничивающего реактора (R_p и X_p) рассчитываются по формулам, мОм

$$R_p = \frac{\Delta P_{p \text{ ном}}}{I_{p \text{ ном}}^2} 10^3; \quad (3.5)$$

$$X_p = \omega(L - M)10^3, \quad (3.6)$$

где $\Delta P_{p \text{ ном}}$ – потери активной мощности в фазе реактора при номинальном токе, Вт; $I_{p \text{ ном}}$ – номинальный ток реактора, А; ω – угловая частота напряжения сети, рад/с; L – индуктивность катушки трехфазного реактора, Гн; M – взаимная индуктивность, Гн.

В паспортных данных реактора активное и реактивное сопротивления указываются.

Активное и реактивное сопротивления шинпроводов ($R_{ш}$ и $X_{ш}$) определяются экспериментальным или расчетным путем. Параметры шинпроводов (мОм/м) серий ШМА и ШРА даны в [3].

При расчетах токов КЗ могут быть использованы параметры шинпроводов, указанные в нормативно-технической документации, или расчетные данные.

Значения активного и индуктивного сопротивления кабелей принимают, как указано заводом–изготовителем или в [3].

При определении минимального значения тока КЗ рекомендуется учитывать увеличение активного сопротивления кабеля к моменту отключения цепи вследствие нагревания кабеля током КЗ r_g

$$r_g = c_g r_{g0}, \quad (3.7)$$

где c_g – коэффициент, учитывающий увеличение активного сопротивления кабеля; r_{g0} – активное сопротивление кабеля при температуре ϑ_0 , равной + 20 °С, мОм.

Активное сопротивление прямой последовательности одной фазы провода, проложенного открыто на изоляторах, и проводов воздушных линий l в миллиомах рассчитывают по формуле

$$R = c_g K_c K_{пэ} \rho_{g \text{ норм}} \frac{l}{s} \cdot 10^3, \quad (3.8)$$

где c_9 – коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления с повышением температуры; $K_c = 1,02$ – коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления многопроволочных жил проводов и кабелей вследствие скрутки; $K_{пэ}$ – коэффициент поверхностного эффекта при переменном токе; $\rho_{\vartheta_{норм}}$ – удельное сопротивление провода при $\vartheta = 20$ °С; s – сечение проводника, мм²; l – длина проводника, м.

Индуктивное сопротивление прямой последовательности (X) одной фазы провода круглого сечения в миллиомах на метр рассчитывают по формуле

$$X = 0,1451g \frac{a}{R_{\Pi}}, \quad (3.9)$$

где a – расстояние между проводниками, м; R_{Π} – радиус проводника, м.

При определении активного и индуктивного сопротивлений петли фазный провод – нулевой провод ($R_{ф-н}$, $X_{ф-н}$) используют соответственно формулы (3.8) и (3.9) или расчетные данные, приведенные в [3].

Активные и реактивные сопротивления контактов и контактных соединений (R_k и X_k) следует определять на основании данных экспериментов и расчетных методик. Для приближенного учета контактов принимают: $R_{ккл} = 0,1$ мОм (контактные соединения кабелей); $R_{кш} = 0,01$ мОм (шинопровода); $R_{ка} = 1$ мОм (коммутационные аппараты).

Значения активных и индуктивных сопротивлений нулевой последовательности трансформаторов тока принимают равными значениям сопротивлений прямой последовательности. Параметры некоторых многовитковых трансформаторов тока приведены в [3]. Активным и индуктивным сопротивлением одновитковых трансформаторов (на токи более 500 А) при расчетах токов КЗ можно пренебречь.

Значения сопротивлений катушек расцепителей и контактов некоторых автоматических выключателей приведены в [3].

Автономные источники и синхронные электродвигатели следует учитывать сверхпереходным сопротивлением (X_d''), а при определении постоянной времени затухания апериодической составляющей тока КЗ – индуктивным сопротивлением для токов обратной последовательности X_2 и активным сопротивлением обмотки статора R . При приближенных расчетах принимают: $X_{d(ном)}'' = 0,15$; $X_2 = X_d''$; $R = 0,15X_d''$.

Асинхронные электродвигатели следует вводить в схему замещения сверхпереходным индуктивным сопротивлением. При проведения уточненных расчетов следует также учитывать активное сопротивление статора. Их значения рекомендуется определять, как указано в [3]. При приближенных расчетах принимают: сверхпереходное индуктивное сопротивление асинхронного двигателя $X''_{дв(ном)} = 0,18$; активное сопротивление статора асинхронного двигателя $R_{дв} = 0,36X''_{дв(ном)}$.

При необходимости проведения уточненных расчетов следует также учитывать активное сопротивление асинхронного электродвигателя.

Суммарное активное сопротивление, характеризующее асинхронный электродвигатель в начальный момент КЗ в миллиомах, допустимо рассчитывать по формуле

$$R_{дв} = R_1 + 0,96 R_2^{\circ}, \quad (3.10)$$

где R_1 – активное сопротивление статора, мОм; R_2° – активное сопротивление ротора, приведенное к статору, мОм. Это сопротивление допустимо определять по формуле

$$R_2^{\circ} = \frac{0,36 M_{п*} (P_{ном} + P_{мех})}{I_{ном}^2 I_{п*}^2 (1 - s_{ном})} 10^6, \quad (3.11)$$

где $M_{п*}$ – кратность пускового момента электродвигателя; $P_{ном}$ – номинальная мощность электродвигателя, кВт; $P_{мех}$ – механические потери в электродвигателе (включая добавочные потери), кВт; $I_{п*}$ – кратность пускового тока электродвигателя по отношению к его номинальному току; $I_{ном}$ – номинальный ток электродвигателя, А; $s_{ном}$ – номинальное скольжение, о. е.

Активное сопротивление статора электродвигателя (в миллиомах), если оно не задано изготовителем, допускается определять по формуле

$$R_1 = \frac{s_{ном}}{100} \cdot \frac{U_{ном}^2 \cos \varphi \eta_{ном}}{P_{ном}}, \quad (3.12)$$

где $s_{ном}$ – номинальное скольжение асинхронного электродвигателя, %.

Сверхпереходное индуктивное сопротивление асинхронного электродвигателя в миллиомах равно

$$X''_{\text{дв}} = \sqrt{\left(\frac{U_{\text{ф ном}}}{I_{\text{п}} * I_{\text{ном}}} 10^3\right)^2 - R_{\text{дв}}^2}, \quad (3.13)$$

где $U_{\text{ф ном}}$ – номинальное фазное напряжение электродвигателя, В.

Комплексные нагрузки следует учитывать их параметрами прямой, обратной и нулевой последовательностей. Рекомендуемые значения сопротивлений прямой (Z_1) и обратной (Z_2) последовательностей отдельных элементов комплексной нагрузки приведены в [3]. Значения модулей полных сопротивлений прямой ($Z_{1\text{нг}}$), обратной ($Z_{2\text{нг}}$) и нулевой ($Z_{0\text{нг}}$) последовательностей некоторых узлов нагрузки в зависимости от их состава допускается определять, как указано в приложении 8 [3].

В приближенных расчетах для узлов, содержащих до 70 % асинхронных двигателей, допускается значения модулей полных сопротивлений комплексной нагрузки принимать равными $Z_{1\text{нг}*} = Z_{2\text{нг}*} = 0,4$; $Z_{0\text{нг}*} = 3$.

Активное сопротивление электрической дуги следует учитывать при определении минимального значения тока КЗ и допускается рассчитывать по формуле

$$R_{\text{д}} = 16 \frac{\sqrt{l_{\text{д}}}}{I_{\text{п0д}}^{0,85}}, \quad (3.14)$$

где $I_{\text{п0д}}$ – начальное действующее значение периодической составляющей тока в месте КЗ, определяемое с учетом сопротивления дуги; $l_{\text{д}}$ – длина дуги, мм:

$$l_{\text{д}} = \begin{cases} 20,4 \ln(a/2) e^{0,15 R_{\Sigma} / X_{\Sigma}}, & \text{при } a = (5 - 50) \text{ мм;} \\ 4a, & \text{при } a < 5 \text{ мм;} \\ a, & \text{при } a > 50 \text{ мм;} \end{cases} \quad (3.15)$$

где R_{Σ} и X_{Σ} – соответственно суммарное активное и индуктивное сопротивления цепи КЗ, мОм; a – расстояние между фазами, мм.

Сопротивление дуги в месте КЗ R_d можно определить по выражению

$$R_d = \frac{E_d l_d}{I_{п0}}, \quad (3.15)$$

где E_d – напряженность электрического поля в месте горения дуги, которую можно принять равной 1,5 В/мм; l_d – длина дуги, мм (равна удвоенному расстоянию); $I_{п0}$ – начальный ток трехфазного КЗ.

Переходное сопротивление в сети до 1 кВ можно представить в виде двух составляющих:

$$R_{п} = R_{кс} + R_d, \quad (3.16)$$

где $R_{кс}$ – суммарное сопротивление всех переходных контактов, токовых обмоток выключателей, реле и обмоток трансформаторов тока; R_d – сопротивление дуги в месте КЗ.

Суммарное сопротивление всех переходных контактов

$$R_{кс} = R_k + R_{кв} + R_{тт}, \quad (3.17)$$

где R_k – переходное сопротивление контактного соединения токоведущих шин; $R_{кв}$ – сопротивление автоматических выключателей, состоящее из сопротивления катушек расцепителей и переходного сопротивления контактов; $R_{тт}$ – сопротивление обмоток трансформаторов тока.

В практических расчетах для характерной схемы сети до 1 кВ (рис. 3.1) можно пользоваться значениями $R_{п}$, приведенными ниже для точек К₁ – К₄:

Мощность трансформатора, кВА 1000 1600 2500

$R_{п}$, мОм, для точек:

К1	6,41	6,81	15,42
К2.....	<u>4,01</u>	<u>2,72</u>	<u>1,86</u>
	5,92	3,81	3,01
К3.....	<u>18,38</u>	<u>12,01</u>	<u>6,92</u>
	22,31	15,95	9,26
К4	<u>4,09</u>	<u>4,51</u>	<u>3,62</u>
	7,79	5,27	4,59

В числителе значения R_{Π} при магистральной схеме, в знаменателе – при радиальной.

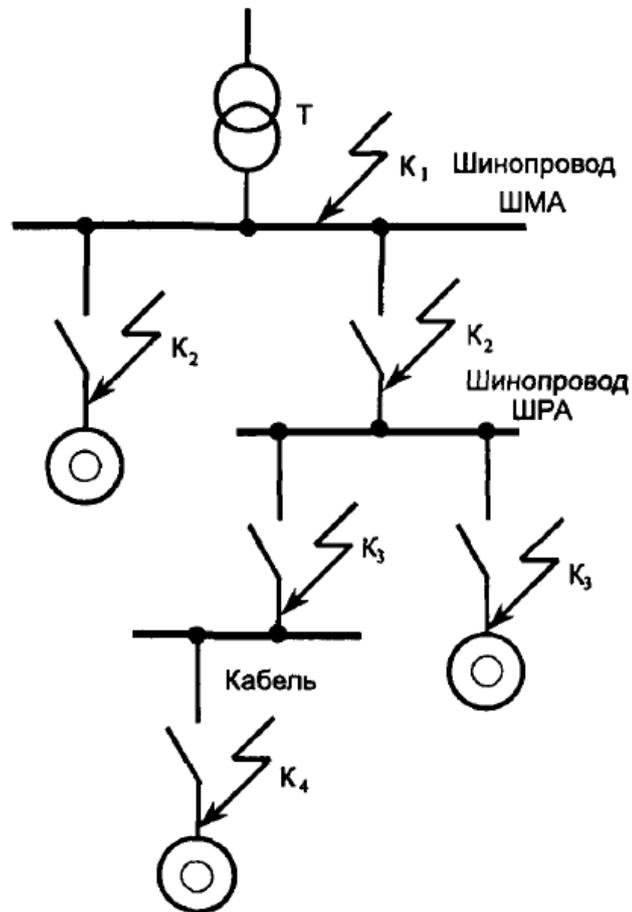


Рис. 3.1. Характерная схема цеховой электрической сети для расчета токов КЗ

3.3. Расчет начального тока при трехфазном коротком замыкании

Методика расчета начального действующего значения периодической составляющей тока КЗ в электроустановках до 1 кВ зависит от способа электроснабжения – от энергосистемы или от автономного источника.

При питании от энергосистемы через понижающий трансформатор начальное действующее значение периодической составляющей тока трехфазного КЗ $I_{\Pi 0}$ без учета подпитки от электродвигателей рассчитывают по формуле, кА

$$I_{п0с} = \frac{U_{ср ном}}{\sqrt{3} \sqrt{R_{1\Sigma}^2 + X_{1\Sigma}^2}}, \quad (3.18)$$

где $R_{1\Sigma}, X_{1\Sigma}$ – соответственно суммарное активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности короткозамкнутой цепи, мОм.

Таким образом значение активного и реактивного сопротивлений прямой последовательности

$$R_{1\Sigma} = R_T + R_{ш} + R_{1кл} + R_d + R_{кк}; \quad (3.19)$$

$$X_{1\Sigma} = X_c + X_T + X_{тт} + X_{ш} + X_{кв} + X_{1кл}, \quad (3.20)$$

где R_T, X_T – активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности понижающего трансформатора, мОм; $X_{тт}$ – индуктивное сопротивления первичных обмоток трансформатора тока, мОм; X_c – эквивалентное индуктивное сопротивление системы до понижающего трансформатора, мОм, приведенное к ступени низшего напряжения; $X_{кв}$ – индуктивное сопротивления токовых катушек автоматических выключателей, мОм; $R_{ш}, X_{ш}$ – активное и индуктивное сопротивления шинпроводов, мОм; R_k – суммарное активное сопротивление различных контактов, мОм; $R_{1кл}, X_{1кл}$ – активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности кабелей, мОм; R_d – активное сопротивление дуги в месте КЗ, мОм, рассчитываемое в зависимости от условий КЗ.

Начальный периодический ток от синхронных электродвигателей рассчитывают по формуле, кА

$$I_{п0сд} = \frac{E_{ф сд}''}{\sqrt{(R_{сд} + R_{1\Sigma})^2 + (X_d'' + X_{1\Sigma})^2}}, \quad (3.21)$$

где $E_{ф сд}''$ – сверхпереходная ЭДС синхронного электродвигателя, В; $X_d'', R_{сд}$ – соответственно сверхпереходное индуктивное и активное сопротивления двигателя, мОм; $X_{1\Sigma}, R_{1\Sigma}$ – суммарное индуктивное и

суммарное активное сопротивление прямой последовательности цепи, включенной между СД и расчетной точкой КЗ, мОм.

Начальный ток от асинхронных электродвигателей рассчитывают по формуле, кА

$$I_{п0 \text{ АД}} = \frac{E_{\phi \text{ АД}}''}{\sqrt{(R_{\text{АД}} + R_{1\Sigma})^2 + (X_{\text{АД}}'' + X_{1\Sigma})^2}}, \quad (3.22)$$

где $E_{\phi \text{ АД}}''$ – сверхпереходная ЭДС асинхронного электродвигателя, В; $X_{\text{АД}}''$, $R_{\text{АД}}$ – соответственно сверхпереходное индуктивное и активное сопротивления двигателя, мОм; $X_{1\Sigma}$, $R_{1\Sigma}$ – индуктивное и активное сопротивления прямой последовательности кабелей между точкой КЗ и электродвигателем, мОм.

Сверхпереходная ЭДС асинхронного электродвигателя

$$E_{\phi \text{ АД}}'' = \sqrt{(U_{0\phi} \cos \varphi - I_0 R_{\text{дв}})^2 + (U_{0\phi} \sin \varphi - I_0 X_{\text{дв}}'')^2}, \quad (3.23)$$

где $U_{0\phi}$, I_0 – фазное напряжение и ток статора в режиме, предшествующем КЗ соответственно.

При необходимости учета комплексной нагрузки соответствующее начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ следует рассчитывать, как указано[3].

Если электроснабжение электроустановки осуществляется от энергосистемы через понижающий трансформатор и вблизи места КЗ имеются синхронные и асинхронные электродвигатели или комплексная нагрузка, то начальный ток с учетом подпитки от электродвигателей или нагрузки следует определить как сумму токов от энергосистемы $I_{п0с}$ и от электродвигателей $I_{п0 \text{ СД}}$, $I_{п0 \text{ АД}}$ или комплексной нагрузки $I_{п0 \text{ кн}}$:

$$I_{п0} = I_{п0с} + I_{п0 \text{ СД}} + I_{п0 \text{ АД}} \text{ или } I_{п0} = I_{п0с} + I_{п0 \text{ кн}}. \quad (3.24)$$

3.4. Учет конденсаторных батарей при расчете токов короткого замыкания

При наличии в узле нагрузки конденсаторных батарей следует определять максимальную амплитуду высокочастотной составляющей

тока КЗ от батарей, а также степень ее затухания к моменту возникновения ударного тока КЗ.

Независимо от расчетной схемы максимальную амплитуду тока КЗ от конденсаторных батарей I_{\max} , кА, рассчитывают по формуле

$$I_{\max} = \frac{U_{c0}}{\sqrt{3}\omega_0 L}, \quad (3.25)$$

где U_{c0} – среднее номинальное напряжение той ступени напряжения, где подключены конденсаторные батареи, В; L – индуктивность короткозамкнутого контура с конденсаторной батареей, Гн; $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ – угловая частота собственных колебаний контура, рад/с.

Индуктивность короткозамкнутого контура L определяется

$$L = L_k + L_{\text{вн}}, \quad (3.26)$$

где $L_{\text{вн}}$ – индуктивность внешней по отношению к батарее части контура, Гн; L_k – индуктивность конденсаторной батареи, Гн.

Апериодическую составляющую тока КЗ i_a , кА, конденсаторной батареи определяют по формуле

$$i_a = I_{\max} e^{-bt}, \quad (3.27)$$

где t – время, с; $b = \frac{R_k + R_{\text{вн}}}{2L}$ – коэффициент затухания; R_k – активное сопротивление конденсаторной батареи при частоте ω_0 ; $R_{\text{вн}}$ – активное сопротивление внешней по отношению к батарее части контура.

3.5. Расчет апериодической составляющей тока короткого замыкания

Наибольшее начальное значение апериодической составляющей тока КЗ (i_{a0}) в общем случае считают равным амплитуде периодической составляющей тока в начальный момент КЗ

$$i_{a0} = \sqrt{2}I_{п0} \quad (3.28)$$

В радиальных сетях аperiodическую составляющую тока КЗ в произвольный момент времени (i_{at}) определяют по формуле

$$i_{at} = i_{a0} e^{-t/T_a}, \quad (3.29)$$

где t – время, с; T_a – постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ с.

Постоянную времени T_a определяют по формуле

$$T_a = \frac{X_\Sigma}{\omega_c R_\Sigma}, \quad (3.30)$$

где X_Σ и R_Σ – результирующие индуктивное и активное сопротивления цепи КЗ, мОм; ω_c – синхронная угловая частота напряжения сети, рад/с.

Если точка КЗ делит расчетную схему на радиальные, независимые друг от друга ветви, то аperiodическую составляющую тока КЗ в произвольный момент времени следует определять как сумму аperiodических составляющих токов отдельных ветвей по формуле

$$i_{at} = \sum_{i=1}^m i_{a0i} e^{-t/T_{ai}}, \quad (3.31)$$

где m – число независимых ветвей схемы; i_{a0i} – начальное значение аperiodической составляющей тока КЗ в i -й ветви, кА.

3.6. Расчет ударного тока короткого замыкания

Ударный ток трехфазного КЗ i_y в сети с одним источником питания рассчитывают по формуле

$$i_y = \sqrt{2} I_{п0} (1 + \sin \varphi_k e^{-t_y/T_a}) = \sqrt{2} I_{п0} K_y, \quad (3.32)$$

где $K_y = 1 + \sin \varphi_k e^{-t_y/T_a}$ – ударный коэффициент, который может быть определен по кривым (рис. 3.2); T_a – постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ; φ_k – угол сдвига по фазе

напряжения или ЭДС источника и периодической составляющей тока КЗ, который рассчитывают по формуле

$$\varphi_k = \arctg X_{1\Sigma} / R_{1\Sigma}, \quad (3.33)$$

где t_y – время от начала КЗ до появления ударного тока, с, которое определяется по формуле

$$t_y = 0,01 \frac{\pi / 2 + \varphi_k}{\pi}. \quad (3.34)$$

При расчете ударного тока КЗ на выводах автономных источников, а также синхронных и асинхронных электродвигателей допускается считать, что ударный ток наступает через 0,01 с после начала КЗ; амплитуда периодической составляющей тока КЗ в момент времени $t = 0,01$ с равна амплитуде этой составляющей в начальный момент КЗ.

Ударный ток от асинхронного электродвигателя $i_{y.ад}$ определяют с учетом затухания амплитуды периодической составляющей тока КЗ по формуле, кА

$$i_{y.ад} = \sqrt{2} I_{п0.ад} \left(e^{-\frac{0,01}{T_p}} + e^{-\frac{0,01}{T_a}} \right), \quad (3.35)$$

где T_p – расчетная постоянная времени затухания периодической составляющей тока статора, с; T_a – постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока статора, с.

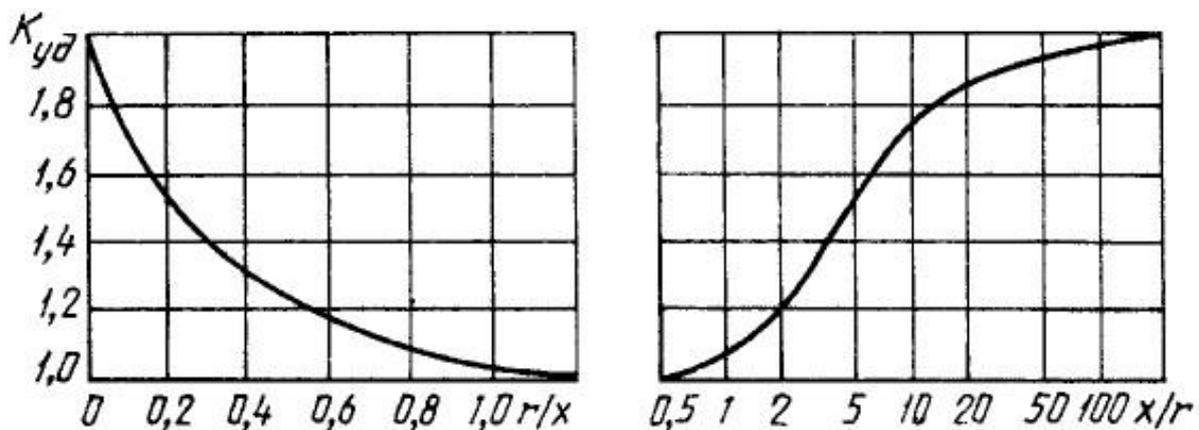


Рис. 3.2. Кривые зависимости ударного коэффициента K_y от отношений R/x и x/R

При этом T_p и T_a допускается рассчитывать по формулам

$$T_p = \frac{X_{\text{АД}}'' + X_{1\text{кб}}''}{\omega_c R_2}; \quad (3.36)$$

$$T_a = \frac{X_{\text{АД}}'' + X_{1\text{кб}}''}{\omega_c (R_1 + R_{1\text{кб}}'')}, \quad (3.37)$$

где ω_c – синхронная угловая частота, рад/с; R_1 и R_2^0 – соответственно активное сопротивление статора и ротора, приведенное к статору, мОм.

Если точка КЗ делит расчетную схему на радиальные, не зависящие друг от друга ветви, то ударный ток КЗ $i_{\text{уд}}$ определяют как сумму ударных токов отдельных ветвей по формуле

$$i_y = \sum_{i=1}^m \sqrt{2} I_{\text{п0}i} (1 + e^{t_{yi}/T_{ai}}), \quad (3.38)$$

где m – число независимых ветвей; $I_{\text{п0}i}$ – начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ в i -й ветви, кА; t_{yi} – время появления ударного тока в i -й ветви, с; T_{ai} – постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ в i -й ветви, с.

3.7. Расчет периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени

3.7.1. Расчет периодической составляющей тока КЗ от автономных источников электроэнергии в произвольный момент времени

В сложных автономных системах расчет периодической составляющей тока КЗ от источников электроэнергии (синхронных генераторов) в произвольный момент времени следует выполнять путем решения соответствующей системы дифференциальных уравнений переходных процессов с использованием ЭВМ.

В приближенных расчетах для определения действующего значения периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени от автономных источников при радиальной схеме применяют кривые, характеризующие изменение этой составляющей во времени при разных

удаленностях точки КЗ (рис. 3.3). Значения периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени отнесены к начальному значению этой составляющей, т.е. $\gamma_t = \frac{I_{пт}}{I_{п0}}$.

Удаленность точки КЗ от синхронной машины $I_{п0}^*(\text{НОМ})$ характеризуется отношением действующего значения периодической составляющей тока этой машины в начальный момент КЗ к ее номинальному току, т.е.

$$I_{п0}^*(\text{НОМ}) = \frac{I_{п0}}{I_{НОМ}}. \quad (3.39)$$

Действующее значение периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени от синхронной машины (или нескольких однотипных синхронных машин, находящихся в одинаковых условиях по отношению к точке КЗ) ($I_{пт}$), следует определять по формуле

$$I_{пт} = \gamma_t I_{п0}^*(\text{НОМ}) I_{НОМ}, \quad (3.40)$$

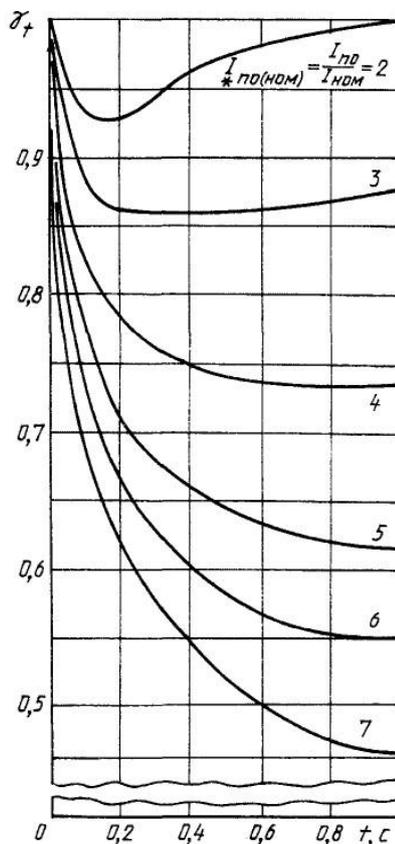


Рис. 3.3. Изменение периодической составляющей тока КЗ от синхронной машины

3.7.2. Расчет периодической составляющей тока КЗ от синхронных и асинхронных электродвигателей в произвольный момент времени

Точный расчет периодической составляющей тока КЗ от синхронных и асинхронных электродвигателей в произвольный момент времени следует выполнять путем решения системы дифференциальных уравнений переходных процессов.

При приближенных расчетах для определения действующего значения периодической составляющей тока КЗ от синхронных электродвигателей в произвольный момент времени при радиальной схеме используют типовые кривые, приведенные на рис. 3.3.

При приближенных расчетах для определения действующего значения периодической составляющей тока КЗ от асинхронных электродвигателей в произвольный момент времени при радиальной схеме используют кривые, приведенные на рис. 3.4. Значения периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени отнесены к начальному значению этой составляющей, т.е.

$$\gamma_{t \text{ АД}} = \frac{I_{\text{пт АД}}}{I_{\text{п0 АД}}}. \quad (3.41)$$

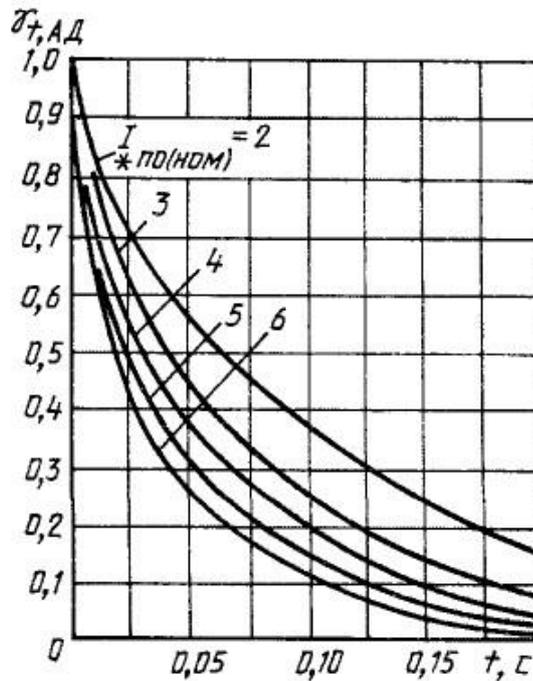


Рис. 3.4. Изменение периодической составляющей тока КЗ от асинхронных двигателей

Удаленность точки КЗ от асинхронного электродвигателя характеризуется отношением действующего значения периодической составляющей тока этого электродвигателя в начальный момент КЗ к его номинальному току

$$I_{*по(ном)} = \frac{I_{п0 АД}}{I_{ном АД}}. \quad (3.42)$$

Действующее значение периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени от асинхронного электродвигателя ($I_{пт АД}$) (или нескольких асинхронных электродвигателей, находящихся в одинаковых условиях по отношению к точке КЗ) рассчитывают по формуле

$$I_{пт АД} = \gamma_{t АД} I_{п0(ном)} I_{ном АД}. \quad (3.43)$$

Контрольные вопросы

1. Какие аппараты рекомендуется проверять по режиму КЗ в электроустановках (ЭУ) напряжением до 1 кВ?
2. В каких единицах производится расчет токов КЗ в ЭУ напряжением до 1 кВ?
3. Как определить сопротивление системы, трансформатора, токоограничивающего реактора, кабеля?
4. Какие элементы схемы следует учитывать при расчете тока КЗ в ЭУ напряжением до 1 кВ?
5. Какое сопротивление следует учитывать при определении минимального значения тока КЗ?
6. По какому выражению можно определить сопротивление дуги в месте КЗ ?
7. Каков алгоритм расчета начального тока КЗ при питании от энергосистемы, автономного источника?
8. Следует ли учитывать токи подпитки от синхронных электродвигателей?
9. Как рассчитывается максимальная амплитуда тока КЗ от конденсаторных батарей?
10. Каков порядок расчета аperiodической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени?
11. Как определяется ударный ток КЗ в сети с одним источником?
12. Как определяется периодическая составляющая тока КЗ?

13. Каким коэффициентом характеризуется удаленность точки КЗ от синхронной машины?
14. Какая методика используется при приближенных расчетах периодического тока КЗ в произвольный момент времени?
15. Как влияет комплексная нагрузка на начальный ток КЗ?
16. В каких случаях при определении периодической составляющей тока короткого замыкания учитывается активное сопротивление элементов сети ?
17. Какие последствия в электрической системе может вызвать протекание тока короткого замыкания?
18. Как влияет АРВ синхронного двигателя на ток подпитки?
19. Каков порядок расчета тока КЗ в произвольный момент времени?
20. Как рассчитать ударный ток и ударный коэффициент?
21. Какие эксплуатационные мероприятия используются для устранения аварии, возникшей в результате короткого замыкания?
22. Каковы особенности расчета начального тока КЗ в ЭУ напряжением до 1 кВ?

Задача для самопроверки

Задача 3.1

Для схемы, приведенной на рис. 33.1 определить токи при трехфазном КЗ в точке К – максимальные и минимальные значения тока КЗ.

Исходные данные:

Система С: мощность КЗ $S_K = 300 \text{ МВ} \cdot \text{А}$; $U_{\text{ср.вн}} = 10 \text{ кВ}$.

Трансформатор Т: тип ТМ-1000 Т: мощность $S_{\text{ном}} = 1000 \text{ кВ} \cdot \text{А}$; потери холостого хода $\Delta P_{\text{хх}} = 2,3 \text{ кВт}$; потери короткого замыкания $\Delta P_K = 12,2 \text{ кВт}$; напряжение короткого замыкания $U_K = 5,5 \%$, $U_{\text{вн}} = 10 \text{ кВ}$, $U_{\text{нн}} = 0,4 \text{ кВ}$.

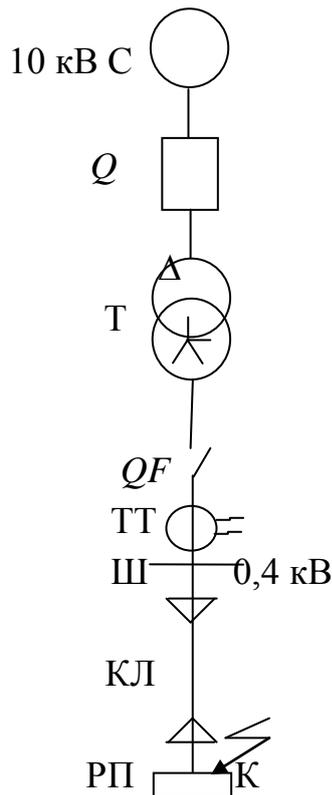


Рис. 33.1. Исследуемая система к задаче 3.1

Автоматический выключатель QF : серия ВА-51: номинальный ток $I_{\text{ном}} = 1600$ А, активное и индуктивное сопротивления $R_{\text{ав}} = 0,14$ мОм; $X_{\text{ав}} = 0,08$ мОм.

Кабельная линия КЛ: марка ААШВ-3×185: активное и индуктивное сопротивления $R_{\text{окб}} = 0,208$ мОм/м; $X_{\text{окб}} = 0,055$ Ом/м; длина $l = 150$ м.

Шинопровод Ш: тип ШМА-4-1600Ш: активное и индуктивное сопротивления шин $R_{\text{ш}} = 0,030$ мОм/м; $X_{\text{ш}} = 0,014$ мОм/м; $R_{\text{нп}} = 0,037$ мОм/м; $X_{\text{нп}} = 0,042$ мОм/м; длина $l_{\text{ш}} = 10$ м.

Исходные данные:

Система С: мощность КЗ $S_{\text{к}} = 300$ МВ·А; $U_{\text{ср.вн}} = 10$ кВ.

Трансформатор Т: тип ТМ-1000 Т: мощность $S_{\text{ном}} = 1000$ кВ·А; потери холостого хода $\Delta P_{\text{хх}} = 2,3$ кВт; потери короткого замыкания $\Delta P_{\text{к}} = 12,2$ кВт; напряжение короткого замыкания $U_{\text{к}} = 5,5$ %, $U_{\text{вн}} = 10$ кВ, $U_{\text{нн}} = 0,4$ кВ.

Автоматический выключатель QF : серия ВА-51: номинальный ток $I_{\text{ном}} = 1600$ А, активное и индуктивное сопротивления $R_{\text{ав}} = 0,14$ мОм; $X_{\text{ав}} = 0,08$ мОм.

Кабельная линия КЛ: марка ААШв-3×185: активное и индуктивное сопротивления $R_{0кб} = 0,208$ мОм/м; $X_{0кб} = 0,055$ Ом/м; длина $l = 150$ м.

Шинопровод Ш: тип ШМА-4-1600Ш: активное и индуктивное сопротивления шин $R_{ш} = 0,030$ мОм/м; $X_{ш} = 0,014$ мОм/м; $R_{нп} = 0,037$ мОм/м; $X_{нп} = 0,042$ мОм/м; длина $l_{ш} = 10$ м.

Болтовые контактные соединения: $R_k = 0,003$ мОм; количество $n = 4$.

Измерительные трансформаторы тока ТТ: $I_{ном} = 500$ А, $R_{тт} = 0,05$ мОм; $X_{тт} = 0,07$ мОм.

4. РАСЧЕТ ТОКОВ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ ВЫШЕ 1 КВ

4.1. Метод симметричных составляющих

Для расчета токов и напряжений при несимметричных коротких замыканиях применяют метод симметричных составляющих. Большая часть расчетов проводится только для одной фазы, подобно тому, как это делается при расчете трехфазного (симметричного) КЗ. Однако при этом приходится составлять и сворачивать относительно места КЗ три независимые схемы замещения: прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Метод применяется при допущении, что в сети действуют только основные гармоники токов и напряжений. Также полагается полная симметрия фаз всех элементов электрической системы, за исключением лишь места повреждения.

Суть метода состоит в том, что любую несимметричную трехфазную систему векторов токов, напряжений и т.д. можно представить в виде суммы трех симметричных составляющих: прямой, обратной и нулевой последовательностей. В пределах каждой из последовательностей длины векторов одинаковы, а сами векторы сдвинуты по отношению друг к другу на одинаковый угол.

Токи в фазах A , B и C могут быть выражены через сумму токов прямой, обратной и нулевой последовательностей следующим образом:

$$\begin{aligned} I_A &= I_{A1} + I_{A2} + I_{A0}, \\ I_B &= I_{B1} + I_{B2} + I_{B0}, \\ I_C &= I_{C1} + I_{C2} + I_{C0}. \end{aligned} \tag{4.1}$$

Соотношения между фазными значениями в симметричной системе устанавливаются с помощью поворотного множителя $a = e^{j120^\circ}$. Поворотный множитель является вектором, модуль (длина) которого равен единице, а аргумент – 120° . Как и любое комплексное число, поворотный множитель a можно представить в показательной, тригонометрической и алгебраической формах:

$$a = e^{j120^\circ} = \cos 120^\circ + j \sin 120^\circ = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} = -0,5 + j0,867.$$

Симметричные составляющие токов прямой и обратной последовательностей в фазах В и С можно выразить через симметричные составляющие соответствующих последовательностей тока в фазе А

$$I_{B1} = I_{A1} e^{j240^\circ} = a^2 I_{A1}; I_{C1} = I_{A1} e^{j120^\circ} = a I_{A1}; \quad (4.2)$$

$$I_{B2} = I_{A2} e^{j120^\circ} = a I_{A2}; I_{C2} = I_{A2} e^{j240^\circ} = a^2 I_{A2}. \quad (4.3)$$

Для нахождения тока нулевой последовательности в фазах В и С поворотный множитель не используется, так как векторы нулевой последовательности всех трех фаз совпадают как по величине, так и по направлению

$$I_{A0} = I_{B0} = I_{C0}. \quad (4.4)$$

Тогда

$$I_B = a^2 I_{A1} + a I_{A2} + I_{A0}. \quad (4.5)$$

$$I_C = a I_{A1} + a^2 I_{A2} + I_{A0}. \quad (4.6)$$

В трехфазной цепи в месте нарушения симметрии появляются напряжения и токи прямой, обратной и нулевой последовательностей. Для их учета в схему замещения в местах повреждения необходимо вводить источники напряжения прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Поэтому принято считать, что токи соответствующих последовательностей циркулируют в схеме под действием именно этих источников. Токи и напряжения каждой из последовательностей могут определяться независимо от других последовательностей. Поэтому и рассматриваются три независимые схемы замещения, построенные в отдельности для каждой из последовательностей, содержащие в месте повреждения только один источник напряжения соответствующей

последовательности. При этом для токов и напряжений в каждой из схем выполняются законы Ома и Кирхгофа.

Поскольку в пределах одной последовательности симметрия схемы сохраняется, то составляются однолинейные (однофазные) схемы замещения.

Сопротивления элементов электрической системы для токов прямой, обратной и нулевой последовательностей в общем случае неодинаковы. ЭДС синхронных генераторов, компенсаторов и электродвигателей симметричны, т.е. имеют только прямую последовательность и не содержат обратной и нулевой составляющих. В связи с этим, схемы замещения отдельных последовательностей, а значит и их результирующие сопротивления могут различаться. ЭДС источников электроэнергии участвуют только в схемах замещения прямой последовательности.

На основании данных положений строятся три однолинейные (однофазные) схемы замещения для каждой из последовательностей. После их сворачивания относительно места повреждения получают три результирующие эквивалентные схемы замещения, для которых справедливы уравнения второго закона Кирхгофа.

4.2. Параметры элементов для токов различных последовательностей

В схему замещения прямой последовательности при расчете начального значения тока несимметричного КЗ генераторы, автономные источники, синхронные и асинхронные электродвигатели, а также комплексная нагрузка должны быть введены сверхпереходными ЭДС и сверхпереходными сопротивлениями.

Приближенные значения сопротивлений обратной последовательности X_2 приведены ниже.

Машины без демпферных обмоток $1,45 X'_d$

Турбогенераторы и машины с демпферными обмотками $1,22 X'_d$

Машины с полной демпферной обмоткой X'_d

Обобщенная нагрузка (для сетей напряжением 6–10 кВ) 0,35

Обобщенная нагрузка (для сетей напряжением 35 кВ) 0,45

Для обобщенной нагрузки сопротивление обратной последовательности принимают равным $X_{2*(H)} = 0,35$. Параметры

токоограничивающего реактора, трансформатора, воздушных и кабельных линий в схеме обратной последовательности соответствуют их величинам в схеме прямой последовательности.

Схема нулевой последовательности определяется соединением обмоток трансформаторов и автотрансформаторов. Сопротивления нулевой последовательности для характерных элементов энергосистем:

Синхронные машины. Сопротивление нулевой последовательности синхронных машин существенно зависит от типа обмотки, колеблясь в пределах: $X_0 = (0,15 - 0,16) X_d''$. Как правило, схемы соединения обмоток трансформаторов подбирают такими, чтобы исключить протекание через генераторы токов нулевой последовательности.

Обобщенная нагрузка. Сопротивление нулевой последовательности обобщенной нагрузки X_0 определяется схемами соединения входящих в неё элементов и питающих обмоток понижающих трансформаторов. Как правило, питающие обмотки понижающих трансформаторов соединяются в «треугольник» (Δ), что исключает проникновения в нагрузку токов нулевой последовательности.

Трансформаторы. Сопротивление нулевой последовательности трансформаторов X_{0T} определяется их конструкцией и схемой соединения обмоток: «треугольник», «звезда» с заземленной нейтралью, «звезда» с незаземленной нейтралью. Сопротивление нулевой последовательности трансформаторов со стороны обмотки, соединенной в «треугольник» или в «звезду» с незаземленной нейтралью $X_0 = \infty$. Ток нулевой последовательности может протекать от точки КЗ только в сторону обмоток, соединенных в «звезду» с заземленной нейтралью. Сопротивление нулевой последовательности в этом случае зависит от схемы соединения других обмоток и от наличия в цепях этих обмоток контуров для прохождения токов нулевой последовательности. Сопротивление ветви намагничивания $X_{\mu 0}$ зависит от конструкции трансформатора. Для групп из трех однофазных трансформаторов и трехфазных пятистержневых трансформаторов $X_{\mu 0} = 0,3 - 1,0$ о.е. Схемы замещения трехобмоточных трансформаторов определяют аналогично.

Если в нейтраль обмотки трансформатора, по которой протекает ток нулевой последовательности, включено сопротивление X_N , то оно вводится в схему замещения утроенной величиной $3X_N$.

Автотрансформаторы. Схема замещения нулевой последовательности автотрансформаторов с заземленной наглухо нейтралью подобна схеме замещения нулевой последовательности аналогичных по числу и схеме соединения обмоток трансформаторов.

Воздушные электрические линии. Сопротивление нулевой последовательности воздушных линий зависит от материала и схемы подключения грозозащитных тросов, наличия и параметров других линий электропередачи, идущих по общей трассе на близком расстоянии друг от друга. Средние значения погонных сопротивлений $X_{0\text{вл}}$ воздушных электрических линий:

Одноцепная без тросов	$3,5X_1$
Одноцепная со стальными тросами	$3X_1$
Одноцепная со сталеалюминиевыми тросами	$2X_1$
Двухцепная без тросов	$5,5X_1$
Двухцепная со стальными тросами	$4,7X_1$
Двухцепная со сталеалюминиевыми тросами	$3X_1$

Кабельные электрические линии. Сопротивление нулевой последовательности кабелей $X_{0\text{кл}}$ зависит от типа кабеля, способа его прокладки, параметров оболочки и характера её заземления, параметров заземлителей.

Ориентировочно принимают $X_{0\text{кл}} = 10X_1$, $X_{0\text{кл}} = (3,5 - 4,6)X_1$.

Токоограничивающие реакторы. Сопротивление нулевой последовательности обычно принимают $X_{0\text{р}} = X_2 = X_1$.

Синхронные и асинхронные электродвигатели. Индуктивное сопротивление обратной последовательности синхронных и асинхронных электродвигателей допустимо принимать численно равными индуктивной составляющей их сопротивлений короткого замыкания. Сопротивление обратной последовательности обобщенной нагрузки какого-либо узла в относительных единицах, отнесенное к полной мощности нагрузки и среднему номинальному напряжению той ступени напряжения сети, где эта нагрузка присоединена, следует принимать равным: при напряжении сети 35 кВ и более $X_{2(\text{НОМ})}^* = 0,45$ и при напряжении сети менее 35 кВ $X_{2(\text{НОМ})}^* = 0,35$.

4.3. Составление схемы замещения

Схема замещения прямой последовательности составляется так же как и для расчета трехфазного короткого замыкания. В зависимости от применяемого метода расчета и момента времени генераторы и нагрузки вводятся в схему соответствующими реактивностями и ЭДС. Все

остальные элементы вводятся в схему неизменными во времени сопротивлениями.

Схема замещения обратной последовательности по структуре аналогична схеме прямой последовательности. Однако в ней ЭДС всех генерирующих ветвей условно принимают равными нулю, а реактивности обратной последовательности синхронных машин и нагрузок постоянными для любого момента времени и не зависящими от вида и условий несимметрии.

Началами схем замещения прямой или обратной последовательностей, обозначаемыми буквами H_1 и H_2 , являются нейтрали генерирующих источников и нагрузки; концами схем, обозначаемыми K_1 и K_2 , являются точка короткого замыкания.

Токи нулевой последовательности по существу являются однофазным током, разветвлённым между тремя фазами и возвращающимся через землю и параллельным ей цепям. В силу этого, путь циркуляции токов нулевой последовательности резко отличен от пути, по которому проходят токи прямой и обратной последовательностей.

Схема нулевой последовательности в значительной мере определяется соединением обмоток трансформаторов.

Составление схемы нулевой последовательности следует начинать от точки короткого замыкания, считая, что в этой точке все фазы замкнуты между собой вместе накоротко и к ней приложено напряжение нулевой последовательности. Далее, в пределах каждой электрически связанной цепи следует выявить возможные пути протекания токов нулевой последовательности.

При расчете токов при несимметричных коротких замыканиях составляются схемы замещения отдельных последовательностей. В схему замещения прямой последовательности генераторы, крупные синхронные и асинхронные двигатели вводятся своими сверхпереходными параметрами. Схемы преобразуются к простейшему радиальному виду и определяются эквивалентные ЭДС E_Σ и сопротивления $Z_{1\Sigma}$, $Z_{2\Sigma}$, $Z_{0\Sigma}$. По правилу эквивалентности прямой последовательности определяются симметричные составляющие сверхпереходного тока в точке КЗ и его полное значение. Далее определяют симметричные составляющие токов во всех ветвях схемы.

Проходя через трансформатор со стороны «звезды» на сторону «треугольника» токи и напряжения изменяются как по величине, так и по фазе в зависимости от схемы соединения обмоток. Ток в линейном проводе за «треугольником» фазы А I_a определяется по выражению

$$I_a = I_{A1}e^{j30^\circ N} + I_{A2}e^{-j30^\circ N}, \quad (4.7)$$

где N – номер группы соединения обмоток трансформаторов в соответствии с правилом часового циферблата; I_a – ток фазы A со стороны обмотки трансформатора, соединенной в «треугольник»; I_{A1} , I_{A2} – симметричные составляющие тока фазы A со стороны обмотки трансформатора, соединенной в «звезду».

Замкнутый контур для токов нулевой последовательности возможен только в том случае, если в цепи, электрически связанной с точкой короткого замыкания, имеется по меньшей мере одна заземлённая нейтраль. При наличии нескольких заземлённых нейтралей в этой цепи образуется несколько параллельных контуров для токов нулевой последовательности.

Трансформация токов нулевой последовательности возможна только при соблюдении определённых 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 в ней заземлённые нейтралы 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 в схему нулевой последовательности входят как трансформатор, так и все элементы, по которым протекают токи нулевой последовательности с обеих сторон трансформатора.

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

В тех случаях, когда требуется определить токи и напряжения не только в месте несимметричного КЗ, но и в других ветвях и точках расчетной схемы, целесообразно использовать комплексные схемы замещения. Исходные комплексные схемы замещения для расчета однофазного, двухфазного и двухфазного КЗ на землю получаются путем соединения, соответственно, начал и концов исходных схем замещения различных последовательностей, как показано на рис. 4.1, 4.2 и 4.3.

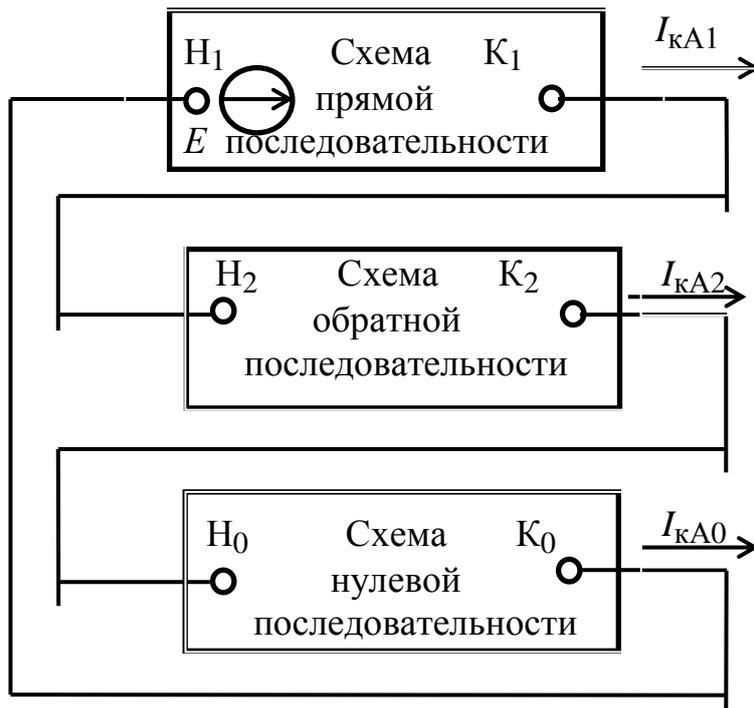


Рис. 4.1. Комплексные схемы замещения для однофазного КЗ



Рис. 4.2. Комплексная схема замещения для двухфазного КЗ на землю

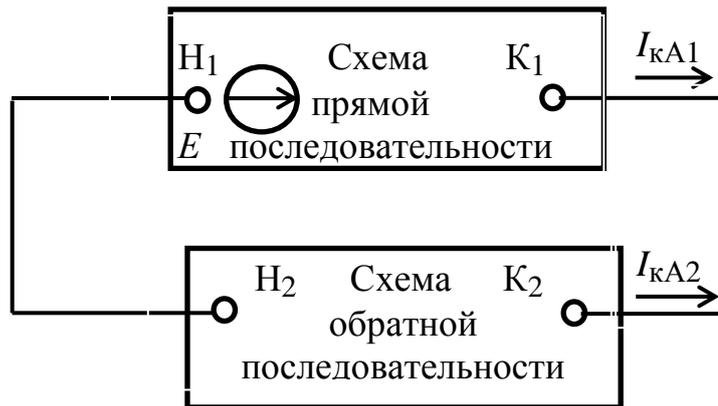


Рис. 4.3. Комплексная схема замещения для двухфазного КЗ

Основные уравнения второго закона Кирхгофа отдельно для каждой последовательности

$$\begin{aligned} U_{к1} &= E_{\Sigma 1} - Z_{1\Sigma} I_{к1} \\ U_{к2} &= 0 - Z_{2\Sigma} I_{к2} \\ U_{к0} &= 0 - Z_{0\Sigma} I_{к0}, \end{aligned} \quad (4.8)$$

где $U_{к1}$, $U_{к2}$, $U_{к0}$, $I_{к1}$, $I_{к2}$, $I_{к0}$ – симметричные составляющие напряжения и тока в месте короткого замыкания; $Z_{1\Sigma}$, $Z_{2\Sigma}$, $Z_{0\Sigma}$ – результирующие сопротивления схем соответствующих последовательностей относительно точки короткого замыкания, $E_{\Sigma 1}$ – результирующая ЭДС относительно точки короткого замыкания.

Так как токи и напряжения обратной и нулевой последовательностей пропорциональны току прямой последовательности $I_{к1}$, то расчет сводится к нахождению тока $I_{к1}$.

Ток прямой последовательности $I_{к1}^{(n)}$ любого несимметричного КЗ можно выразить как

$$I_{к1}^{(n)} = \frac{E_{\Sigma}}{Z_{1\Sigma} + \Delta Z^{(n)}}, \quad (4.9)$$

где E_{Σ} – результирующая ЭДС схемы прямой последовательности; $Z_{1\Sigma}$ – результирующее сопротивление прямой последовательности; $\Delta Z^{(n)}$ – дополнительное сопротивление, определяемое значениями результирующих сопротивлений обратной $Z_{2\Sigma}$ и нулевой $Z_{0\Sigma}$ последовательностей.

Величина дополнительного сопротивления $\Delta Z^{(n)}$ для различных видов КЗ:

Однофазное	$Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma}$
Двухфазное	$Z_{2\Sigma}$
Двухфазное на землю	$Z_{2\Sigma} // Z_{0\Sigma}$

4.4. Расчет начального тока несимметричного короткого замыкания

Правило эквивалентности прямой последовательности: ток прямой последовательности $I_{к1}^{(n)}$ любого несимметричного КЗ может быть определен как ток при трехфазном КЗ в точке, удаленной от действительной точки КЗ на дополнительное сопротивление $\Delta Z^{(n)}$, определяемое видом КЗ.

Начальное действующее значение периодической составляющей тока фазы А в месте однофазного КЗ составляет

$$I_{п0}^{(1)} = \frac{E_{\text{экА}}''}{j(X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})} I_{\text{б}}, \quad (4.10)$$

где $I_{\text{б}}$ – базисный ток той ступени напряжения сети, на которой находится расчетная точка КЗ; $X_{1\Sigma}$, $X_{2\Sigma}$, $X_{0\Sigma}$ – результирующее сопротивление прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Начальное действующее значение периодической составляющей тока фазы А в месте двухфазного КЗ составляет

$$I_{п0}^{(2)} = \frac{E_{\text{эк}}''}{j(X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma})} I_{\text{б}}. \quad (4.11)$$

Начальное действующее значение периодической составляющей тока фазы А в месте двухфазного КЗ на землю составляет

$$I_{п0}^{(1,1)} = \frac{E_{\text{эк}}''}{j\left(X_{1\Sigma} + \frac{X_{2\Sigma} X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}\right)} I_{\text{б}}. \quad (4.12)$$

Выражения для определения симметричных составляющих токов и напряжений в точке КЗ, а также токов и напряжений фаз приведены в табл. 4.1.

Модуль фазного тока любого (n) несимметричного КЗ в общем виде может быть выражен через ток прямой последовательности как

$$I_K^{(n)} = m^{(n)} I_{KA1}^{(n)}, \quad (4.13)$$

где $m^{(n)}$ – коэффициент, зависящий от вида короткого замыкания.

При неучете активных сопротивлений в схеме величина коэффициента $m^{(n)}$ для различных видов КЗ приведена ниже:

Однофазное	3
Двухфазное	$\sqrt{3}$
Двухфазное на землю	$\sqrt{3} \sqrt{(1 - Z_{2\Sigma} Z_{0\Sigma} / Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma})^2}$

Таблица 4.1

Расчетные значения токов и напряжений и их симметричных составляющих

№	Обозначения и определяемые величины	Вид короткого замыкания		
		Однофазное	Двухфазное	Двухфазное на землю
1	2	3	4	5
1	Ток обратной последовательности I_{KA2}	I_{KA1}	$-I_{KA1}$	$-I_{KA1} Z_{0\Sigma} / (Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma})$
2	Ток нулевой последовательности I_{KA0}	I_{KA1}	0	$-I_{KA1} Z_{2\Sigma} / (Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma})$
3	Напряжение прямой последовательности U_{KA1}	$I_{KA1} (Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma})$	$I_{KA1} Z_{2\Sigma}$	$I_{KA1} Z_{2\Sigma} Z_{0\Sigma} / (Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma})$

1	2	3	4	5
4	Напряжение обратной последовательности U_{KA2}	$-I_{KA1}Z_{2\Sigma}$	$-I_{KA1}Z_{2\Sigma}$	$I_{KA1}Z_{2\Sigma}Z_{0\Sigma}/(Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma})$
5	Напряжение нулевой последовательности U_{KA0}	$-I_{KA1}Z_{0\Sigma}$	0	$I_{KA1}Z_{2\Sigma}Z_{0\Sigma}/(Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma})$
6	Ток в фазе A I_{KA}	$3I_{KA1}$	0	0
	Ток в фазе B I_{KB}	0	$j\sqrt{3}I_{KA1}$	$\{a^2 - [(Z_{2\Sigma} + aZ_{0\Sigma})/(Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma})]\}I_{KA1}$
	Ток в фазе C I_{KC}	0	$-j\sqrt{3}I_{KA1}$	$\{a - [(Z_{2\Sigma} + a^2Z_{0\Sigma})/(Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma})]\}I_{KA1}$
7	Напряжение U_{KA}	0	$Z_{2\Sigma}I_{KA1}$	$3I_{KA1}Z_{2\Sigma}Z_{0\Sigma}/(Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma})$
	Напряжение U_{KB}	$[(a^2 - a)Z_{2\Sigma} + (a^2 - 1)Z_{0\Sigma}]I_{KA1}$	$-2Z_{2\Sigma}I_{KA1}$	0
	Напряжение U_{KC}	$[(a - a^2)Z_{2\Sigma} + (a - 1)Z_{0\Sigma}]I_{KA1}$	$-2Z_{2\Sigma}I_{KA1}$	0

Ударный коэффициент рассчитывается по формуле

$$K_y = 1 + e^{-0,01/T_3}, \quad (4.14)$$

где $T_3 = (X_{1\Sigma} + \Delta X^{(n)})/314(R_{1\Sigma} + \Delta R^{(n)})$ – эквивалентная постоянная времени, с; $\Delta X^{(n)}$, $\Delta R^{(n)}$ – дополнительные индуктивное и активное сопротивления, определяемые видом КЗ.

При учете АРВ генераторов расчет несимметричного режима аналогичен расчету симметричного с учетом сопротивлений $\Delta X^{(n)}$, $\Delta R^{(n)}$.

4.5. Расчет периодического тока короткого замыкания в произвольный момент времени

Типовые кривые могут быть использованы для определения тока прямой последовательности в произвольный момент процесса любого несимметричного КЗ. Расчет производится аналогично расчету

симметричного режима КЗ, но с учетом дополнительного сопротивления $\Delta X^{(n)}$. Для этого нужно предварительно найти реактивность схемы прямой последовательности, в которой точка КЗ должна быть отнесена на дополнительное сопротивление $\Delta X^{(n)}$. По расчетной схеме и по типовым кривым определяется ток прямой последовательности.

Полный ток в точке КЗ определяется как

$$I_{\text{кт}}^{(n)} = m^{(n)} I_{\text{к1т}}^{(n)}, \quad (4.15)$$

где $I_{\text{к1т}}^{(n)}$ – ток прямой последовательности для момента времени t .

Аналитические расчеты тока КЗ от синхронной машины в произвольный момент времени при несимметричном КЗ рекомендуется выполнять с использованием метода типовых кривых. При этом расчеты целесообразно вести в следующем порядке:

1) по исходной расчетной схеме составить эквивалентные схемы замещения прямой, обратной и нулевой (при однофазном и двухфазном КЗ на землю) последовательностей, выразив все параметры в относительных единицах при предварительно выбранных базисных условиях, причем в схеме замещения прямой последовательности синхронную машину следует учесть сверхпереходной ЭДС (предварительно найденной из предшествующего режима) и сверхпереходным сопротивлением;

2) с помощью преобразований привести схемы к простейшему виду и определить $\Delta X^{(n)}$;

3) определить начальное действующее значение тока прямой последовательности

$$I_{1\text{п0}(\text{б})}^* = \frac{E''_{0(\text{б})}^*}{X_{1\Sigma(\text{б})}^* + \Delta X_{(\text{б})}^{(n)*}}; \quad (4.16)$$

4) определить значение величины $I_{*1\text{п0}(\text{ном})}$ характеризующей электрическую удаленность расчетной точки КЗ от синхронной машины

$$I_{1\text{п0}(\text{ном})}^* = I_{1\text{п0}(\text{б})}^* \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{ном}}}; \quad (4.17)$$

5) в соответствии с типом генератора, его системы возбуждения и найденным значением $I_{1\text{п0}(\text{ном})}^*$ выбрать необходимую типовую кривую и для заданного момента времени определить коэффициент γ_t ;

б) определить искомое значение периодической составляющей тока КЗ от синхронной машины в заданный момент времени

$$I_{пт} = m^{(n)} \Gamma_t I_{1п0(б)} * I_{б}, \quad (4.18)$$

где $m^{(n)}$ – коэффициент, зависящий от вида КЗ (см. табл. 4.2).

Таблица 4.2

**Значения коэффициента $m^{(n)}$ для несимметричных КЗ
разных видов**

Вид КЗ	Значение коэффициента $m^{(n)}$
Двухфазное	$\sqrt{3}$
Однофазное	3
Двухфазное КЗ на землю	$\sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{X_{2\Sigma} X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}}$

Порядок расчета несимметричных токов КЗ:

- 1) составляют схемы замещения отдельных последовательностей;
- 2) находят результирующие сопротивления отдельных последовательностей относительно точки КЗ и результирующую ЭДС прямой последовательности относительно той же точки;
- 3) в соответствии с комплексной схемой замещения для конкретного вида КЗ определяют ток прямой последовательности;
- 4) по основным кривым находят для интересующего момента времени искомый ток в месте КЗ;
- 5) определяют значения полных токов и напряжений фаз в месте КЗ, в ветвях и узлах схемы для интересующего момента времени, учитывая при этом группы соединения обмоток силовых трансформаторов.

Контрольные вопросы

1. Как определяются параметры элементов системы для токов прямой последовательности?
2. Как определяются параметры элементов системы для токов обратной последовательности?
3. Как определяются параметры элементов системы для токов нулевой последовательности?

4. Какой метод применяется при расчете токов при несимметричных коротких замыканиях?
5. Как изменяются токи и напряжения при переходе через трансформатор со стороны «звезды» на сторону «треугольника»?
6. В каких случаях невозможна трансформация токов нулевой последовательности при переходе через трансформатор со схемой соединения обмоток «звезда с нулем – треугольник» ?
7. Каковы основные уравнения второго закона Кирхгофа для каждой последовательности?
8. В каких случаях целесообразно использовать комплексные схемы замещения?
9. Как составляется комплексная схема замещения при однофазном КЗ?
10. Как составляется комплексная схема замещения при двухфазном КЗ?
11. Как составляется комплексная схема замещения при двухфазном КЗ на землю?
12. Из каких условий получают дополнительные уравнения для определения токов при несимметричных КЗ?
13. Как можно выразить ток прямой последовательности любого несимметричного КЗ?
14. В чем смысл правила эквивалентности прямой последовательности?
15. Каков порядок определения начального периодического тока прямой последовательности в месте однофазного, двухфазного КЗ?
16. Могут ли типовые кривые использоваться при определении тока прямой последовательности в произвольный момент времени?
17. В каком порядке целесообразно вести расчеты тока КЗ от синхронной машины в произвольный момент времени при несимметричном КЗ?
18. Каков порядок расчета несимметричных токов короткого замыкания?

Задача для самопроверки

Задача 4.1

Блок, состоящий из двух генераторов Г1 и Г2, трансформатора с расщепленной обмоткой Т, связан линией Л с узлом системы С (рис. 34.1). Напряжение в узле системы постоянно $U_c = 220$ кВ. В точке К произошло двухфазное короткое замыкание. Требуется рассчитать начальный ток двухфазного КЗ на землю.

Исходные данные:

Генераторы Г1 и Г2: $S_{\text{НОМ}} = 75 \text{ МВ}\cdot\text{А}$, $U_{\text{НОМ}} = 10,5 \text{ кВ}$,
 $X_d'' = 0,15$, $X_{2Г} = 0,12$, имеется АРВ, $\cos\varphi = 0,85$, $T_{f0} = 6 \text{ с}$, $I_{\text{НОМ}} = 4,13 \text{ кА}$.

Трансформатор с расщепленной обмоткой Т: $S_{\text{НОМ}} = 160 \text{ МВ}\cdot\text{А}$,
 $U_{\text{ВН}} = 230 \text{ кВ}$, $U_{\text{НН}} = 11 \text{ кВ}$, напряжение КЗ $U_{\text{К}} = 12 \%$; коэффициент связи
 $K_p = 3,5$.

Линия Л: длина $l = 150 \text{ км}$, сопротивление удельное $X_0 = 0,4 \text{ Ом/км}$.

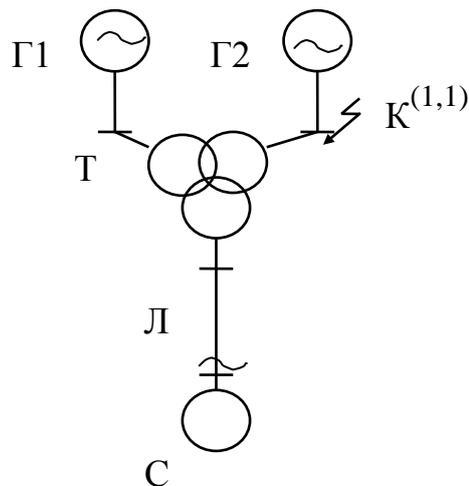


Рис. 34.1. Исследуемая система к задаче 4.1

5. РАСЧЕТ ТОКОВ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1 КВ

5.1. Составление схемы замещения

Расчет токов несимметричных КЗ следует выполнять с использованием метода симметричных составляющих. При этом предварительно следует составить схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей.

В схему замещения прямой последовательности должны быть введены все элементы исходной расчетной схемы, причем при расчете начального значения периодической составляющей тока несимметричного КЗ автономные источники, синхронные и асинхронные электродвигатели, а также комплексная нагрузка должны быть учтены сверхпереходными ЭДС и сверхпереходными сопротивлениями.

Схема замещения обратной последовательности также должна включать все элементы исходной расчетной схемы. Сопротивления

обратной последовательности следует принимать по данным каталогов, а асинхронных машин – принимать равными сверхпереходным сопротивлениям.

Активные и индуктивные сопротивления нулевой последовательности понижающих трансформаторов, обмотки которых соединены по схеме Δ/Y_0 , при расчете КЗ в сети низшего напряжения следует принимать равными соответственно активным и индуктивным сопротивлениям прямой последовательности. При других схемах соединения обмоток трансформаторов активные и индуктивные сопротивления нулевой последовательности необходимо принимать в соответствии с указаниями изготовителей.

5.2. Расчет начального тока несимметричного короткого замыкания

Если электроснабжение электроустановки напряжением до 1 кВ осуществляется от энергосистемы через понижающий трансформатор, то начальное значение периодической составляющей тока однофазного КЗ от системы, кА, следует рассчитывать по формуле

$$I_{п0}^{(1)} = \frac{\sqrt{3}U_{ср\ нн}}{\sqrt{(2R_{1\Sigma} + R_{0\Sigma})^2 + (2X_{1\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}}, \quad (5.1)$$

где $R_{1\Sigma}$ и $X_{1\Sigma}$ – соответственно суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивления прямой последовательности расчетной схемы относительно точки КЗ, мОм; $R_{0\Sigma}$ и $X_{0\Sigma}$ – соответственно суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивления нулевой последовательности расчетной схемы относительно точки КЗ, мОм. Эти сопротивления равны:

$$\left. \begin{aligned} R_{0\Sigma} &= R_{0т} + R_p + R_{тт} + R_{кв} + R_k + R_{0ш} + R_{0кб} + R_{0вл} + R_d; \\ X_{0\Sigma} &= X_{0т} + X_p + X_{тт} + X_{кв} + X_{0ш} + X_{0кб} + X_{0вл}, \end{aligned} \right\} \quad (5.2)$$

где $R_{0т}$ и $X_{0т}$ – активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности понижающего трансформатора.

Для трансформаторов, обмотки которых соединены по схеме Δ/Y_0 , при расчете КЗ в сети низшего напряжения эти сопротивления следует

принимать равными соответственно активным и индуктивным сопротивлениям прямой последовательности.

При других схемах соединения обмоток трансформаторов активные и индуктивные сопротивления нулевой последовательности необходимо принимать в соответствии с указаниями изготовителей; $R_{0ш}$ и $X_{0ш}$ – активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности шинпровода; $R_{0кб}$ и $X_{0кб}$ – активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности кабеля; $R_{0вл}$ и $X_{0вл}$ – активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности воздушной линии: $R_{0вл} = R_1 + 3R_3 = R_1 + 0,15 \text{ мОм/м}$; $X_{0вл} \approx 3X_{1вл}$.

В электроустановках с автономными источниками энергии начальное значение периодической составляющей тока однофазного КЗ в килоамперах следует определять по формуле

$$I_{п0}^{(1)} = \frac{3E_{\phi}''}{\sqrt{(2R_{1\Sigma} + R_{0\Sigma})^2 + (2X_{1\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}}, \quad (5.3)$$

где E_{ϕ}'' – эквивалентная сверхпереходная ЭДС автономных источников (фазная), В.

Начальное значение периодической составляющей тока однофазного КЗ с учетом синхронных и асинхронных электродвигателей в килоамперах следует рассчитывать по формуле (5.3).

Комплексная нагрузка учитывается параметрами, приведенными в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Параметры элементов комплексной нагрузки

Потребители комплексной нагрузки	Значение эквивалентной ЭДС	$\cos\phi$	Сопротивление, о. е.	
			прямой последовательности	обратной последовательности
1	2	3	4	5
Синхронные двигатели напряжением свыше 1 кВ	1,074	0,9	$0,04 + j0,15$	$0,04 + j0,15$
Синхронные двигатели напряжением до 1 кВ	1,079	0,9	$0,03 + j0,16$	$0,03 + j0,16$

1	2	3	4	5
Асинхронные двигатели напряжением свыше 1 кВ	0,93	0,87	$0,01 + j0,17$	$0,01 + j0,17$
Асинхронные двигатели напряжением до 1 кВ	0,9	0,8	$0,07 + j0,18$	$0,07 + j0,18$
Лампы накаливания	0	1,0	1,0	1,33
Газоразрядные источники света	0	0,85	$0,85 + j0,53$	$0,382 + j0,24$
Преобразователи	0	0,9	$0,9 + j0,45$	$1,66 + j0,81$
Электротермические установки	0	0,9	$1 + j0,49$	$0,4 + j0,2$

При электроснабжении электроустановок напряжением до 1 кВ от энергосистемы через понижающий трансформатор начальное значение периодической составляющей тока двухфазного КЗ ($I_{п0}^{(2)}$) в килоамперах следует определять по формуле

$$I_{п0}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}E''_{\phi}}{2\sqrt{R_{1\Sigma}^2 + X_{1\Sigma}^2}}, \quad (5.4)$$

где $R_{1\Sigma} = R_T + R_p + R_{ТТ} + R_{КВ} + R_{Ш} + R_K + R_{1КБ} + R_{1ВЛ} + R_D / 2$;

$X_{1\Sigma} = X_C + X_T + X_p + X_{ТТ} + X_{КВ} + X_{Ш} + X_{1КБ} + X_{1ВЛ}$

В электроустановках с автономными источниками энергии начальное значение периодической составляющей тока двухфазного КЗ следует рассчитывать по формуле

$$I_{п0}^{(2)} = \frac{U_{ср нн}}{2\sqrt{R_{1\Sigma}^2 + X_{1\Sigma}^2}}, \quad (5.5)$$

Начальное значение периодической составляющей тока двухфазного КЗ с учетом асинхронных электродвигателей ($I_{п0 АД}^{(2)}$) в килоамперах следует определять по формуле

$$I_{п0 АД}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}E''_{\phi\Sigma}}{2\sqrt{R_{1\Sigma}^2 + X_{1\Sigma}^2}}, \quad (5.6)$$

где $E''_{\phi\Sigma}$ – эквивалентная сверхпереходная ЭДС (фазное значение) асинхронных электродвигателей и источника электроэнергии, В; $R_{1\Sigma}$ и $X_{1\Sigma}$ – соответственно суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивления прямой последовательности относительно точки КЗ (с учетом параметров асинхронных электродвигателей), мОм.

Начальное действующее значение периодической составляющей тока двухфазного КЗ с учетом синхронных электродвигателей в кА определяют аналогично.

5.3. Расчет аperiodической составляющей тока короткого замыкания

Наибольшее начальное значение аperiodической составляющей тока КЗ в общем случае следует считать равным амплитуде периодической составляющей тока в начальный момент КЗ:

$$i_{a0} = \sqrt{2}I_{п0}. \quad (5.7)$$

В радиальных сетях аperiodическую составляющую тока КЗ в произвольный момент времени следует определять по формуле

$$i_{at} = i_{a0}e^{-t/T_a}, \quad (5.8)$$

где t – время, с; T_a – постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ, с, равная

$$T_a = \frac{X_{\Sigma}}{\omega_c R_{\Sigma}}, \quad (5.9)$$

где X_{Σ} и R_{Σ} – результирующие индуктивное и активное сопротивления цепи КЗ, мОм; ω_c – синхронная угловая частота напряжения сети, рад/с.

Если точка КЗ делит расчетную схему на радиальные, независимые друг от друга ветви, то аperiodическую составляющую тока КЗ в произвольный момент времени следует определять как сумму аperiodических составляющих токов отдельных ветвей.

5.4. Расчет ударного тока короткого замыкания

Ударный ток трехфазного КЗ в электроустановках с одним источником энергии (энергосистема или автономный источник) рассчитывают по формуле

$$i_y = \sqrt{2}I_{п0} \left(1 + e^{\frac{-t_y}{T_a}}\right) = \sqrt{2}I_{п0}K_y, \quad (5.10)$$

где $K_y = 1 + e^{\frac{-t_y}{T_a}}$ – ударный коэффициент, который может быть определен по кривым; T_a – постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ; t_y – время от начала КЗ до появления ударного тока, с, равное

$$t_y = 0,001 \frac{\frac{\pi}{2} + \psi_K}{\pi};$$

$$\psi_K = \arctg X_{1\Sigma} / R_{1\Sigma}.$$

При необходимости учета синхронных и асинхронных электродвигателей или комплексной нагрузки ударный ток КЗ следует определять как сумму ударных токов от автономных источников и электродвигателей или комплексной нагрузки.

Если точка КЗ делит расчетную схему на радиальные, независимые друг от друга ветви, то ударный ток КЗ допустимо определять как сумму ударных токов отдельных ветвей по формуле

$$i_y = \sum_{i=1}^m \sqrt{2}I_{п0i} \left(1 + e^{\frac{-t_y}{T_{ai}}}\right), \quad (5.11)$$

где m – число независимых ветвей схемы; $I_{п0i}$ – начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ в i -й ветви, кА; t_{yi} – время появления ударного тока в i -й ветви, с; T_{ai} – постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ в i -й ветви, с.

5.5. Расчет периодической составляющей тока короткого замыкания для произвольного момента времени

Методика расчета периодической составляющей тока трехфазного КЗ для произвольного момента времени в электроустановках до 1 кВ зависит от способа электроснабжения – от энергосистемы или автономного источника.

При электроснабжении электроустановки от энергосистемы через понижающий трансформатор действующее значение периодической составляющей тока трехфазного КЗ в произвольный момент времени в килоамперах без учета подпитки от электродвигателей следует определять по формуле

$$I_{\text{Пт}} = \frac{U_{\text{ср нн}}}{\sqrt{3} \sqrt{X_{1\Sigma}^2 + (R_{1\Sigma} + R_{\text{дт}} + R_{\text{кб}9t})^2}}, \quad (5.12)$$

где $U_{\text{ср нн}}$ – среднее номинальное напряжение сети, в которой произошло КЗ, В; $X_{1\Sigma}$, $R_{1\Sigma}$ – соответственно суммарное индуктивное и суммарное активное сопротивления прямой последовательности цепи КЗ, мОм, без учета активного сопротивления электрической дуги и кабельной (воздушной) линии; $R_{\text{дт}}$ – активное сопротивление дуги в месте КЗ в произвольный момент времени, мОм; $R_{\text{кб}9t}$ – активное сопротивление прямой последовательности кабельной линии к моменту t с учетом нагрева его током КЗ, мОм.

Если электроснабжение электроустановки осуществляется от энергосистемы через понижающий трансформатор и вблизи места КЗ имеются синхронные и асинхронные электродвигатели или комплексная нагрузка, связанные с точкой КЗ по радиальной схеме, то действующее значение периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени следует определять как сумму токов от энергосистемы и от электродвигателей или комплексной нагрузки.

В приближенных расчетах для определения действующего значения периодической составляющей тока КЗ при радиальной схеме следует применять типовые кривые.

Типовые кривые разработаны на базе параметров схемы замещения эквивалентного генератора, полученных в результате эквивалентирования синхронных генераторов напряжением 230/400 В различных серий, приведены в [2].

Действующее значение периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени от синхронного генератора (или нескольких однотипных синхронных генераторов, находящихся в одинаковых условиях по отношению к точке КЗ) следует определять по формуле

$$I_{пт} = \Gamma_t I_{*} I_{п0(ном)} I_{ном}. \quad (5.13)$$

При нескольких генераторах под номинальным током следует понимать сумму номинальных токов всех генераторов.

При необходимости учета синхронных и асинхронных электродвигателей или комплексной нагрузки в автономной электрической системе действующее значение периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени при радиальной схеме следует определять как сумму токов от автономных источников и электродвигателей или комплексной нагрузки.

Контрольные вопросы

1. С использованием какого метода следует определять токи несимметричных КЗ?
2. Какие элементы должны быть введены в схему замещения прямой и обратной последовательностей?
3. Какие элементы должны быть введены в схему замещения нулевой последовательности?
4. По какой формуле следует рассчитывать значение периодической составляющей тока однофазного, двухфазного КЗ?
5. По какой формуле следует рассчитывать значение периодической составляющей тока двухфазного КЗ в схеме с автономными источниками энергии?
6. Каков расчет начального значения аperiodической составляющей тока несимметричного КЗ ?
7. Как выразить ударный ток несимметричного КЗ?
8. Как составляется комплексная схема замещения при однофазном, двухфазном на землю КЗ?
9. Как учесть влияние комплексной нагрузки на величину тока несимметричного КЗ?

Задача для самопроверки

Задача 5.1

На шинах низкого напряжения цехового трансформатора произошло двухфазное КЗ. Мощность КЗ на шинах 10 кВ составляет $S_K = 300 \text{ МВ}\cdot\text{А}$; $U_{\text{ср вн}} = 10 \text{ кВ}$. Для схемы, приведенной на рисунке 35.1 определить токи при двухфазном КЗ в точке К.

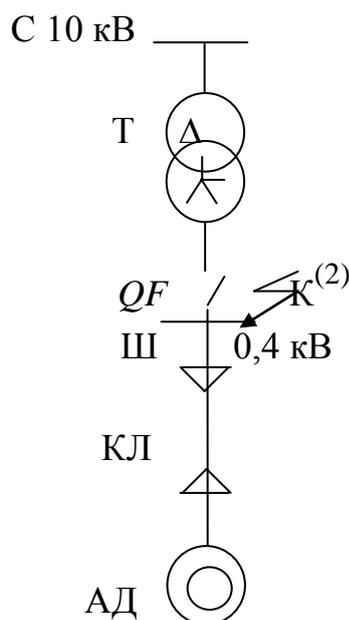


Рис. 35.1. Исследуемая система

Трансформатор Т: тип ТМ-1000 Т: мощность $S_{\text{ном}} = 1000 \text{ кВ}\cdot\text{А}$; потери х.х. $\Delta P_{\text{хх}} = 2,3 \text{ кВт}$; потери КЗ $\Delta P_K = 12,2 \text{ кВт}$; напряжение КЗ $U_K = 5,5 \%$, $U_{\text{вн}} = 10 \text{ кВ}$, $U_{\text{нн}} = 0,4 \text{ кВ}$.

Автоматический выключатель QF: серия ВА-51: $I_{\text{ном}} = 1600 \text{ А}$, $R_{\text{ав}} = 0,14 \text{ мОм}$; $X_{\text{ав}} = 0,08 \text{ мОм}$.

Кабельная линия КЛ: Марка ААШв-3×185. Сопротивления: $R_{\text{окб}} = 0,208 \text{ мОм/м}$; $X_{\text{окб}} = 0,055 \text{ Ом/м}$; длина $l = 150 \text{ м}$.

Шинопровод Ш: тип ШМА-4-1600Ш: сопротивления $R_{\text{ш}} = 0,030 \text{ мОм/м}$; $X_{\text{ш}} = 0,014 \text{ мОм/м}$; $R_{\text{нп}} = 0,037 \text{ мОм/м}$; $X_{\text{нп}} = 0,042 \text{ мОм/м}$; длина $l_{\text{ш}} = 10 \text{ м}$.

Болтовые контактные соединения: сопротивления $R_K = 0,003 \text{ мОм}$; количество $n = 4$.

Асинхронный двигатель АД: тип А03-315М-6У3: мощность активная $P_{\text{ном}} = 132 \text{ кВт}$, пусковой ток $I_{\text{пуск}}/I_{\text{ном}} = 7,0$; номинальное напряжение

$U_{\text{НОМ}} = 380$ В, номинальный ток $I_{\text{НОМ}} = 238,6$ А, максимальный момент $M_{\text{max}}/M_{\text{НОМ}} = b_{\text{НОМ}} = 2,6$; пусковой момент $M_{\text{пуск}}/M_{\text{НОМ}} = 1,6$; минимальный момент $M_{\text{min}}/M_{\text{НОМ}} = 0,8$; $\cos\varphi_{\text{НОМ}} = 0,9$; обороты $n_c = 1000$ об/мин; КПД $\eta = 93,5$ %; скольжение номинальное $s_{\text{НОМ}} = 1,7$ %.

6. ПРОСТОЕ ЗАМЫКАНИЕ НА ЗЕМЛЮ (ЗАМЫКАНИЕ В СХЕМЕ БЕЗ ГЛУХОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ)

Замыкание фазы на землю в сети с изолированной нейтралью принято называть простым замыканием.

Электроснабжение потребителей, как правило, осуществляется через распределительную сеть (посредством) класса напряжений 6–35 кВ с изолированной нейтралью.

Некоторые особенности распределительных сетей:

- На долю распределительных сетей приходится до 80 % повреждений.

- Сети значительно удалены от источника питания, переходные процессы в них, как правило, не влияют на его напряжение (расчет можно вести как для случая питания сети от ШБМ).

- Сети имеют невысокое сечение и относительно большое активное сопротивление, которое в ряде случаев необходимо учитывать. Большое активное сопротивление приводит к значительному нагреву проводов, что приводит к дальнейшему их росту. Это явление может вызвать так называемый «спад» тока КЗ.

- В распределительных сетях применяются батареи статических конденсаторов. Тем не менее, их разряд имеет характер высокочастотных колебаний, затухающих уже через полпериода. По этой причине влиянием батарей на ток замыкания пренебрегают.

- При замыкании фазы ток определяется емкостной проводимостью сети. Этот ток значительно меньше тока однофазного замыкания в сетях с заземленными нейтралью. По этой причине сети с изолированной нейтралью могут длительное время работать при замыкании фазы, за которое персонал способен создать временные схемы электроснабжения потребителей без их отключения.

Рассмотрим простейшую трехфазную сеть, в которой произошло простое замыкание фазы А (рис. 6.1). Распределенные вдоль линии емкости каждой фазы относительно земли представлены для простоты

сосредоточенными C_A , C_B , C_C . Межфазные емкости не оказывают ощутимого влияния на режим КЗ и на рис. 6.1 не отражены.

Токи замыкания протекают от точки аварии и возвращаются через емкостные проводимости сети (рис. 6.1).

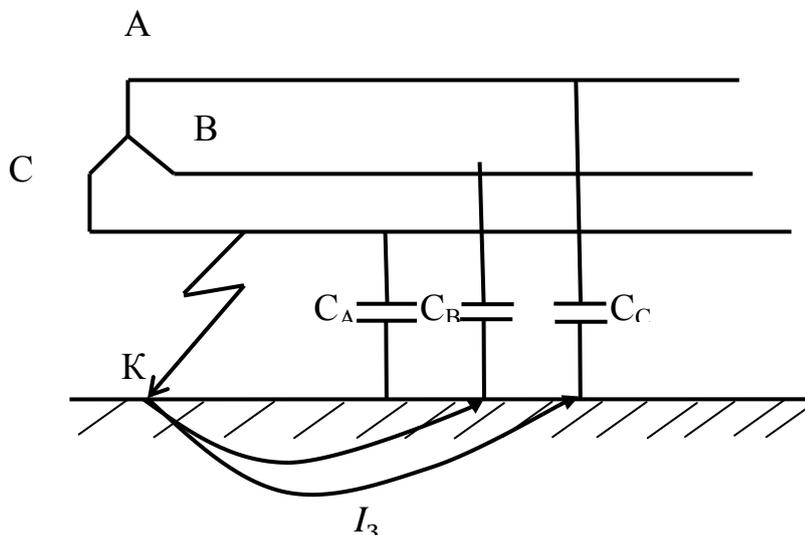


Рис. 6.1. Принципиальная схема

Для получения расчетных выражений обратимся к простейшей схеме (рис. 6.2, а) и комплексной схеме замещения (рис. 6.2, б). Здесь помимо емкостных сопротивлений ВЛ символически введены индуктивные сопротивления линии и трансформатора всех последовательностей, хотя они незначительны и принимаются равными нулю. Это означает, что величину тока замыкания можно считать независимой от места замыкания, а напряжение источника неизменным по амплитуде. При таких допущениях токи нулевой, прямой и обратной последовательностей в месте металлического замыкания на землю равны.

Емкостные сопротивления сети значительно превышают индуктивные, что позволяет пренебречь последними. Поскольку в схемах прямой и обратной последовательностей емкостные сопротивления ВЛ X_{c1} , X_{c2} зашунтированы малыми сопротивлениями трансформатора X_{T1} , X_{T2} , то это позволяет принять $X_{1\Sigma} = X_{2\Sigma} = 0$. Считая реактор P в нейтрали трансформатора отсутствующим (показан пунктиром), имеем: $X_{0\Sigma} = -X_{c0\Sigma}$.

В итоге выражения для расчета токов в неповрежденных фазах можно записать так:

$$\begin{aligned} I_B &= (U_B - U_A)j\omega C_B = jU_A(a^2 - 1)j\omega C_B = \\ &= U_A(1 - a^2)\omega C_B = U_A\omega C_B e^{j30^\circ}, \end{aligned} \quad (6.1)$$

$$\begin{aligned}
 I_C &= (U_C - U_A)j\omega C_C = jU_A(a-1)j\omega C_C = \\
 &= U_A(1-a)\omega C_C = U_A\omega C_C e^{-j30^\circ}.
 \end{aligned}
 \tag{6.2}$$

Так как $C_A = C_B = C_C = C$ и $U_A = U_B = U_C = U_\phi$, то получим:

$$I_B = I_C = \sqrt{3}U_\phi\omega C, \tag{6.3}$$

где U_ϕ – среднее фазное напряжение ступени КЗ.

Ток в земле определяется геометрической суммой токов двух фаз В и С:

$$I_3 = - (I_B + I_C) = - (jU_{\phi B}\omega C + jU_{\phi C}\omega C) = 3jU_{\phi A}\omega C = \frac{3U_\phi}{-jX_{c0Y}} \tag{6.4}$$

или

$$I_3 = 3I_{k0} = 3j \frac{U_\phi}{X_{c0\Sigma}},$$

где $X_{c0\Sigma}$ – результирующее емкостное сопротивление нулевой последовательности воздушных и кабельных линий, электрически связанных с точкой замыкания.

Емкостное сопротивление нулевой последовательности трехжильных кабелей с круглыми жилами на 1 км длины можно найти по приближенной формуле, Ом·км[6]:

$$X_{c0} = \frac{96,5}{1,85 + \frac{2R}{B+b}} 10^3,$$

где R – радиус жилы; B и b – толщины соответственно фазной и поясной изоляции (величины R , B и b должны быть выражены в одних единицах измерения).

Емкостное сопротивление нулевой последовательности воздушной линии электропередачи на 1 км длины можно найти по выражению, Ом·км[6]:

$$X_{c0} = 3,961g \frac{S_{cp}}{\sqrt[3]{\rho D_{cp}^2}} 10^5,$$

где $S_{cp} = 2(h_A + h_B + h_C)/3$ – среднее расстояние от провода фаз А, В и С до их зеркальных отражений относительно поверхности земли (h_A , h_B , h_C –

высота подвески проводов фаз с учетом провеса); ρ – радиус провода, $D_{\text{ср}}$ – среднегеометрическое расстояние между проводами фаз А, В и С.

Для грубой оценки порядка величины тока замыкания на землю при отсутствии данных о кабелях сети и конструкции воздушных линий, по известной длине электрически связанных кабельных $l_{\text{к}}$ (км) и воздушных $l_{\text{в}}$ (км) можно воспользоваться выражением :

$$I_{\text{к}} = U_{\text{л}} \left(\frac{l_{\text{к}}}{10} + \frac{l_{\text{в}}}{350} \right),$$

где $U_{\text{л}}$ – среднее значение линейного напряжения ступени трансформации, на которой произошло замыкание на землю, кВ.

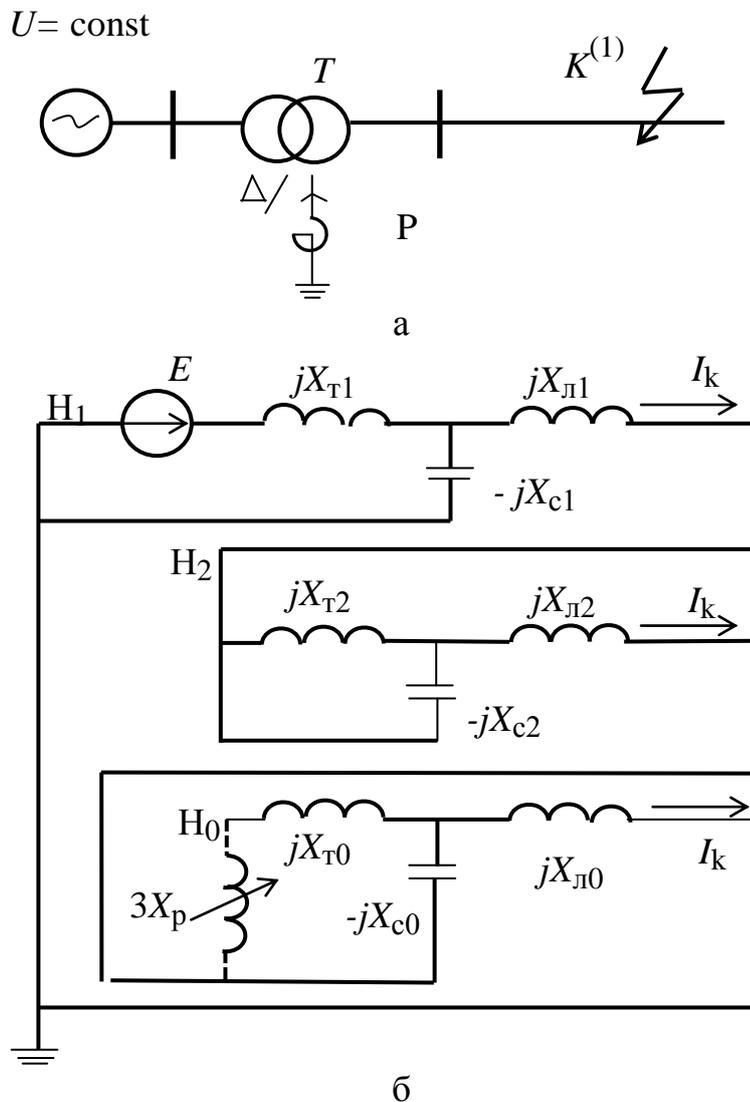


Рис. 6.2. Простое замыкание на землю: а – принципиальная схема; б – комплексная схема замещения

Как следует из формулы (6.4), ток простого замыкания равен утроенной величине емкостного тока одной фазы в нормальных условиях. По этой причине распределительные сети 6–35 кВ называются сетями с малыми токами замыкания.

В практических расчетах ток замыкания, A , можно определить по формуле:

$$I_3 = \frac{\sqrt{3}U_{\text{ср ном}}}{N} L, \quad (6.5)$$

где N – коэффициент, принимаемый для ВЛ 350, для КЛ 10; где $U_{\text{ср ном}}$ – среднее номинальное напряжение ступени КЗ, кВ; L – суммарная длина ВЛ и КЛ, электрически связанных с точкой КЗ.

Для симметричных составляющих напряжений в соответствии с принятыми допущениями имеем:

$$\begin{aligned} U_{\text{кА1}} &= E_{\Sigma} - jI_{\text{кА1}}X_{1\Sigma} = U_{\phi}; \\ U_{\text{кА2}} &= 0 - jI_{\text{кА2}}X_{2\Sigma} \approx 0; \end{aligned} \quad (6.6)$$

$$U_{\text{кА0}} = 0 - jI_{\text{кА0}}X_{0\Sigma} = \frac{jX_{\text{с0}\Sigma}}{-jX_{\text{с0}\Sigma}} U_{\phi} = -U_{\phi}.$$

Опыт эксплуатации показывает, что при замыканиях на землю через дугу и малых значениях I_3 дуга гаснет практически без повторных зажиганий и сопровождающих их всплесков перенапряжений. С увеличением тока I_3 наблюдаются неоднократные повторные зажигания дуги и перенапряжения, что уменьшает вероятность погасания дуги и увеличивает вероятность перехода однофазного замыкания на землю в междуфазное КЗ. Поэтому в сетях с изолированной нейтралью при определенных значениях I_3 должна выполняться компенсация емкостных токов замыкания на землю путем включения в нейтраль индуктивного сопротивления X_L (дугогасящего реактора ДГР). Значения емкостных токов в нормальных режимах сети, при которых необходимо проводить компенсацию, составляют: в сетях напряжением 3–20 кВ, имеющих железобетонные и металлические опоры на воздушных линиях электропередачи, и во всех сетях 35 кВ – более 10 А; в сетях, не имеющих железобетонные и металлические опоры на воздушных линиях электропередачи: при напряжении 3–6 кВ – более 30 А; при напряжении 10 кВ – более 20 А; при напряжении 15–20 кВ – более 15 А; в схемах напряжением 6–20 кВ блоков генератор – трансформатор – более 5 А.

Контрольные вопросы

1. Оказывают ли влияние межфазные емкости на режим КЗ в сетях с изолированной нейтралью?
2. Каковы особенности распределительных сетей?
3. Каков путь протекания тока КЗ в сетях с изолированной нейтралью?
4. Какими выражениями будут определяться токи в здоровых фазах при простом замыкании?
5. Как определить ток замыкания в практических расчетах?
6. Каковы основные выражения для симметричных составляющих напряжений?
7. Как составляется комплексная схема замещения при простом замыкании?
8. В случае заземления одной фазы какого значения достигают напряжения в других фазах?
9. Каковы недостатки сети, работающей с изолированной нейтралью при замыкании одной фазы?

Задача для самопроверки

Задача 6.1

Определить ток при простом металлическом замыкании на землю в сети напряжением 37 кВ, выполненной воздушной линией протяженностью 200 км.

Исходные данные: воздушная линия марки АС-95; расположение проводов по вершинам треугольника с расстоянием между фазами А и В $d_{AB} = 4.06$ м, А и С $d_{AC} = 3.5$ м, В и С $d_{BC} = 3.09$ м.

Высота подвеса провода фаз А и С $h_A = h_C = 8$ м, фазы В $h_B = 11$ м.

7. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Пример 7.1.

На рис. 7.1 показана электрическая система, состоящая из источника бесконечной мощности С напряжением $U_c = 230$ кВ, автотрансформатора АТ, генератора Г, двух одинаковых трансформаторов Т1, Т2, линии Л и двух одинаковых асинхронных электродвигателей АД1 и АД2. На шинах генератора произошло трехфазное КЗ.

Требуется определить величину начального периодического тока в точке КЗ, ударного тока и аperiodического тока КЗ. Начертить осциллограмму тока КЗ за период от $t = 0$ до $t = 0,07$ с.

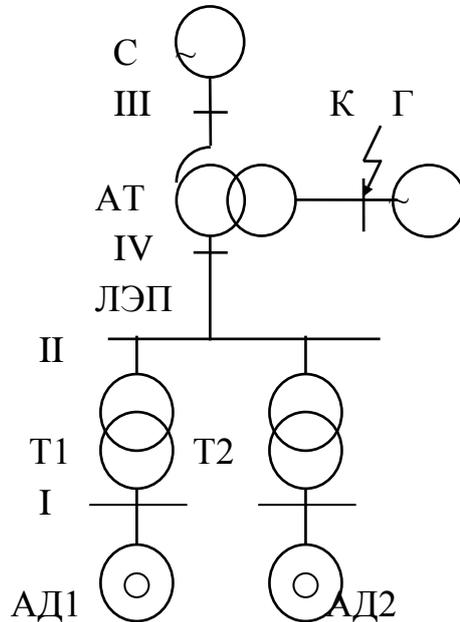


Рис. 7.1. Исследуемая система к примеру 7.1

Исходные данные:

Автотрансформатор АТ: полная мощность $S_{\text{ном}} = 180 \text{ МВ}\cdot\text{А}$, напряжение обмотки ВН $U_{\text{ВН}} = 242 \text{ кВ}$, напряжение обмотки СН $U_{\text{СН}} = 121 \text{ кВ}$, напряжение обмотки НН $U_{\text{НН}} = 13,8 \text{ кВ}$; напряжение КЗ между обмотками ВС $U_{\text{ВС}} = 18 \%$, напряжение КЗ между обмотками ВН $U_{\text{ВН}} = 25 \%$, напряжение КЗ между обмотками СН $U_{\text{СН}} = 7 \%$; $\frac{X_{\text{T}}}{R_{\text{T}}} = 33$.

Генератор Г: $S_{\text{ном}} = 100 \text{ МВ}\cdot\text{А}$, $U_{\text{ном}} = 13,8 \text{ кВ}$, $X_{d(n)}'' = 0,25$; $T_{\text{a}} = 0,2 \text{ с}$, коэффициент загрузки $K = P_0/P_{\text{ном}} = 1$.

Трансформаторы Т1, Т2: $S_{\text{ном}} = 10 \text{ МВ}\cdot\text{А}$, $U_{\text{ВН}} = 110 \text{ кВ}$, $U_{\text{НН}} = 6,6 \text{ кВ}$, $U_{\text{к}} = 10,5 \%$; $X/R = 11$.

Линия Л: $l = 75 \text{ км}$, $X_0 = 0,4 \text{ Ом/км}$, $R_0 = 0,33 \text{ Ом/км}$.

Асинхронные электродвигатели АД1 и АД2: $P_{\text{ном}} = 5000 \text{ кВт}$, $U_{\text{ном дв}} = 6 \text{ кВ}$, $\cos\varphi = 0,91$, $\eta = 96,2 \%$, кратность пускового тока $I_{\text{п}} = 5,6$.

Нагрузка двигателя составляет 3650 кВт при $\cos\varphi = 0,85$ и номинальном напряжении.

Решение.

На рис. 7.2 приведена схема замещения исследуемой сети. Расчеты проводим в системе относительных единиц при точном приведении. Примем за базисную мощность $S_{\bar{6}} = 1000$ МВ·А и базисное напряжение на I ступени (шины двигателя АД1) $U_{\bar{6}I} = 6$ кВ. Базисные напряжения на остальных ступенях: $U_{\bar{6}II} = U_{\bar{6}I}K_{T1} = 6 \frac{110}{6,6} = 100$ кВ;

$$U_{\bar{6}III} = U_{\bar{6}II}K_{\text{атв-с}} = 100 \frac{242}{121} = 200 \text{ кВ}; \quad U_{\bar{6}IV} = U_{\bar{6}III}K_{\text{атв-н}} = 200 \frac{13,8}{242} = 11,4 \text{ кВ}.$$

Напряжения короткого замыкания обмоток АТ:

высокого напряжения: $U_B = 0,5(U_{\text{вс}} + U_{\text{вн}} - U_{\text{сн}}) = 0,5(18 + 25 - 7) = 18 \%$;

среднего напряжения: $U_C = 0,5(U_{\text{вс}} + U_{\text{сн}} - U_{\text{вн}}) = 0,5(18 + 7 - 25) = 0 \%$;

низкого напряжения: $U_H = 0,5(U_{\text{вн}} + U_{\text{сн}} - U_{\text{вс}}) = 0,5(25 + 7 - 18) = 7 \%$.

Сопротивления обмоток АТ индуктивное и активное соответственно:

– высокого напряжения:

$$X_B = \frac{U_B}{100} \frac{S_{\bar{6}}}{S_{\text{ном}}} \left(\frac{U_{\text{вн}}}{U_{\bar{6}III}} \right)^2 = \frac{18}{100} \frac{1000}{180} \left(\frac{242}{200} \right)^2 = 1,46;$$

$$R_B = \frac{X_B}{33} = \frac{1,46}{33} = 0,044, \text{ где } \frac{X_T}{R_T} = 33;$$

– среднего напряжения: $X_C = 0; R_C = 0;$

– низкого напряжения:

$$X_H = \frac{U_H}{100} \frac{S_{\bar{6}}}{S_{\text{ном}}} \left(\frac{U_{\text{нн}}}{U_{\bar{6}IV}} \right)^2 = \frac{7}{100} \frac{1000}{180} \left(\frac{13,8}{11,4} \right)^2 = 0,57;$$

$$R_T = \frac{X_T}{33} = \frac{0,57}{33} = 0,0173.$$

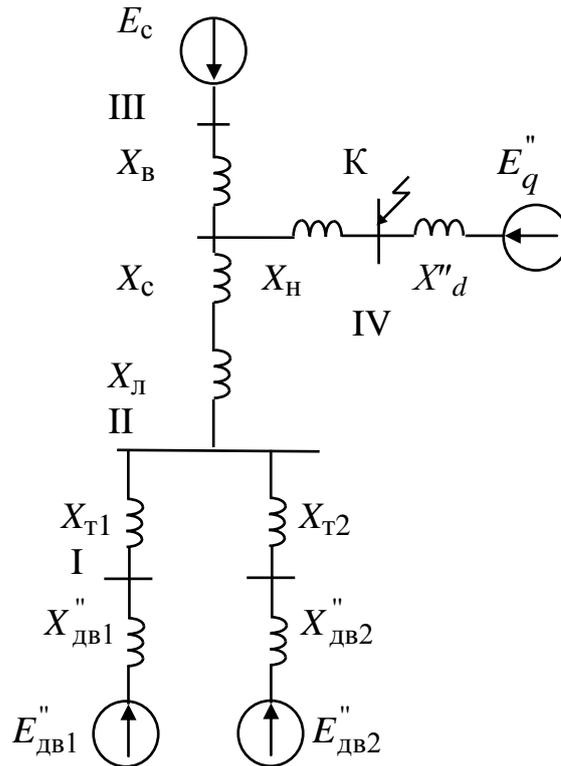


Рис. 7.2. Схема замещения исследуемой системы

Сопротивления трансформаторов Т1 и Т2:

$$X_{T1} = X_{T2} = \frac{U_k}{100} \frac{S_{\bar{6}}}{S_{\text{НОМ}}} \left(\frac{U_{\text{ВН}}}{U_{\bar{6}\text{II}}} \right)^2 = \frac{10,5}{100} \frac{1000}{10} \left(\frac{110}{100} \right)^2 = 12,7;$$

$$R_{T1} = \frac{X_{T1}}{11} = \frac{12,7}{11} = 1,15 = R_{T2}, \text{ где } \frac{X_T}{R_T} = 11.$$

Сопротивления генератора Г:

$$X_d'' = X_{dH}'' \frac{S_{\bar{6}}}{S_{\text{НОМ}}} \left(\frac{U_{\text{НН}}}{U_{\bar{6}\text{IV}}} \right)^2 = 0,25 \frac{1000}{100} \left(\frac{13,8}{11,4} \right)^2 = 3,66;$$

$$R_d'' = \frac{X_d''}{\omega T_a} = \frac{3,66}{0,2 \cdot 314} = 0,0585.$$

Сопротивления линии Л:

$$X_{Л} = XI \frac{S_{\bar{6}}}{U_{\bar{6}\Pi}^2} = 0,4 \cdot 75 \cdot \frac{1000}{100^2} = 3; R_{Л} = X_{Л} R_0 / X_0 = 3 \cdot 0,33 / 0,4 = 2,5.$$

Сопротивления двигателей АД1 и АД2:

$$X''_{дв1} = X''_{дв2} = \frac{1}{I_{\Pi}} \frac{S_{\bar{6}}}{S_{НОМ}} \left(\frac{U_{Н}}{U_{\bar{6}\Pi}} \right)^2 = \frac{1}{5,6} \frac{1000}{5,7} \left(\frac{6}{6} \right)^2 = 31,4,$$

где $S_{НОМ} = \frac{P_{НОМ}}{\cos \varphi \cdot 3} = \frac{5}{0,91 \cdot 0,962} = 5,7 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$

При расчете активного сопротивления асинхронного двигателя $R_{дв}$ находим значение ударного коэффициента, пользуясь зависимостью $K_y = \varphi(P_{НОМ})$ [1]. При номинальной мощности $P_{НОМ} = 5000 \text{ кВт}$ величина $K_y = 1,8$. Используя кривые зависимости ударного коэффициента K_y от отношения X/R [1], определяем отношение X/R . При $K_y = 1,8$ отношение $X/R = 14$. Тогда активное сопротивление двигателя для оценочных расчетов можно определить как

$$R_{д1} = X_{д1} / (X/R) = 31,4 / 14 = 2,24.$$

ЭДС системы: $E_c = \frac{U_c}{U_{\bar{6}\Pi}} = \frac{230}{200} = 1,15.$

ЭДС двигателей АД1 и АД2:

$$E''_{дв} = \sqrt{(U_{0дв} \cos \varphi_0)^2 + (U_{0дв} \sin \varphi_0 - I_{0дв} X''_{дв})^2}$$

$$= \sqrt{(1 \cdot 0,85)^2 + (1 \cdot 0,53 - 0,0043 \cdot 31,4)^2} = 0,94,$$

где $U_{0дв} = \frac{U_{НОМдв}}{U_{\bar{6}\Pi}} = \frac{6}{6} = 1$ – напряжение двигателя в о. е.;

$$I_{0дв} = \frac{I_0}{I_{\bar{6}\Pi}} = \frac{S_{\Phi}}{S_{\bar{6}}} = \frac{P_{\Phi}}{S_{\bar{6}} \cos \varphi} = \frac{3,65}{1000 \cdot 0,85} = 0,0043$$
 – рабочий ток двигателя.

Сверхпереходная ЭДС генератора:

$$E'' = U_0 + I_{0Г} X''_d \sin \varphi_0 = 1,2 + 0,0825 \cdot 3,66 \cdot 0,53 = 1,36,$$

где $U_0 = \frac{U_{\text{НОМ}}}{U_{\text{бIV}}} = \frac{13,8}{11,4} = 1,2$; $I_{0Г} = \frac{I_0}{I_{\text{бIV}}} = \frac{S_{\text{НОМ}} K U_{\text{бIV}}}{S_6 U_{\text{НОМ}}} = \frac{100 \cdot 1 \cdot 11,4}{1000 \cdot 13,8} = 0,0825$.

Полную схему замещения (рис. 7.3) преобразуем к виду, представленному на рис. 7.4. Эквивалентное сопротивление двигателей:

$$X_{\text{д}} = 0,5(X_{\text{дв1}}'' + X_{\text{T1}}) = 0,5(31,4 + 12,7) = 22,05;$$

$$R_{\text{д}} = 0,5(R_{\text{д1}} + R_{\text{T1}}) = 0,5(2,24 + 1,15) = 1,7.$$

Эквивалентная ЭДС этих же ветвей: $E_{\text{двэ}}'' = E_{\text{дв1}}'' = 0,94$.

Суммарное сопротивление ветви линии и ветви с эквивалентным двигателем: $X_1 = X_{\text{д}} + X_{\text{л}} = 22,05 + 3 = 25,05$; $R_1 = R_{\text{д}} + R_{\text{л}} = 2,5 + 1,7 = 4,2$.

Ветви, содержащие ЭДС системы $E_{\text{с}}$ и ЭДС двигателя $E_{\text{двэ}}''$, параллельны относительно средней точки автотрансформатора и их можно представить одной эквивалентной ветвью с эквивалентной ЭДС $E_{\text{э}}$ и сопротивлением $X_{\text{э}}$ (рис. 7.4):

$$E_{\text{э}} = \frac{E_{\text{с}} X_1 + E_{\text{дв}}'' X_{\text{в}}}{X_1 + X_{\text{в}}} = \frac{1,15 \cdot 25,05 + 0,94 \cdot 1,46}{25,05 + 1,46} = 1,14;$$

$$X_{\text{э1}} = \frac{X_1 X_{\text{в}}}{X_1 + X_{\text{в}}} = \frac{25,05 \cdot 1,46}{25,05 + 1,46} = 1,38;$$

$$R_{\text{э1}} = \frac{R_1 R_{\text{в}}}{R_1 + R_{\text{в}}} = \frac{0,044 \cdot 4,2}{0,044 + 4,2} = 0,043.$$

Сопротивление ветви с $X_{\text{э1}}$ и $X_{\text{н}}$: $X_{\text{э}} = X_{\text{н}} + X_{\text{э1}} = 1,38 + 0,57 = 1,95$;

$$R_{\text{э}} = R_{\text{н}} + R_{\text{э1}} = 0,043 + 0,017 = 0,06.$$

Начальный ток от системы $I_{\text{п0с}} = \frac{E_{\text{э}}}{X_{\text{э}}} = \frac{1,14}{1,95} = 0,58$.

Начальный ток от генератора $I_{\text{п0Г}} = \frac{E_{\text{э}}''}{X_{\text{д}}} = \frac{1,36}{3,66} = 0,37$.

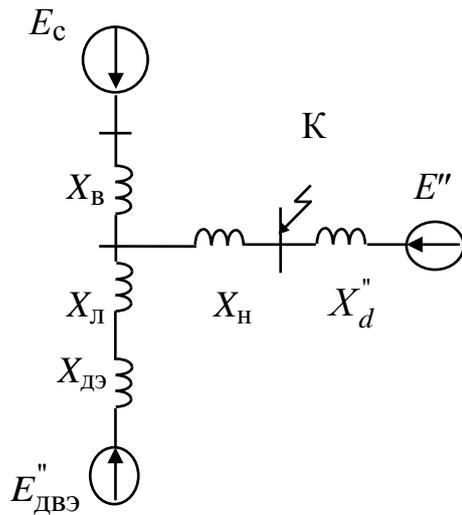


Рис. 7.3. Преобразованная схема замещения исследуемой системы

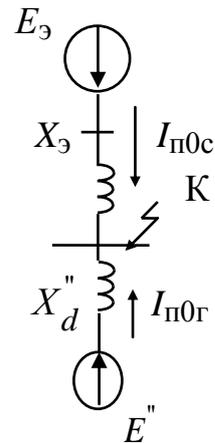


Рис. 7.4. Эквивалентная схема замещения

Начальный периодический ток в точке КЗ

$$I_{пк0} = (I_{п0с} + I_{п0г})I_{бIV} = (0,58 + 0,37)50,7 = 48,16 \text{ кА},$$

где $I_{бIV} = S_6/\sqrt{3} U_{бIV} = 1000/\sqrt{3} \cdot 11,4 = 50,7 \text{ кА}$ – базисный ток на IV ступени.

Постоянная времени затухания апериодического тока от системы

$$T_{ac} = X_э/\omega R_э = 1,95/(314 \cdot 0,06) = 0,1 \text{ с}.$$

По кривым $K_y = \varphi(T_a)$ для найденного значения T_a определяем величину ударного коэффициента для системы $K_{yc} = 1,9$. Ударный коэффициент для генератора определяем также по кривым; для $T_a = 0,2 \text{ с}$ коэффициент $K_{yг} = 1,95$.

Ударный ток от системы $i_{yc} = \sqrt{2} K_{yc} I_{п0с} = \sqrt{2} \cdot 1,9 \cdot 0,58 = 1,54$.

Ударный ток от генератора $i_{yг} = \sqrt{2} K_{yг} I_{п0г} = \sqrt{2} \cdot 1,95 \cdot 0,37 = 1,01$.

Ударный ток в месте КЗ $i_{yк} = (i_{yc} + i_{yг}) I_{бIV} = (1,54 + 1,01)50,7 = 129,2 \text{ кА}$.

Изменение апериодической составляющей тока КЗ во времени:
от системы

$$i_{act} = i_{ac0} e^{-t/T_{ac}} = \sqrt{2} I_{п0с} e^{-t/T_{ac}} = \sqrt{2} \cdot 0,58 e^{-t/0,1}.$$

от генератора

$$i_{arT} = i_{ar0} e^{-t/T_{ar}} = \sqrt{2} I_{п0Г} e^{-t/T_{ar}} = \sqrt{2} \cdot 0,37 e^{-t/0,2} = 0,52 e^{-t/0,2}.$$

в месте КЗ

$$i_{akt} = i_{a0} e^{-t/T_{ar}} + i_{ac0} e^{-t/T_{ac}} = 0,52 e^{-t/0,2} + 0,8 e^{-t/0,1} \text{ или в кА}$$

$$\begin{aligned} i_{akt} &= (i_{ar0} e^{-t/T_{ar}} + i_{ac0} e^{-t/T_{ac}}) I_{бIV} = (0,52 e^{-t/0,2} + 0,8 e^{-t/0,1}) 50,7 = \\ &= 26,4 e^{-t/0,2} + 41,59 e^{-t/0,1} = 68,1 e^{-t/T_{aэ}} \text{ кА.} \end{aligned}$$

Углы сдвига цепи

$$\text{системы } \varphi_c = \arctg\left(\frac{X_э}{R_э}\right) = \arctg\left(\frac{1,95}{0,06}\right) = 88^\circ,$$

$$\text{генератора } \varphi_r = \arctg\left(\frac{X_r}{R_r}\right) = \arctg\left(\frac{3,66}{0,058}\right) = 89^\circ.$$

Зависимость периодического тока КЗ во времени:

от системы

$$i_{пct} = \sqrt{2} I_{пoc} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_c), \text{ если угол выражен в рад и}$$

$$i_{пct} = \sqrt{2} 0,58 \sin(2\pi f t + 0 - 88^\circ) = 0,8 \sin(18000t - 88^\circ), \text{ если угол в град.}$$

от генератора $i_{пГt} = \sqrt{2} I_{пoГ} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_r) = 0,52 \sin(18000t - 89^\circ)$;

в месте КЗ

$$i_{пкт} = i_{пГt} + i_{пct} = 0,8 \sin(18000t - 88^\circ) + 0,52 \sin(18000t - 89^\circ) \text{ или}$$

$$\text{в кА } i_{пкт} = (i_{пГt} + i_{пct}) I_{бIV} = 40,56 \sin(18000t - 88^\circ) + 26,4 \sin(18000t - 89^\circ).$$

Значения тока i_{akt} для различных моментов времени:

$$\text{при } t = 0 \quad i_{akt} = 66,86; \text{ при } t = 0,05 \quad i_{akt} = 45,24;$$

$$\text{при } t = 0,2 \quad i_{akt} = 15,17; \text{ при } t = 0,01 \quad i_{akt} = 61,48;$$

$$\text{при } t = 0,1 \quad i_{akt} = 31,05; \text{ при } t = 0,3 \quad i_{akt} = 7,81.$$

Периодическая составляющая изменяется с амплитудой $I_{пm} = 66,86$ и периодом $T = 0,02$ с. На рис. 7.5 изображена осциллограмма токов КЗ от системы, на рис. 7.6 – от генератора.

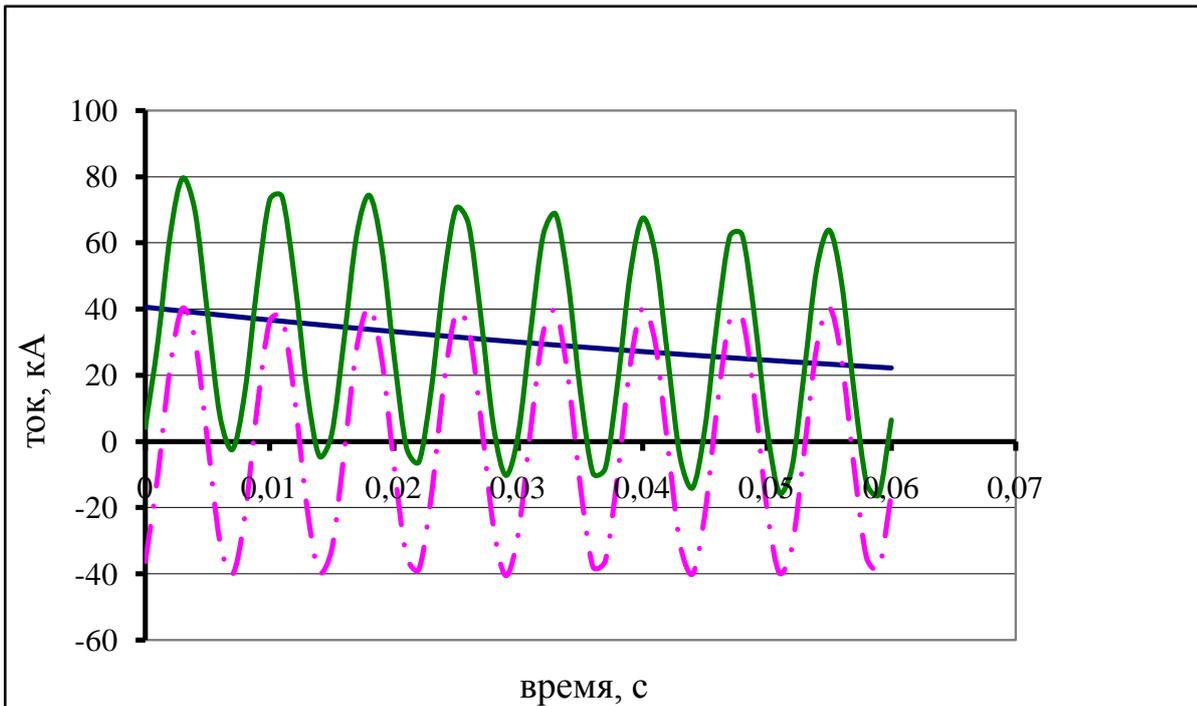


Рис. 7.5. Осциллограмма токов КЗ от системы: i_{act} , i_{ct} , $i_{пст}$

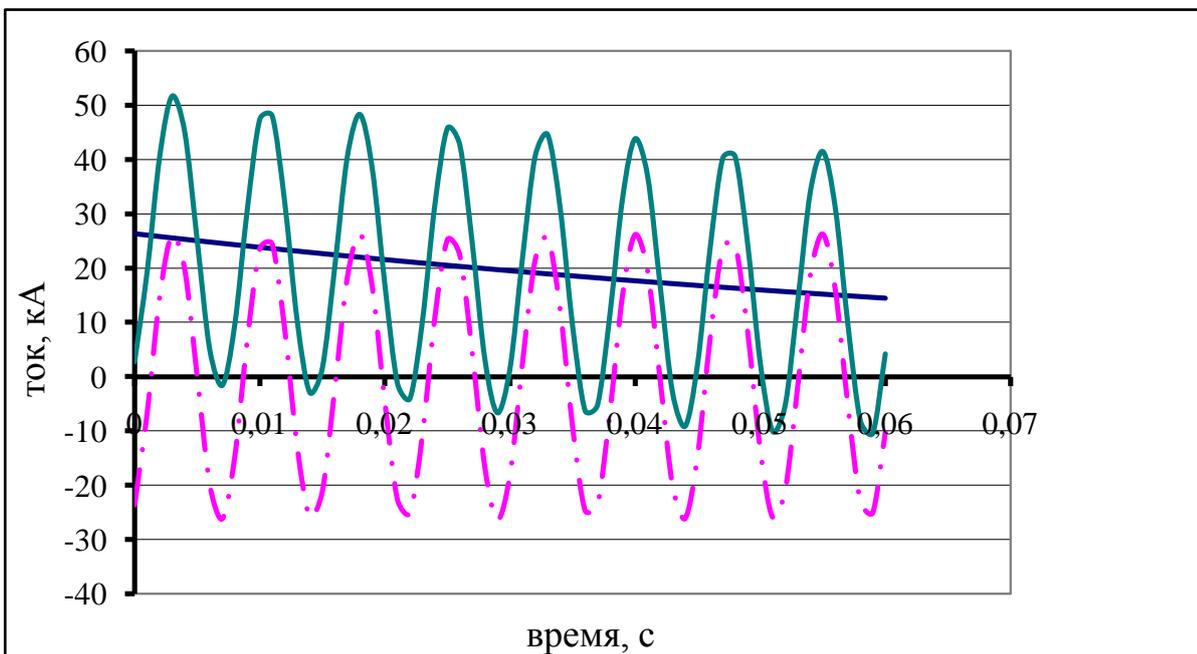


Рис. 7.6. Осциллограмма токов КЗ от генератора: i_{art} , i_{rt} , $i_{прт}$

Пример 7.2

Принципиальная схема приведена на рис. 7.7. Генератор Г с АРВ работает на холостом ходу с номинальным напряжением $U_{ном} = 10,5$ кВ, с постоянной времени $T_e = 0$ с, с током возбуждения $I_{фпр} = 3$. Реактивность

сети $X_{c1} = 0,69$ Ом. Параметры генератора Г: $S_{\text{НОМ}} = 40$ МВ · А, $X_d = X_q = 0,8$, $X_d'' = 0,31$, $T_{f0} = 2,5$ с. Переходной процесс вызывается трехфазным КЗ за сопротивлением X_{c1} . Требуется построить кривые изменения синхронной ЭДС E_{qt} , сверхпереходной ЭДС E_t'' , периодического тока статора $I_{\text{пт}}$ и напряжения $U_{\text{пт}}$ генератора от времени t . Считать, что АРВ отключено.

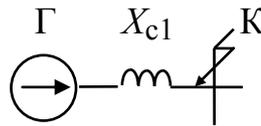


Рис. 7.7. Исследуемая схема

Решение

Решение проводим в системе относительных единиц при номинальных условиях генератора $S_{\text{б}} = S_{\text{НОМ}}$, $U_{\text{б}} = U_{\text{НОМ}}$.

Реактивности:

$$\text{системы } X_c = X_{c1} \frac{S_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}^2} = 0,69 \frac{40}{10,5^2} = 0,25;$$

генератора

$$\text{сверхпереходная } X_{d(n)}'' = X_d'' = 0,31; \quad X_{d(n)} = X_d = 0,81.$$

В режиме, предшествующем КЗ, генератор работал на холостом ходу при номинальном напряжении $U_{\text{НОМ}}$.

$$\text{Тогда сверхпереходная ЭДС } E_{0*}'' = U_{0*} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{U_{\text{б}}} = \frac{10,5}{10,5} = 1,0.$$

$$\text{Синхронная ЭДС } E_{q0*} = U_{0*} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{U_{\text{б}}} = \frac{10,5}{10,5} = 1,0.$$

$$\text{Сверхпереходной ток } I_{0*}'' = \frac{E_{0*}''}{X_d'' + X_c} = \frac{1}{0,31 + 0,25} = 1,79.$$

$$\text{Установившийся ток КЗ } I = \frac{E_{q0*}}{X_d + X_c} = \frac{1}{0,81 + 0,25} = 0,94.$$

Постоянная времени обмотки возбуждения при закороченном статоре

$$T_d' = T_{f0} \frac{X_d'' + X_c}{X_d + X_c} = 2,5 \frac{0,31 + 0,25}{0,81 + 0,25} = 1,32 \text{ с.}$$

Выражения для исследуемых параметров режима:
периодической слагающей тока статора

$$I_{\Pi}(t) = \frac{E_{q0^*}}{X_d + X_c} + \left[\frac{E_0''}{X_d'' + X_c} - \frac{E_{q0^*}}{X_d + X_c} \right] e^{-t/T_d'} =$$

$$= I + (I_0'' - I) e^{-t/T_d'} = 0,94 + (1,79 - 0,94) e^{-t/1,32} = 0,94 + 0,85 e^{-t/1,32};$$

напряжения на шинах генератора

$$U_{\Gamma}(t) = I_{\Pi}(t)X_c = [I + (I_0'' - I) e^{-t/T_d'}]X_c =$$

$$= (0,94 + 0,85 e^{-t/1,32})0,25 = 0,235 + 0,212 e^{-t/1,32};$$

сверхпереходной ЭДС

$$E_t''(t) = I_{\Pi}(t)(X_d'' + X_c) = [I + (I_0'' - I) e^{-t/T_d'}](X_d'' + X_c) =$$

$$= [0,94 + 0,85 e^{-t/1,32}]0,56 = 0,525 + 0,475 e^{-t/1,32};$$

синхронной ЭДС

$$E_q(t) = I_{\Pi}(t)(X_d + X_c) = [I + (I_0'' - I) e^{-t/T_d'}](X_d + X_c) =$$

$$= [0,94 + 0,85 e^{-t/1,32}]1,06 = 1,0 + 0,9 e^{-t/1,32}.$$

Для различных значений времени t получим:

при $t = 0$ с $I_{\Pi}(t) = 1,79$; $U_{\Gamma}(t) = 0,447$; $E''(t) = 1,0$; $E_q(t) = 1,9$;

при $t = 0,5$ с $I_{\Pi}(t) = 1,52$; $U_{\Gamma}(t) = 0,38$; $E''(t) = 0,85$; $E_q(t) = 1,6$;

при $t = 1$ с $I_{\Pi}(t) = 1,34$; $U_{\Gamma}(t) = 0,34$; $E''(t) = 0,75$; $E_q(t) = 1,43$;

при $t = 2$ с $I_{\Pi}(t) = 1,13$; $U_{\Gamma}(t) = 0,28$; $E''(t) = 0,63$; $E_q(t) = 1,2$;

при $t = 3$ с $I_{\Pi}(t) = 1,03$; $U_{\Gamma}(t) = 0,26$; $E''(t) = 0,58$; $E_q(t) = 1,1$.

По полученным результатам расчета строятся кривые изменения режимных параметров: действующего значения тока КЗ (рис. 7.8), напряжения (рис. 7.9) и ЭДС (рис. 7.10, 7.11) в функции времени t .

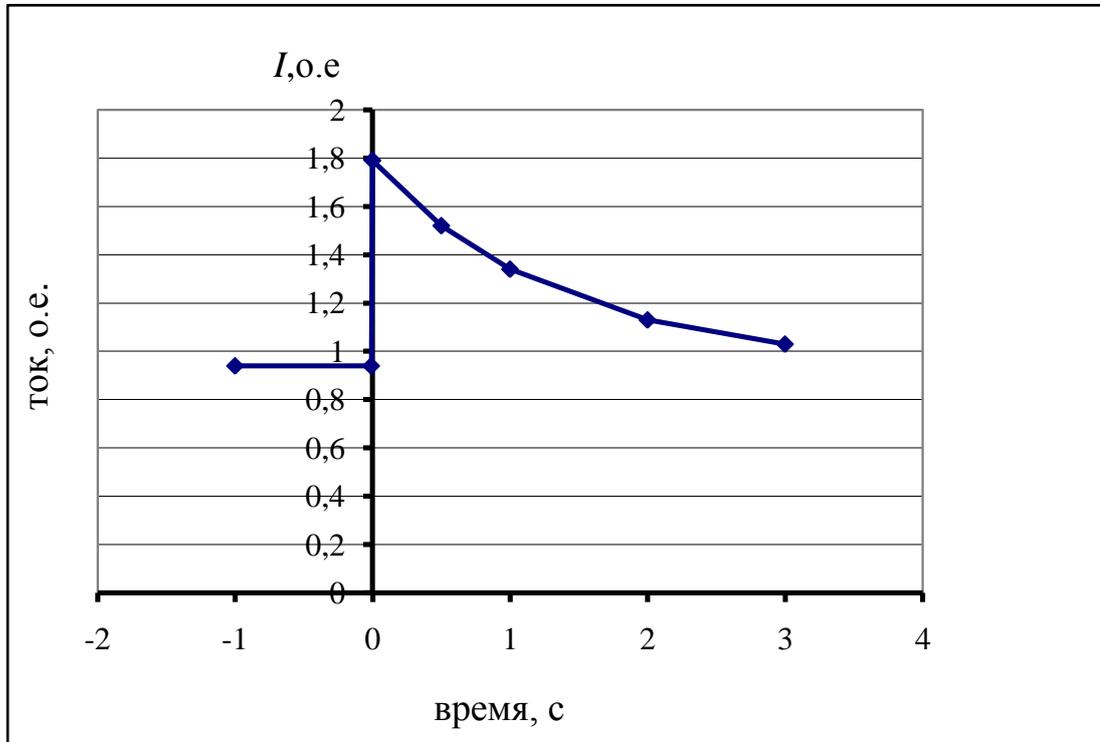


Рис. 7.8. Кривая изменения $I = \varphi(t)$

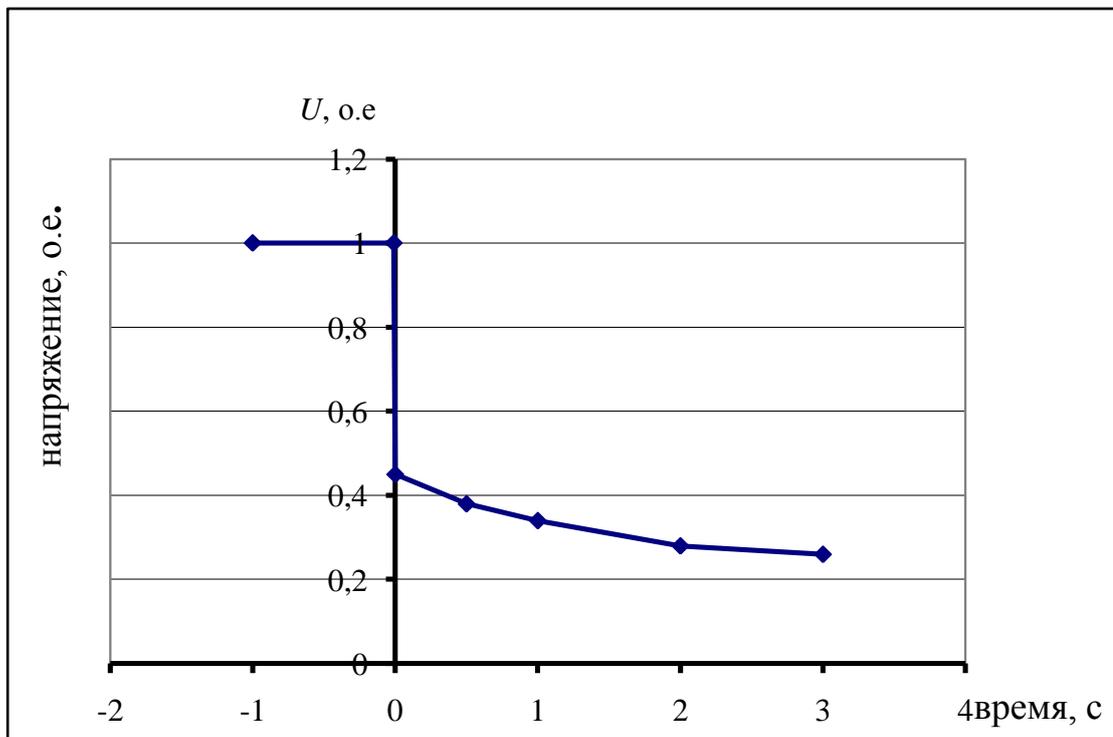
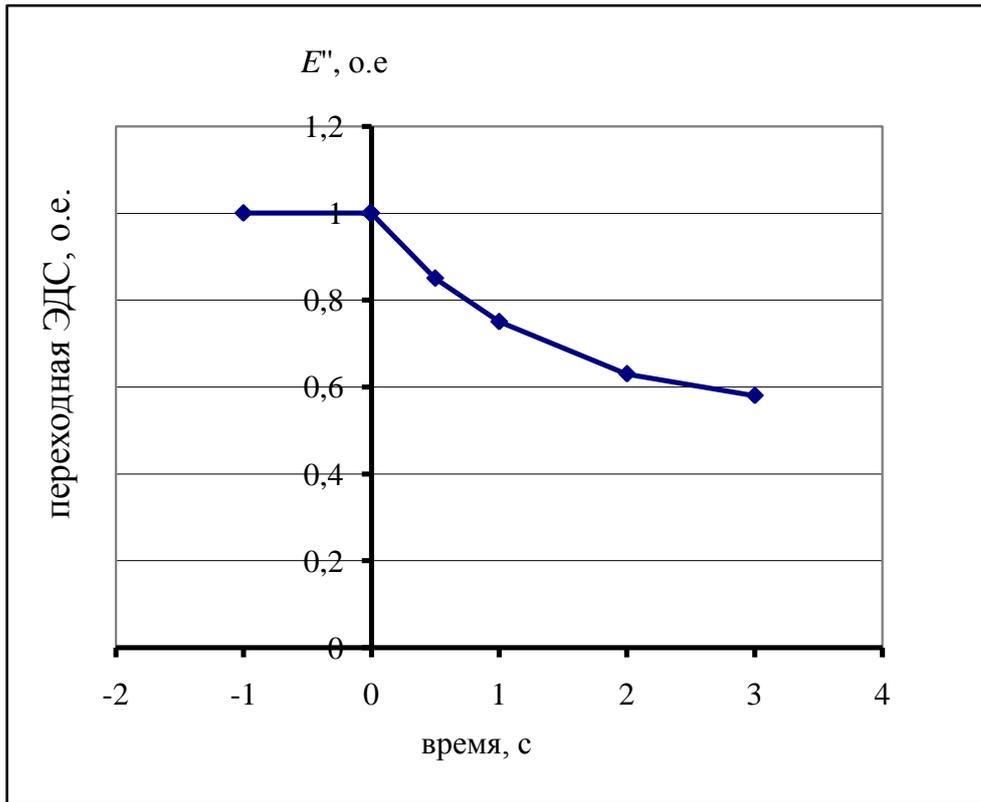
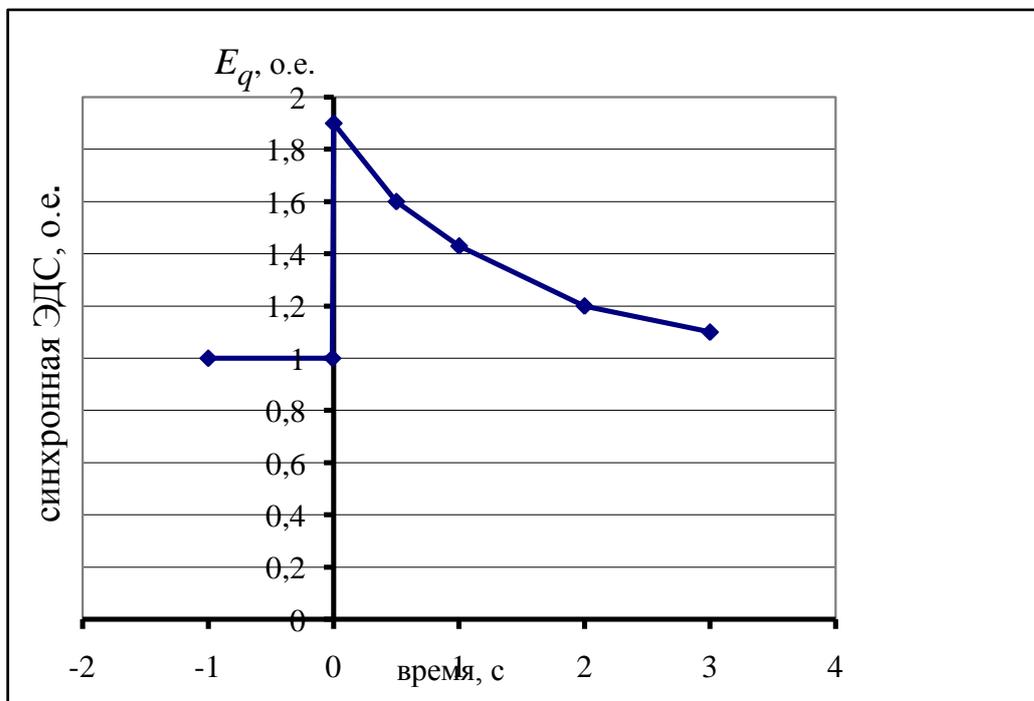


Рис. 7.9. Кривая изменения $U = \varphi(t)$

Рис. 7.10. Кривая изменения $E'' = \varphi(t)$ Рис. 7.11. Кривая изменения $E_q = \varphi(t)$

Пример 7.3.

Блок, состоящий из двух генераторов Г1 и Г2, трансформатора Т с расщепленной обмоткой низкого напряжения, связан линией Л с узлом системы С (рис. 7.12). Напряжение в узле системы постоянно и равно $U_c = 220$ кВ. В точке К произошло трехфазное короткое замыкание.

Требуется определить величину периодического тока КЗ, используя метод типовых кривых. Принять собственное время выключателя $t = 0,2$ с.

Исходные данные:

генераторы Г1 и Г2: $S_{\text{НОМ}} = 75$ МВ·А, $U_{\text{НОМ}} = 10,5$ кВ, $X_d'' = 0,15$, $X_{2Г} = 0,12$, имеется автоматическое регулирование возбуждением АРВ, $\cos\varphi = 0,85$, $T_{f0} = 6$ с, $I_{\text{НОМ}} = 4,13$ кА.

трансформатор Т: $S_{\text{НОМ}} = 160$ МВ·А, $U_{\text{ВН}} = 230$ кВ, $U_{\text{НН}} = 11$ кВ, $U_k = 12\%$; $K_p = 3,5$.

линия Л: $l = 150$ км, $X_0 = 0,4$ Ом/км.

Решение.

Расчеты элементов проводим в системе относительных единиц. Примем за $S_{\text{б}} = 75$ МВ·А и базисное напряжение на ступени I $U_{\text{бI}} = U_{\text{ср ном}} = 10,5$ кВ. Индуктивные сопротивления элементов схемы замещения (рис. 7.14):

сопротивление трансформатора

$$X_B = \frac{U_k}{100} \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{НОМ}}} \left(1 - \frac{K_p}{4}\right) = \frac{12}{100} \frac{75}{160} \left(1 - \frac{3,5}{4}\right) = 0,007 \cong 0;$$

$$X_{H1} = X_{H2} = \frac{2U_k}{100} \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{НОМ}}} \frac{K_p}{2} = \frac{12}{100} \frac{75}{160} \frac{3,5}{2} = 0,1;$$

сопротивления генераторов $X_{d1}'' = X_{d2}'' = X_d'' \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{НОМ}}} = 0,15 \frac{75}{75} = 0,15;$

сопротивление линии Л $X_L = Xl \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{бII}}^2} = 0,4 \cdot 150 \frac{75}{230^2} = 0,085.$

ЭДС системы $E_c = \frac{U_c}{U_{\text{бII}}} = \frac{220}{230} = 0,96.$

Сверхпереходная ЭДС генераторов Г1 и Г2 ($E_1'' = E_2''$)

$$E_1'' = E_2'' = \sqrt{(U_0 \cos \varphi_0)^2 + (U_0 \sin \varphi_0 + I_0 X_d'')^2} = \\ = \sqrt{(1 \cdot 0,85)^2 + (1 \cdot 0,53 + 1 \cdot 0,15)^2} = 1,1,$$

где $U_0 = \frac{U_{\text{НОМ}}}{U_{\text{б}}} = \frac{10,5}{10,5} = 1$; $I_0 = \frac{I_{0\Gamma}}{I_{\text{бI}}} = \frac{4,13}{4,13} = 1$.

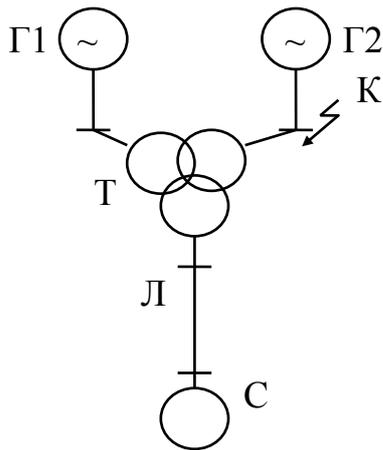


Рис. 7.12. Исследуемая система к примеру 7.3

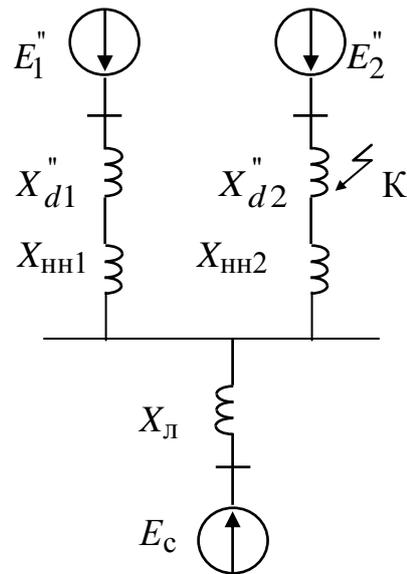


Рис. 7.13. Схема замещения исследуемой системы

Параметры преобразованной схемы замещения (рис. 7.14, а):

$$X_{\text{э1}} = X_{d1}'' + X_{\text{нн1}} = 0,15 + 0,1 = 0,25.$$

Эквивалентное сопротивление генератора Г1 и системы С (рис. 7.14, б)

$$X_{\text{э2}} = \frac{X_{\text{э1}} X_{\text{л}}}{X_{\text{э1}} + X_{\text{л}}} = \frac{0,25 \cdot 0,085}{0,25 + 0,085} = 0,064.$$

Эквивалентная ЭДС

$$E_{\text{э}} = \frac{E_1'' X_{\text{л}} + E_{\text{с}} X_{\text{э1}}}{X_{\text{л}} + X_{\text{э1}}} = \frac{1,1 \cdot 0,085 + 0,96 \cdot 0,25}{0,085 + 0,25} = 0,99.$$

Суммарное сопротивление эквивалентной ветви с $X_{\Sigma 2}$ и обмотки трансформатора Г (рис. 7.15) $X_{\Sigma} = X_{\Sigma 2} + X_{\text{HH}2} = 0,064 + 0,1 = 0,164$.

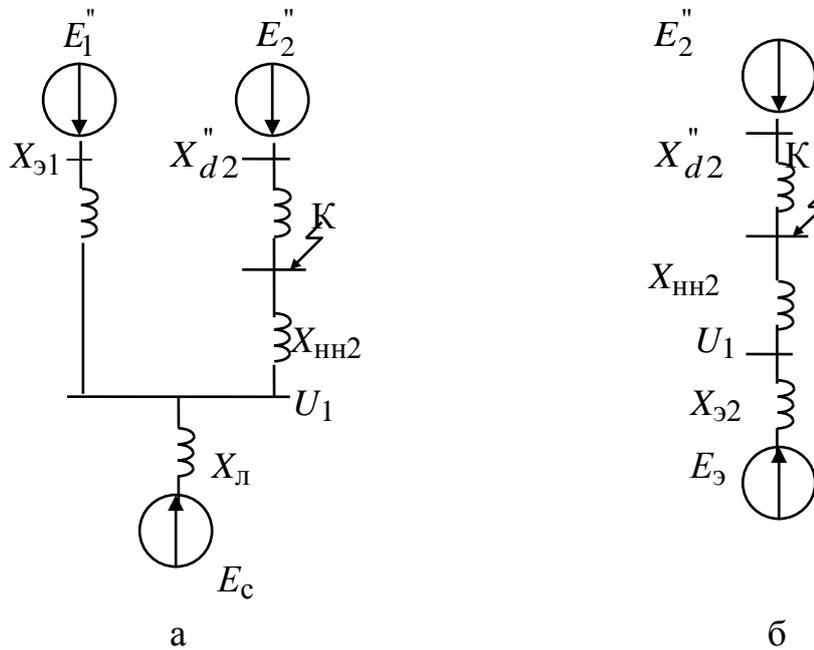


Рис. 7.14. Схема замещения исследуемой системы к примеру 7.3:
а – преобразованная; б – эквивалентная

На рис.7.15 изображена простейшая схема замещения.

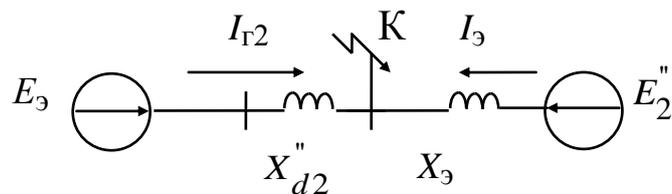


Рис. 7.15. Простейшая схема замещения

Начальный ток от генератора Г1 и системы С:

$$I_{\Sigma 0} = \frac{E_{\Sigma}}{X_{\Sigma}} = \frac{0,99}{0,164} = 5,68.$$

$$\text{Начальный ток от Г2 } I_{\Gamma 20} = \frac{E_2''}{X_d''} = \frac{1,1}{0,15} = 7,49.$$

Напряжение $U_1 = I_{\text{Э0}} X_{\text{НН2}} = 5,68 \cdot 0,11 = 0,63$.

Начальный ток от Г1 $I_{\Gamma10} = \frac{E_1'' - U_1}{X_{\text{Э1}}} = \frac{1,1 - 0,63}{0,25} = 1,79$.

Отношение начального тока генератора Г1 к начальному току в точке КЗ $I_{\Gamma10}/I_{\text{Э0}} = 1,79/5,68 = 0,315$.

Отношение начального тока генератора Г1 к номинальному току

$$I_{\Gamma10*} = \frac{I_{\Gamma10}}{I_{\Gamma1\text{НОМ}}} = I_{\Gamma10} \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{НОМ}}} = 1,79 \frac{75}{75} = 1,79 \cong 2$$

генератора Г2 $I_{\Gamma20*} = \frac{I_{\Gamma20}}{I_{\Gamma2\text{НОМ}}} = I_{\Gamma20} \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{н}}} = 7,49 \frac{75}{75} = 7,49 \cong 7$.

Поскольку отношение $\frac{I_{\Gamma10}}{I_{\text{Э0}}} = 0,315 < 0,5$, то изменением во времени

тока КЗ $I_{\text{Э}}$ можно пренебречь, т.е. в этом случае $I_{\text{Э0}} = I_{\text{Эt}} = 5,68$.

По основным кривым выбираем кривую, соответствующую $I_{\Gamma20*} = 7$ и для времени $t = 0,2$ с находим величину $\gamma_t = I_{\Gamma t2}/I_{\Gamma20} = 0,65$.

Для генератора Г2 значение периодического тока КЗ в момент времени $t = 0,2$ с равно $I_{\Gamma t2} = \gamma_t I_{\Gamma20} = 0,65 \cdot 7,49 = 4,87$.

Ток в месте КЗ $I_{\text{Кt}*} = I_{\Gamma t2} + I_{\text{Эt}} = 4,87 + 5,68 = 10,55$.

Искомый ток в месте КЗ $I_{\text{Кt}} = I_{\text{Кt}*} I_{\text{б}} = 10,55 \cdot 4,12 = 43,47$ кА.

Пример 7.4.

Блок, состоящий из двух генераторов Г1 и Г2, трансформатора с расщепленной обмоткой Т, связан линией Л с узлом системы С (рис. 1). Напряжение в узле системы постоянно $U_{\text{С}} = 220$ кВ. В точке К произошло двухфазное короткое замыкание.

Требуется рассчитать начальный ток двухфазного КЗ.

Исходные данные:

Генераторы Г1 и Г2: $S_{\text{НОМ}} = 75$ МВ·А, $U_{\text{НОМ}} = 10,5$ кВ, $X_d'' = 0,15$, $X_2 = 0,12$, имеется АРВ, $\cos\varphi = 0,85$, $T_{\text{f0}} = 6$ с, $I_{\text{НОМ}} = 4,13$ кА.

Трансформатор с расщепленной обмоткой Т: $S_{\text{НОМ}} = 160 \text{ МВ}\cdot\text{А}$,
 $U_{\text{ВН}} = 230 \text{ кВ}$, $U_{\text{НН}} = 11 \text{ кВ}$, $U_{\text{к}} = 12 \%$; $K_{\text{р}} = 3,5$.

Линия Л: $l = 150 \text{ км}$, $X_0 = 0,4 \text{ Ом/км}$.

Решение

Расчеты элементов проводим в системе относительных единиц для
 схемы замещения на рис. 7.17. Примем за $S_{\text{б}} = 75 \text{ МВ}\cdot\text{А}$ и базисное
 напряжение на ступени I $U_{\text{бI}} = U_{\text{ср ном}} = 10,5 \text{ кВ}$.

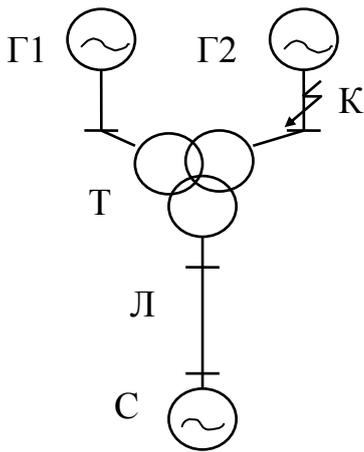


Рис. 7.17. Исследуемая система
к примеру 7.4

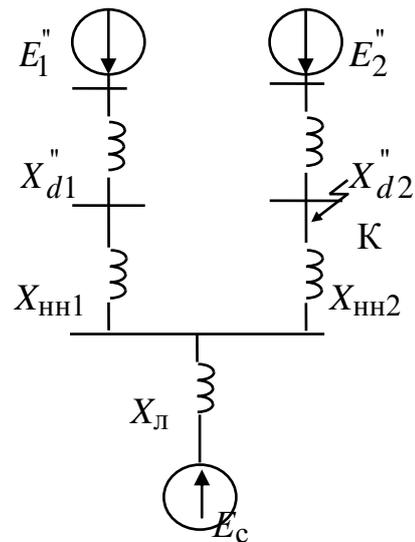


Рис. 7.18. Схема замещения
исследуемой системы к примеру 7.4

Индуктивные сопротивления элементов схемы замещения:
 трансформатора

$$X_{\text{В}} = \frac{U_{\text{к}}}{100} \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{НОМ}}} \left(1 - \frac{K_{\text{р}}}{4}\right) = \frac{12}{100} \frac{75}{160} \left(1 - \frac{3,5}{4}\right) = 0,007 \cong 0;$$

$$X_{\text{НН1}} = X_{\text{НН2}} = \frac{U_{\text{к}}}{100} \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{НОМ}}} \frac{K_{\text{р}}}{2} = \frac{12}{100} \frac{75}{160} \frac{3,5}{2} = 0,1;$$

$$\text{генераторов } \Gamma 1 \text{ и } \Gamma 2 \quad X_{d1}'' = X_{d2}'' = X_d'' = \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{НОМ}}} = 0,15 \frac{75}{75} = 0,15;$$

$$\text{линии Л } X_{\text{Л}} = Xl \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{бII}}^2} = 0,4 \cdot 150 \frac{75}{230^2} = 0,085.$$

$$\text{ЭДС системы } E_{\text{с}} = \frac{U_{\text{с}}}{U_{\text{бII}}} = \frac{220}{230} = 0,96.$$

Сверхпереходная ЭДС генераторов Г1 и Г2

$$E_1'' = E_2'' = \sqrt{(U_0 \cos \varphi_0)^2 + (U_0 \sin \varphi_0 + I_0 X_d'')^2} =$$

$$\sqrt{(1 \cdot 0,85)^2 + (1 \cdot 0,53 + 1 \cdot 0,15)^2} = 1,1,$$

где $U_0 = \frac{U_{\text{НОМ}}}{U_6} = \frac{10,5}{10,5} = 1$ – рабочее напряжение; $I_0 = \frac{I_{0Г}}{I_{6Г}} = \frac{4,13}{4,13} = 1$ – рабочий ток.

Параметры преобразованной схемы замещения (рис. 7.19, а):

$$X_{\text{э}1} = X_{d1}'' + X_{\text{нн}1} = 0,15 + 0,1 = 0,25.$$

Эквивалентное сопротивление ветвей генератора Г1 и системы С (рис. 7.19, б)

$$X_{\text{э}2} = \frac{X_{\text{э}1} X_{\text{л}}}{X_{\text{э}1} + X_{\text{л}}} = \frac{0,25 \cdot 0,085}{0,25 + 0,085} = 0,064.$$

Эквивалентная ЭДС

$$E_{\text{э}} = \frac{E_1'' X_{\text{л}} + E_{\text{с}} X_{\text{э}1}}{X_{\text{л}} + X_{\text{э}1}} = \frac{1,1 \cdot 0,085 + 0,96 \cdot 0,25}{0,085 + 0,25} = 0,99.$$

Суммарное сопротивление эквивалентной ветви с $X_{\text{э}2}$ и обмотки трансформатора Т (рис. 7.20) $X_{\text{э}} = X_{\text{э}2} + X_{\text{нн}2} = 0,064 + 0,1 = 0,164$.

Составляем схему замещения для аварийного режима (рис. 4). Для этого удаляем точку КЗ на дополнительное сопротивление ΔX , равное при двухфазном КЗ сопротивлению обратной последовательности.

Эквивалентные сопротивления схемы замещения:

$$X_{\text{э}1} = X_2 + X_{\text{нн}1} = 0,12 + 0,1 = 0,22;$$

$$X_{\text{э}2} = \frac{X_{\text{э}1} X_{\text{л}}}{X_{\text{э}1} + X_{\text{л}}} = \frac{0,22 \cdot 0,085}{0,22 + 0,085} = 0,0615;$$

$$X_{\text{э}} = X_{\text{э}2} + X_{\text{нн}2} = 0,0615 + 0,1 = 0,162.$$

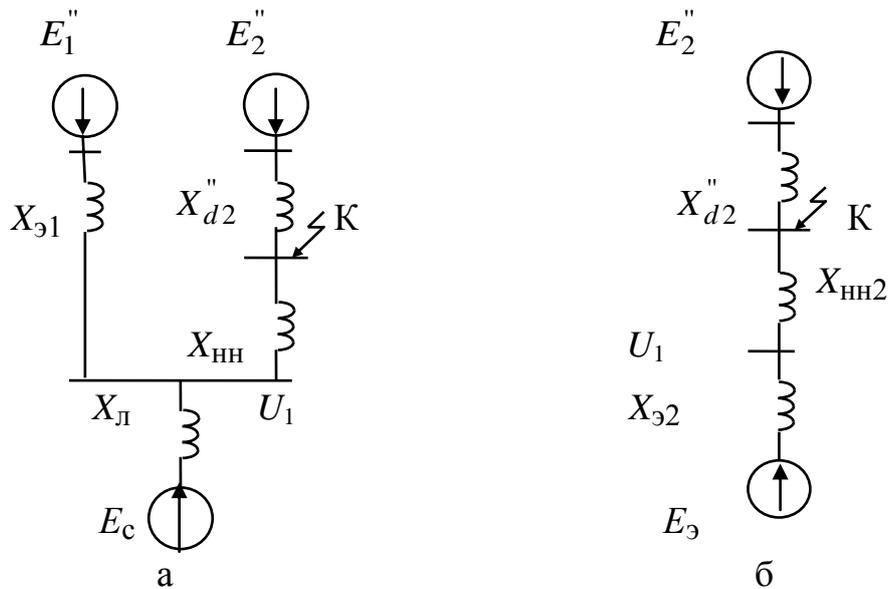


Рис. 7.19. Схема замещения исследуемой системы к примеру 7.4:
а – преобразованная; б – эквивалентная

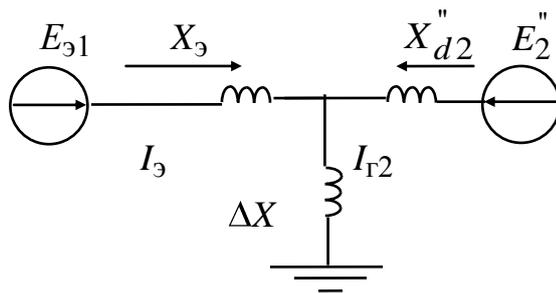


Рис. 7.20. Схема замещения аварийного режима

Сопротивление обратной последовательности (рис. 7.21)

$$X_{2\Sigma} = \Delta X = \frac{X_{\text{г}} X_2}{X_{\text{г}} + X_2} = \frac{0,162 \cdot 0,12}{0,162 + 0,12} = 0,07.$$

Схему замещения аварийного режима преобразуем к виду, показанному на рис 7.22. Сопротивление прямой последовательности

$$X_{1\Sigma} = \frac{X_{\text{г}} X_{d2}''}{X_{\text{г}} + X_{d2}''} = \frac{0,164 \cdot 0,15}{0,164 + 0,15} = 0,08.$$

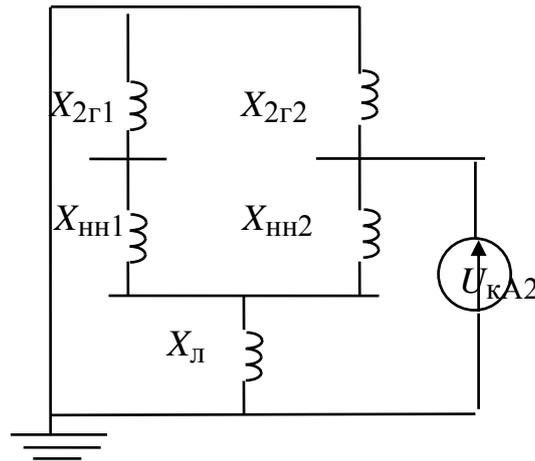


Рис. 7.21. Схема замещения обратной последовательности

Эквивалентная ЭДС ветвей генератора Г2 и ветви с $E_{\text{Э}1}$

$$E_{\text{Э}} = \frac{E_2'' X_{\text{Э}} + E_{\text{Э}1}'' X_{d2}''}{X_{\text{Э}} + X_{d2}''} = \frac{1,1 \cdot 0,164 + 0,99 \cdot 0,15}{0,164 + 0,15} = 1,05.$$

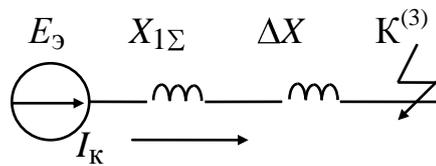


Рис. 7.22. Преобразованная схема замещения

Начальный ток прямой последовательности фазы А в месте КЗ

$$I_{\text{КА}1}^{(2)} = \frac{E_{\text{Э}}}{X_{1\Sigma} + \Delta X} = \frac{1,049}{0,08 + 0,07} = 6,99.$$

Токи фаз В и С в месте КЗ

$$I_{\text{КВ}}^{(2)} = -j\sqrt{3} I_{\text{КА}1} = -j12,09 \text{ и } I_{\text{КС}}^{(2)} = j\sqrt{3} I_{\text{КА}1} = j12,09$$

или в КА

$$I_{\text{КВ}}^{(2)} = -j\sqrt{3} I_{\text{КА}1} I_{\text{б}} = -j12,09 \cdot 4,12 = -j49,81 \text{ кА};$$

$$I_{\text{КС}}^{(2)} = \sqrt{3} I_{\text{КА}1} I_{\text{б}} = 49,81 \text{ кА}.$$

Пример 7.5

На рис. 7.23 показана электрическая система, состоящая из источника бесконечной мощности С с напряжением $U_c = 230$ кВ, двух трансформаторов Т1, Т2, линии Л и асинхронного электродвигателя АД.

Требуется определить величину начального пускового тока двигателя.

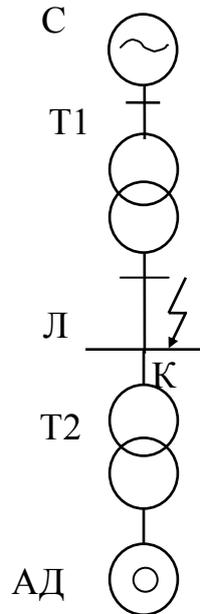


Рис. 7.23. Исследуемая система

Исходные данные:

трансформатор Т1: $S_{\text{ном}} = 180$ МВ·А, $U_{\text{вн}} = 242$ кВ, $U_{\text{нн}} = 121$ кВ, $U_{\text{к}} = 18$ %, трансформатор Т2: $S_{\text{ном}} = 10$ МВ·А, $U_{\text{вн}} = 110$ кВ, $U_{\text{нн}} = 6,6$ кВ, $U_{\text{к}} = 10,5$ %;

линия Л: $l = 75$ км, $X_0 = 0,4$ Ом/км, $R_0 = 0,33$ Ом/км;

асинхронный электродвигатель АД: $P_{\text{ном}} = 10$ мВт, $U_{\text{ном}} = 6$ кВ, $\cos\varphi = 0,91$, $\eta = 96,2$ %, кратность пускового тока $I_{\text{п}} = 5,6$.

Нагрузка двигателя составляет 3650 кВт при $\cos\varphi = 0,85$ и номинальном напряжении.

Требуется определить величину начального пускового тока двигателя.

Решение

На рис. 7.24 приведена схема замещения исследуемой сети. Расчеты проводим в системе относительных единиц при точном приведении. Примем за базисную мощность $S_{\text{б}} = 1000$ МВ·А и базисное напряжение на I ступени (шины двигателя АД1) $U_{\text{бI}} = 6$ кВ. Базисные напряжения

на остальных ступенях: $U_{6II} = U_{6I}/K_{T1} = 6 \cdot 110/6,6 = 100$ кВ;
 $U_{6III} = U_{6II}/K_{атв-с} = 100 \cdot 242/121 = 200$ кВ.

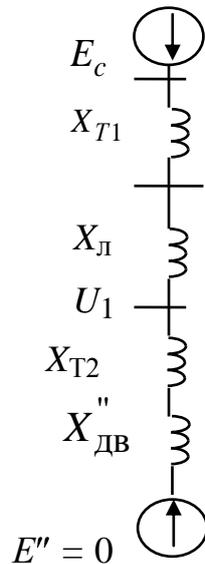


Рис. 7.24. Преобразованная схема замещения исследуемой системы

Сопротивления трансформаторов Т1 и Т2:

$$X_{T1} = (U_B S_6 / 100 S_{НОМ}) (U_{ВН} / U_{6III})^2 = (18 \cdot 1000 / 100 \cdot 180) (242 / 200)^2 = 1,46;$$

$$X_{T2} = (U_K S_6 / 100 S_{НОМ}) (U_{ВН} / U_{6II})^2 = (10,5 \cdot 1000 / 100 \cdot 10) (110 / 100)^2 = 12,7.$$

Линии Л: $X_L = X I S_6 / U_{6II}^2 = 0,4 \cdot 75 \cdot 1000 / 100^2 = 3;$

двигателя АД:

$$X''_{дв} = (1 / I_{П}) (S_6 / S_{НОМ}) (U_{НОМ} / U_{6I})^2 = (1 / 5,6) (1000 / 5,7) (6 / 6)^2 = 31,4,$$

где $S_{НОМ} = P_{НОМ} / \cos \varphi = 5 / 0,91 \cdot 0,962 = 5,7$ МВ·А.

ЭДС системы: $E_c = U_c / U_{6III} = 230 / 200 = 1,15.$

Суммарное сопротивление ветви системы и ветви с двигателем:

$$X_{\Sigma} = X''_{дв} + X_L + X_{T1} + X_{T2} = 1,46 + 12,7 + 3 + 31,4 = 48,56.$$

Начальный пусковой ток $I_{П0*} = E_{\Sigma} / X_{\Sigma} = 1,14 / 48,56 = 0,02.$

Начальный пусковой ток в кА

$$I_{пуск} = I_{П0*} I_{6IV} = (0,02) 96,4 = 1,92 \text{ кА},$$

где $I_{6I} = S_6 / \sqrt{3} U_{6I} = 1000 / \sqrt{3} \cdot 6 = 96,4$ кА – базисный ток на I ступени.

Пример 7.6.

Для выбора низковольтной коммутационно-защитной аппаратуры произведем расчет токов КЗ. Исходная схема приведена на рис. 7.25.

При расчете тока КЗ в распределительной сети напряжением до 1 кВ учитываем все сопротивления короткозамкнутой сети как активные так и индуктивные. Считаем, что напряжение на стороне ВН цехового трансформатора является неизменным. Расчет ведем в системе именованных единиц.

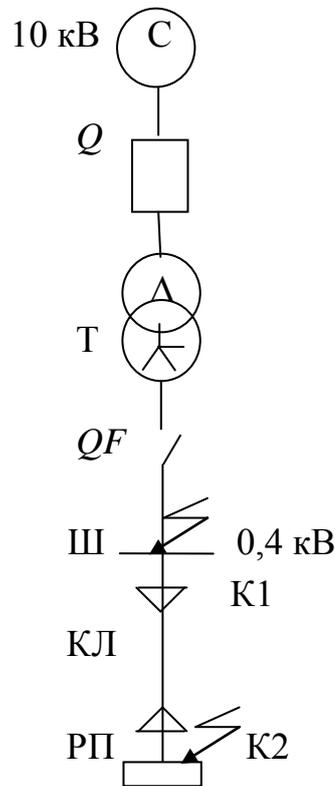


Рис. 7.25. Исследуемая система к примеру 7.6

Исходные данные:

система мощность КЗ $S_K = 300 \text{ МВ} \cdot \text{А}$; $U_{\text{ср ВН}} = 10 \text{ кВ}$.

Трансформатор ТМ-1000 Т: мощность $S_{\text{НОМ}} = 1000 \text{ кВА}$; потери х.х. $\Delta P_{\text{ХХ}} = 2,3 \text{ кВт}$; потери КЗ $\Delta P_K = 12,2 \text{ кВт}$; напряжение КЗ $U_K = 5,5 \%$, $U_{\text{ВН}} = 10 \text{ кВ}$, $U_{\text{НН}} = 0,4 \text{ кВ}$.

Автоматический выключатель ВА-51 QF : $I_{\text{НОМ}} = 1600 \text{ А}$ $R_{\text{ав}} = 0,14 \text{ мОм}$; $X_{\text{ав}} = 0,08 \text{ мОм}$.

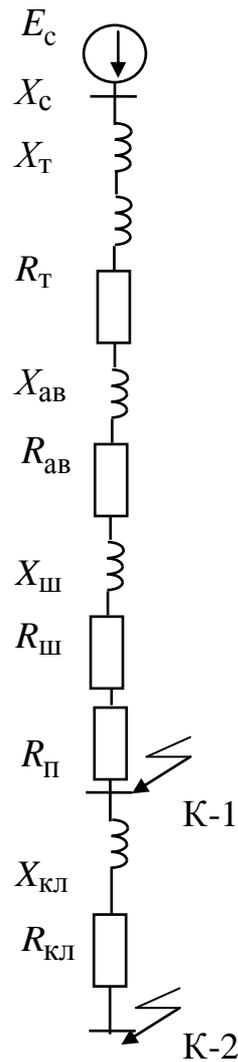


Рис. 7.26. Схема замещения к примеру 7.6

Шинопровод Ш серии ШМА-4-1600: удельные сопротивления активное $R_{Ш} = 0,030$ мОм/м; индуктивное $X_{Ш} = 0,014$ мОм/м; длина $l_{Ш} = 10$ м.

Кабельная линия КЛ: марка АВВГ-3х150, удельные сопротивления линии – активное $R_{кЛ} = 0,447$ мОм/м; индуктивное $X_{кЛ} = 0,062$ мОм/м; длина $l = 100$ м.

Переходное сопротивление для первичных цеховых РП, на зажимах аппаратов от щитов подстанции по радиальным линиям $R_{П} = 15$ мОм [2].

Расчет проводим в системе именованных единиц. Сопротивления системы электроснабжения ВН приводим к напряжению 0,4 кВ.

Параметры схемы замещения (рис. 7.26) прямой последовательности:

Сопротивление системы X_c :

$$X_c = \frac{(400)^2}{300} \cdot 10^{-3} = 0,533 \text{ мОм.}$$

Активное сопротивление системы можно принять $R_c = 0$.

Активное и индуктивное сопротивления трансформаторов составят:

$$R_T = \frac{12,2 \cdot 0,4^2}{(1000)^2} \cdot 10^6 = 1,95 \text{ мОм};$$

$$X_T = \sqrt{5,5^2 - \left(\frac{100 \cdot 12,2}{1000}\right)^2} \cdot \frac{0,4^2}{1000} \cdot 10^4 = 8,62 \text{ мОм}.$$

Активное и индуктивное сопротивления шинпровода:

$$R_{ш} = 0,03 \cdot 10 = 0,3 \text{ мОм}; X_{ш} = 0,014 \cdot 10 = 0,14 \text{ мОм}.$$

Результирующее сопротивление прямой последовательности

$$X_{1\Sigma} = X_c + X_T + X_{ав} + X_{ш} = 0,533 + 8,62 + 0,08 + 0,14 = 9,37 \text{ мОм},$$

$$R_{1\Sigma} = R_T + R_{п} + R_{ав} + R_{ш} = 1,95 + 15 + 0,14 + 0,3 = 17,39 \text{ мОм}.$$

Периодическая составляющая тока КЗ в точке К-1

$$I_{K-1} = \frac{U_{НОМ}}{\sqrt{3} \sqrt{X_{1\Sigma}^2 + R_{1\Sigma}^2}} = \frac{400}{\sqrt{3} \sqrt{9,37^2 + 17,39^2}} = 11,71 \text{ кА}.$$

Ударный ток

$$I_{y1} = \sqrt{2} K_{y1} I_{K-1} = \sqrt{2} \cdot 11,71 \cdot 1,0005 = 16,51 \text{ кА}.$$

Постоянная затухания аperiodической составляющей тока

$$T_a = \frac{X_{\Sigma}}{\omega R_{\Sigma}} = \frac{9,37}{314 \cdot 17,39} = 0,001 \text{ с}.$$

$$\text{Ударный коэффициент } K_{y1} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}} = 1 + e^{-\frac{0,01}{0,001}} = 1,0005.$$

Ток термической стойкости

$$I_T = I_{K-1} \sqrt{\frac{t_{п}}{t_{в}}} = 11,71 \sqrt{\frac{1,5}{3}} = 8,31 \text{ кА}.$$

Расчет тока КЗ в точке К-2 (на шинах РП)

Сопротивления линии КЛ составляют :

$$R_{\text{кл}} = 0,206 \cdot 100 = 20,6 \text{ мОм}; X_{\text{кл}} = 0,07 \cdot 100 = 7 \text{ мОм}.$$

Результирующее сопротивление

$$X_{\text{эрп}} = X_{\text{этп}} + X_{\text{кл}} = 9,37 + 7 = 16,37 \text{ мОм};$$

$$R_{\text{эрп}} = R_{\text{этп}} + R_{\text{кл}} = 17,39 + 20,6 = 37,99 \text{ мОм}.$$

Ток КЗ на шинах РП (точка К-2)

$$I_{\text{К-2}} = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \sqrt{X_{\text{эрп}}^2 + R_{\text{эрп}}^2}} = \frac{400}{\sqrt{3} \sqrt{16,37^2 + 37,99^2}} = 5,59 \text{ кА}.$$

Ударный ток

$$I_{\text{y2}} = \sqrt{2} K_{\text{y2}} I_{\text{К-2}} = \sqrt{2} \cdot 5,59 \cdot 1,004 = 7,88 \text{ кА}.$$

$$\text{Постоянная времени } T_a = \frac{X}{\omega R} = \frac{16,37}{37,99} = 0,001.$$

Ударный коэффициент

$$K_{\text{y2}} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}} = 1 + e^{-\frac{0,01}{0,001}} = 1,004.$$

Пример 7.7

Для примера 7.6 определить периодический ток трехфазного КЗ при подключении к шинам 0,4 кВ подстанции Т асинхронного двигателя М (рис. 7.27 а). Схема замещения представлена на рис. 7.27 б.

Исходные данные для системы, трансформатора, автоматического выключателя такие же, как в примере 7.6.

Асинхронный двигатель серии 4АН355S6У3: мощность $P_{\text{ном}} = 200 \text{ кВт}$, напряжение $U_{\text{ном}} = 380 \text{ В}$, $n_c = 1000 \text{ об/мин}$; $n_{\text{ном}} = 985 \text{ об/мин}$; кратность пускового тока $I_{\text{п}} = 6$; кратность пускового момента $M_{\text{п}} = 1,2$; коэффициент загрузки $K_3 = 0,85$, $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,9$; КПД $\eta_{\text{ном}} = 94 \%$.

Кабельная линия: марка ААШВ-3х120; длина 60 м.

Решение

Номинальный ток двигателя

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}U_{\text{НОМ}}\cos\varphi_{\text{НОМ}}\eta_{\text{НОМ}}} = \frac{200}{\sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 0,9 \cdot 0,94} = 359,61 \text{ А.}$$

Номинальное скольжение двигателя

$$s = \frac{\omega_c - \omega_{\text{НОМ}}}{\omega_c} = \frac{1000 - 985}{1000} = 0,015.$$

Активное сопротивление ротора, приведенное к статору, мОм

$$R_2 = \frac{M_{\text{П}}(P_{\text{НОМ}} + \Delta P_{\text{МЕХ}})C_2 10^6}{3I_{\text{П}}^2 I_{\text{НОМ}}^2 (1 - s_{\text{НОМ}})} = \frac{1,2(200 + 0,01 \cdot 200)1,04^2 \cdot 10^6}{3 \cdot 6^2 \cdot 359,6^2 (1 - 0,015)} = 18,326 \text{ мОм,}$$

где $\Delta P_{\text{МЕХ}} = 0,01P_{\text{НОМ}}$ – механические потери двигателя.Активное сопротивление статора при $K_{\text{М}} = 0,33$.

$$R_1 = \frac{K_{\text{М}}P_{\text{НОМ}}(1 - \eta_{\text{НОМ}})}{3I_{\text{НОМ}}^2 \eta_{\text{НОМ}}} 10^6 = \frac{0,33 \cdot 200(1 - 0,94)}{3 \cdot 359,6^2 \cdot 0,94} 10^6 = 10,86 \text{ мОм,}$$

где $K_{\text{М}} = 0,3 - 0,35$ – отношение потерь в меди статора к суммарным потерям мощности в двигателе при его работе в номинальном режиме.

Суммарное сопротивление

$$R_{\text{ДВ}} = R_1 + R_2 / C_2 = 10,86 + 18,326 / 1,04 = 28,48 \text{ мОм.}$$

Сверхпереходное индуктивное сопротивление двигателя

$$\begin{aligned} X_{\text{ДВ}}'' &= \sqrt{(U_{\text{Ф}} 10^3 / (I_{\text{П}} I_{\text{НОМ}}))^2 - R_{\text{ДВ}}^2} = \\ &= \sqrt{(380 \cdot 10^3 / (\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 359,6))^2 - 28,48^2} = 97,74 \text{ мОм.} \end{aligned}$$

Сверхпереходная ЭДС двигателя

$$E''_{0ДВ} = \sqrt{(U_{0\phi} \cos \varphi - I_0 R_{ДВ})^2 + (U_{0\phi} \sin \varphi - I_0 X''_{ДВ})^2} =$$

$$= \sqrt{(219,65 \cdot 0,9 - 305,66 \cdot 28,48 \cdot 10^{-3})^2 + (219,65 \cdot 0,436 - 305,66 \cdot 97,74 \cdot 10^{-3})^2} =$$

$$= 200,15 \text{ В},$$

где $U_{0\phi} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 219,65 \text{ В}$, $I_0 = I_H K_3 = 359,6 \cdot 0,85 = 305,66 \text{ А}$ – фазное

напряжение и ток статора в режиме, предшествующем КЗ, соответственно.

Активное и индуктивное сопротивление кабельной линии

$$X_{КЛ} = X_{0КЛ} l = 0,076 \cdot 60 = 4,56 \text{ мОм}; R_{КЛ} = R_{0КЛ} l = 0,153 \cdot 60 = 9,18 \text{ мОм}.$$

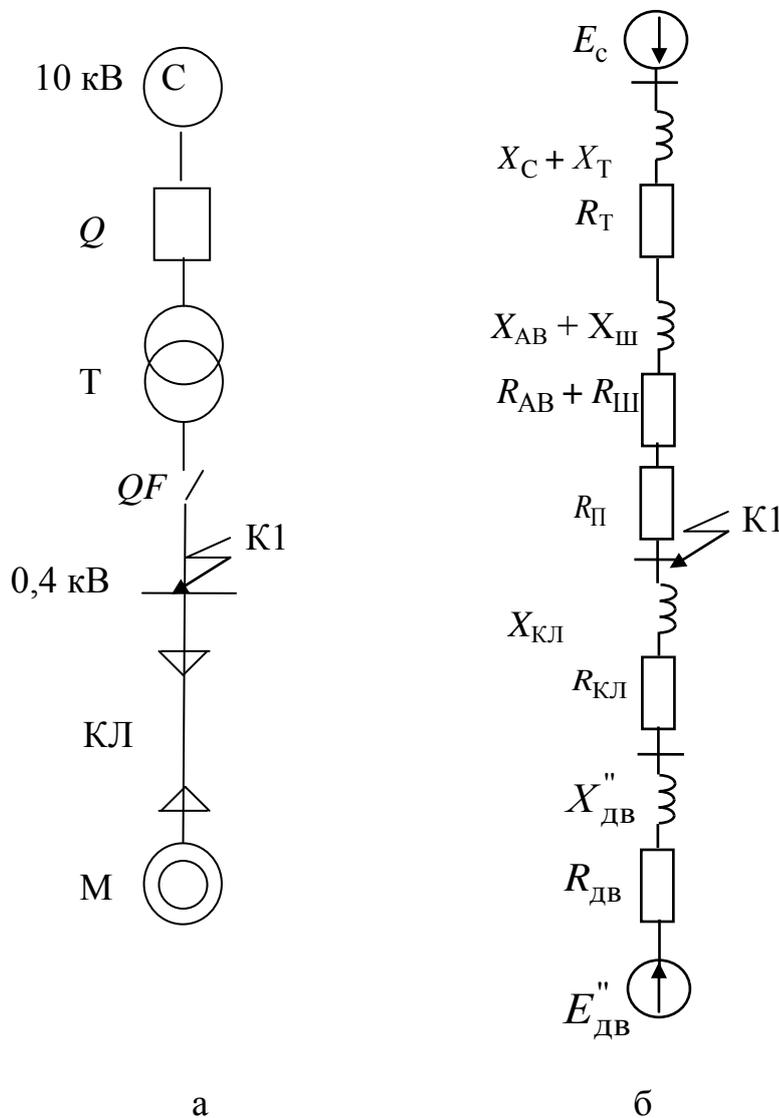


Рис. 7.27. Схема к примеру 7.7:
а – исходная схема, б – схема замещения

Начальное значение периодической составляющей тока от двигателя при КЗ на шинах 0,4 кВ

$$I_{\text{ДВ}}'' = \frac{E_{0\text{ДВ}}''}{\sqrt{(R_{\text{ДВ}} + R_{\text{КЛ}})^2 + (X_{\text{ДВ}}'' + R_{\text{ДВ}})^2}} = \frac{200,15}{\sqrt{(97,74 + 4,56)^2 + (28,48 + 9,18)^2}} = 1,84 \text{ кА.}$$

Начальный ток в месте КЗ $I_{\text{К-1}} = I_{\text{П0С}} + I_{\text{ДВ}}'' = 11,71 + 1,84 = 13,55 \text{ кА.}$

Подпитка от двигателя существенна и составляет 13,6 % от суммарного тока КЗ в точке К-1.

Пример 7.8

Для схемы, приведенной в примере 7.6 определить токи при двух- и однофазном КЗ в точке К1. Для трехфазного КЗ определить максимальные и минимальные значения тока КЗ. Расчетная схема к примеру 7.6 и ее преобразование представлены на рис. 7.28.

Данные параметров схемы замещения прямой последовательности из примера 7.6. Сопротивление нулевого проводника, мОм/м $R_{\text{НП}} = 0,037$, $X_{\text{НП}} = 0,042$. Сопротивление системы $X_{\text{С}} = 0,533 \text{ мОм.}$

Активное и индуктивное сопротивления трансформаторов $R_{\text{Т1}} = 1,95 \text{ мОм; } X_{\text{Т1}} = 8,62 \text{ мОм,}$ автоматического выключателя $R_{\text{ав}} = 0,14 \text{ мОм; } X_{\text{ав}} = 0,08 \text{ мОм,}$ шинпровода $R_{\text{Ш}} = 0,30 \text{ мОм; } X_{\text{Ш}} = 0,14 \text{ мОм.}$

Активное сопротивление дуги определим по кривым в зависимости от длины кабельной линии и мощности трансформатора, как указано в [1]: $R_{\text{д}} = 5,6 \text{ мОм.}$

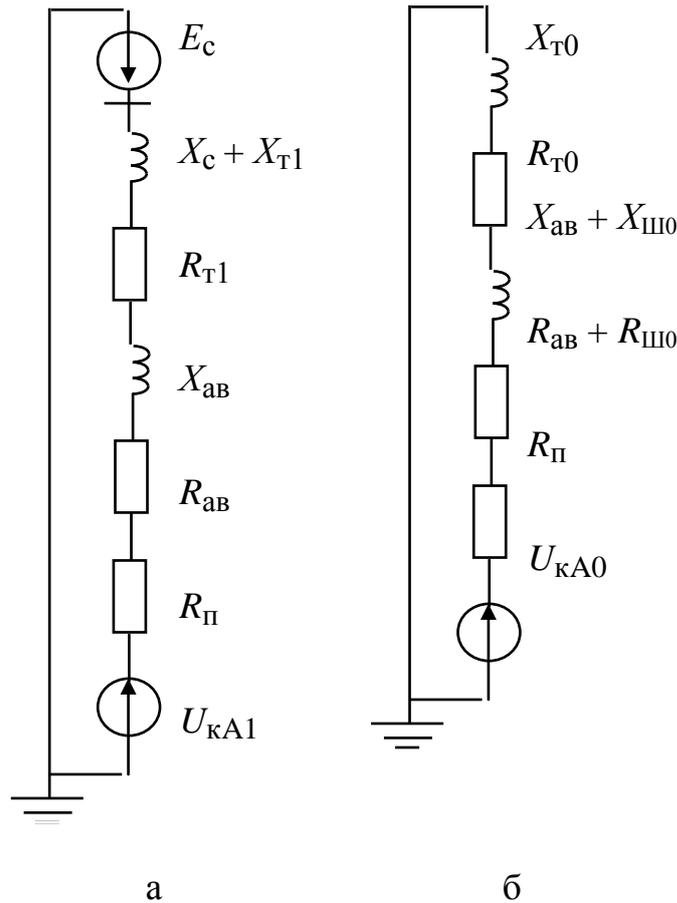


Рис. 7.28. Схема замещения:

а – прямой последовательности, б – нулевой последовательности

Так как электроснабжение электроустановки напряжением до 1 кВ осуществляется от энергосистемы через понижающий трансформатор, то начальное значение периодической составляющей тока однофазного КЗ от системы ($I_{п0}^{(1)}$) в кА рассчитывают по формуле

$$I_{к-1} = \frac{\sqrt{3}U_{\phi}}{\sqrt{(2X_{1\Sigma} + X_{0\Sigma})^2 + (2R_{1\Sigma} + R_{0\Sigma})^2}},$$

где $X_{1\Sigma} = 9,37$ мОм; $R_{1\Sigma} = 17,39$ мОм – суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивления прямой последовательности расчетной схемы относительно точки КЗ, мОм; $R_{0\Sigma}$ и $X_{0\Sigma}$ – суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивления нулевой последовательности расчетной схемы относительно точки КЗ, мОм. Эти сопротивления равны:

$$R_{0\Sigma} = R_{T0} + R_{ав} + R_{Ш0} + R_{П} + R_{д};$$

$$X_{0\Sigma} = X_{T0} + X_{ав} + X_{Ш0},$$

где R_{T0} , X_{T0} – активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательностей трансформатора.

Активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности шинпровода:

$$R_{Ш0} = R_{Ш1} + 3R_{НП} = 0,3 + 3 \cdot 0,037 \cdot 10 = 1,41 \text{ мОм} \text{ и } X_{Ш0} = (0,75 - 9,4) X_{Ш1} = \\ = 5 \cdot 0,14 = 0,7 \text{ мОм}.$$

Параметры схемы замещения нулевой последовательности.

$$R_{T0} = 19,1 \text{ мОм}; X_{T0} = 60,6 \text{ мОм}; \\ R_{НП} = 0,037 \cdot 10 = 0,37 \text{ мОм}; X_{НП} = 0,042 \cdot 10 = 0,42 \text{ мОм}.$$

Результирующее сопротивление нулевой последовательности

$$R_{0\Sigma} = 1,95 + 1,41 + 0,14 + 15 = 18,5 \text{ мОм}.$$

С учетом сопротивления дуги

$$R_{0\Sigma} = 18,5 + 5,6 = 24,1 \text{ мОм}. \\ X_{0\Sigma} = 8,62 + 0,7 + 0,08 = 9,4 \text{ мОм}.$$

Ток однофазного КЗ без учета сопротивления дуги в точке К1

$$I_{K-1}^{(1)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 400}{\sqrt{(2 \cdot 9,37 + 9,4)^2 + (2 \cdot 17,39 + 18,5)^2}} = 11,53 \text{ кА}.$$

Ток однофазного КЗ с учетом сопротивления дуги в точке К1

$$I_{K-1}^{(1)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 400}{\sqrt{(2 \cdot 9,37 + 9,4)^2 + (2 \cdot 17,39 + 24,1)^2}} = 10,6 \text{ кА}. \\ I_{п0}^{(1)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 400}{\sqrt{(2 \cdot 2,24 + 20,66)^2 + (2 \cdot 9,64 + 62,08)^2}} = 8,13 \text{ кА}.$$

Ударный ток

$$I_{y1} = \sqrt{2}K_{y1}I_{K-1} = \sqrt{2} \cdot 11,53 \cdot 1,0005 = 16,89 \text{ кА.}$$

Постоянная затухания апериодической составляющей тока

$$T_a = \frac{X_\Sigma}{\omega R_\Sigma} = \frac{9,23}{314 \cdot 17,09} = 0,001 \text{ с.}$$

Ударный коэффициент

$$K_{y1} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}} = 1 + e^{-\frac{0,01}{0,001}} = 1,0005.$$

Ток термической стойкости

$$I_T = I_{K-1} \sqrt{\frac{t_{II}}{t_B}} = 11,53 \sqrt{\frac{1,5}{3}} = 8,47 \text{ кА,}$$

$$i_{a0 \text{ max}} = \sqrt{2} I_{п0 \text{ max}} = 32,9 \text{ кА;}$$

$$i_{a0 \text{ min}} = \sqrt{2} I_{п0 \text{ min}} = 26,23 \text{ кА.}$$

Расчет токов однофазного КЗ

$$R_{0\Sigma} = R_T + R_{0III} + R_{KB} + R_K = 19,1 + 0,3 + 3 \cdot 0,37 + 0,14 + 0,012 = 20,66 \text{ мОм;}$$

$$R_{0III} = R_{IIII} + 3R_{HIII};$$

$$X_{0\Sigma} = X_{0T} + X_{0III} - X_{KB} = 60,6 + 0,14 + 3 \cdot 0,42 + 0,08 = 62,08 \text{ мОм;}$$

$$R_{0\Sigma} = R_{0\Sigma} + R_D = 20,66 + 8,6 = 29,26 \text{ мОм;}$$

$$I_{п0}^{(1)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 400}{\sqrt{(2 \cdot 2,24 + 20,66)^2 + (2 \cdot 9,64 + 62,08)^2}} = 8,13 \text{ кА.}$$

Ток однофазного КЗ с учетом активного сопротивления дуги

$$I_{п0}^{(1)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 400}{\sqrt{(2 \cdot 7,84 + 29,26)^2 + (2 \cdot 9,64 + 62,08)^2}} = 7,46 \text{ кА.}$$

Расчет токов двухфазного КЗ

$$I_{п0}^{(2)} = \frac{400}{2\sqrt{2,24^2 + 9,64^2}} = 20,21 \text{ кА.}$$

Ток двухфазного КЗ с учетом активного сопротивления дуги:

$$I_{п0}^{(2)} = \frac{400}{2\sqrt{(2,24 + 2,8)^2 + 9,64^2}} = 18,39 \text{ кА.}$$

Результаты расчета токов КЗ сведены в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Результаты расчета токов КЗ к примеру 7.8

Точка КЗ	Вид КЗ	Максимальное значение тока КЗ, кА			Минимальное значение тока КЗ, кА		
		$I_{п0}$	i_{a0}	i_y	$I_{п0}$	i_{a0}	i_y
К-1	К ⁽³⁾	23,33	32,9	47,84	18,6	26,23	28,32
К-1	К ⁽¹⁾	8,13	—	—	7,46	—	—
К-1	К ⁽²⁾	20,21	—	—	18,39	—	—

Пример 7.9

Определить ток при простом металлическом замыкании на землю в сети напряжением 37 кВ, выполненной воздушной линией протяженностью 200 км.

Исходные данные: воздушная линия марки АС-95; расположение проводов по вершинам треугольника с расстоянием $d_{ab} = 4,06$ м, $d_{ac} = 3,5$ м, $d_{bc} = 3,09$ м. Высота подвеса провода $h_a = h_c = 8$ м, $h_b = 11$ м.

Решение

При заданных параметрах линии радиус провода

$$R = 6,75 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Среднее геометрическое расстояние между проводами

$$D_{cp} = \sqrt[2]{4,06 \cdot 3,5 \cdot 3,09} = 3,53 \text{ м.}$$

Средний геометрический радиус системы трех проводов

$$R'_{cp} = \sqrt[3]{6,75 \cdot 10^{-3} \cdot 3,53^2} = 0,44 \text{ м.}$$

Среднее расстояние проводов фаз а, в и с до их зеркальных отражений относительно поверхности земли

$$D_c = 2 \frac{8+11+8}{3} = 18 \text{ м.}$$

Емкостное реактивное сопротивление 1 км линии

$$X_{c0} = 396 \left(\lg \frac{18}{0,44} \right) 10^3 = 636 \cdot 10^3 \text{ Ом.}$$

Емкостное реактивное сопротивление всей линии

$$X_{c0} = \frac{636 \cdot 10^3}{200} = 3180 \text{ Ом.}$$

Искомый ток замыкания на землю

$$I_{3C} = 3 \frac{37000}{\sqrt{3}(-j3180)} = j20 \text{ А.}$$

Чтобы полностью скомпенсировать ток замыкания на землю нужно нейтраль обмотки 37 кВ трансформатора заземлить через катушку с индуктивным сопротивлением

$$X_L = \frac{3180}{3} = 1060 \text{ Ом.}$$

Пример 7.10.

Рассчитать значение емкостного тока замыкания на землю распределительной сети и индуктивности дугогасящего реактора для

полной компенсации первой гармоники емкостной составляющей тока замыкания. Сеть напряжением 10 кВ имеет четыре кабельных линии длиной $l_1 = 1,5$ км; $l_2 = 1,8$ км; $l_3 = 2,4$ км и $l_4 = 2,1$ км, удельные емкости кабелей равны $C_{уд1} = C_{уд2} = C_{уд3} = C_{уд4} = 0,37 \cdot 10^{-6}$ Ф/км. Емкость электроприемников не учитываем.

Решение

Емкостной ток замыкания на землю определим по выражению

$$I_{3C} = \sqrt{3}U_{\text{ном}}\omega C_{\text{уд}}l_{\Sigma},$$

$$I_{3C} = \sqrt{3} \cdot 10000 \cdot 314 \cdot 0,37 \cdot 10^{-6} (1,5 + 1,8 + 2,4 + 2,1) = 15,67 \text{ А.}$$

Индуктивность дугогасящего реактора при условии, что $I_L = I_{3C}$,

$$L_p = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}\omega I_{3C}} = \frac{10000}{\sqrt{3} \cdot 314 \cdot 15,67} = 1,17 \text{ Гн.}$$

8. ВАРИАНТЫ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

Каждая контрольная работа должна быть выполнена на листах формата А4 чернилами любого цвета, кроме красного. Необходимо оставлять поля для замечаний рецензента шириной 4–5 см.

На титульном листе пишутся название учебного заведения, наименование дисциплины, тема контрольного задания, название контрольного задания, фамилия и инициалы студента, номер группы, адрес студента, телефон, дата выполнения работы, ставится подпись студента. В конце работы следует оставить несколько чистых листов для рекомендаций и исправлений рецензента.

Контрольная работа должна содержать: полученное задание, исследуемую систему и её схему замещения с указанием всех расчетных параметров системы, необходимые вычисления с комментариями и результатами расчетов в виде таблиц и графиков. Работа должна быть выполнена в строго указанные сроки. Выполнить задание № 1 или № 2 для схемы и варианта, указанного преподавателем.

Задание № 1

В электрической системе в точке К (рис. 8.1–8.9) произошло трехфазное короткое замыкание (КЗ). Система С характеризуется как источник неизменного напряжения. На шинах системы значение

напряжения принять равным $U_{\text{ср ном}}$. Исходные данные для расчета приведены в табл. 8.1–8.45. Требуется определить:

1. Периодическую составляющую тока КЗ в начальный момент $I_{\text{п0}}$.
2. Ударный ток короткого замыкания $I_{\text{у}}$.
3. Аперiodическую составляющую тока КЗ в момент τ расхождения

контактов выключателя $I_{\text{ат}}$ (принять $\tau = 0,08$ с).

Расчет провести в системе относительных единиц при точном приведении. Рекомендации для определения активных сопротивлений элементов сети:

1. Для определения сопротивлений трансформаторов и автотрансформаторов принять $X_{\text{T}}/R_{\text{T}} = 10$ для трансформаторов мощностью $S_{\text{ном}} \leq 25$ МВ·А и $X_{\text{T}}/R_{\text{T}} = 25$ для трансформаторов мощностью $S_{\text{ном}} > 25$ МВ·А.

2. Для обобщенной нагрузки принять $X_{\text{H}}/R_{\text{H}} = 4 - 5$.

3. Для генераторов, синхронных компенсаторов и двигателей принять режим работы до короткого замыкания с коэффициентом мощности $\cos\varphi_{\text{H}}$ и с номинальным напряжением при заданной нагрузке.

Начертить осциллограмму полного тока КЗ.

Задание № 2

При трехфазном КЗ в точке К исходной схемы (рис. 8.1–8.10) определить периодическую составляющую тока КЗ. При определении использовать метод типовых кривых. Принять собственное время отключения выключателя $\tau = 0,1$ с. Из расчетной схемы исключить все нагрузочные ветви и ветви, содержащие асинхронные электродвигатели.

Таблица 8.1

Данные для генераторов и нагрузки схемы № 1

№ варианта	Генераторы Г1, Г2, Г3							Нагрузка НГ	
	$P_{\text{ном}}$, МВт	$\cos\varphi$, о. е.	X'_d , о. е.	X_2 , о. е.	$R \cdot 10^{-3}$, о. е.	$U_{\text{ном}}$, кВ	$P_0/P_{\text{ном}}$, о. е.	$S_{\text{НГ1}}$, МВ·А	$S_{\text{НГ2}}$, МВ·А
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	100	0,85	0,18	0,22	2,2	10,5	0,8	100	100
2	150	0,85	0,21	0,26	2,0	18	0,85	100	200

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	200	0,85	0,19	0,23	2,0	15,75	1	150	200
4	300	0,85	0,2	0,24	2,6	20	0,7	300	300
5	500	0,85	0,24	0,29	2,8	20	0,8	300	200
6	800	0,85	0,27	0,33	2,4	25	1	300	300

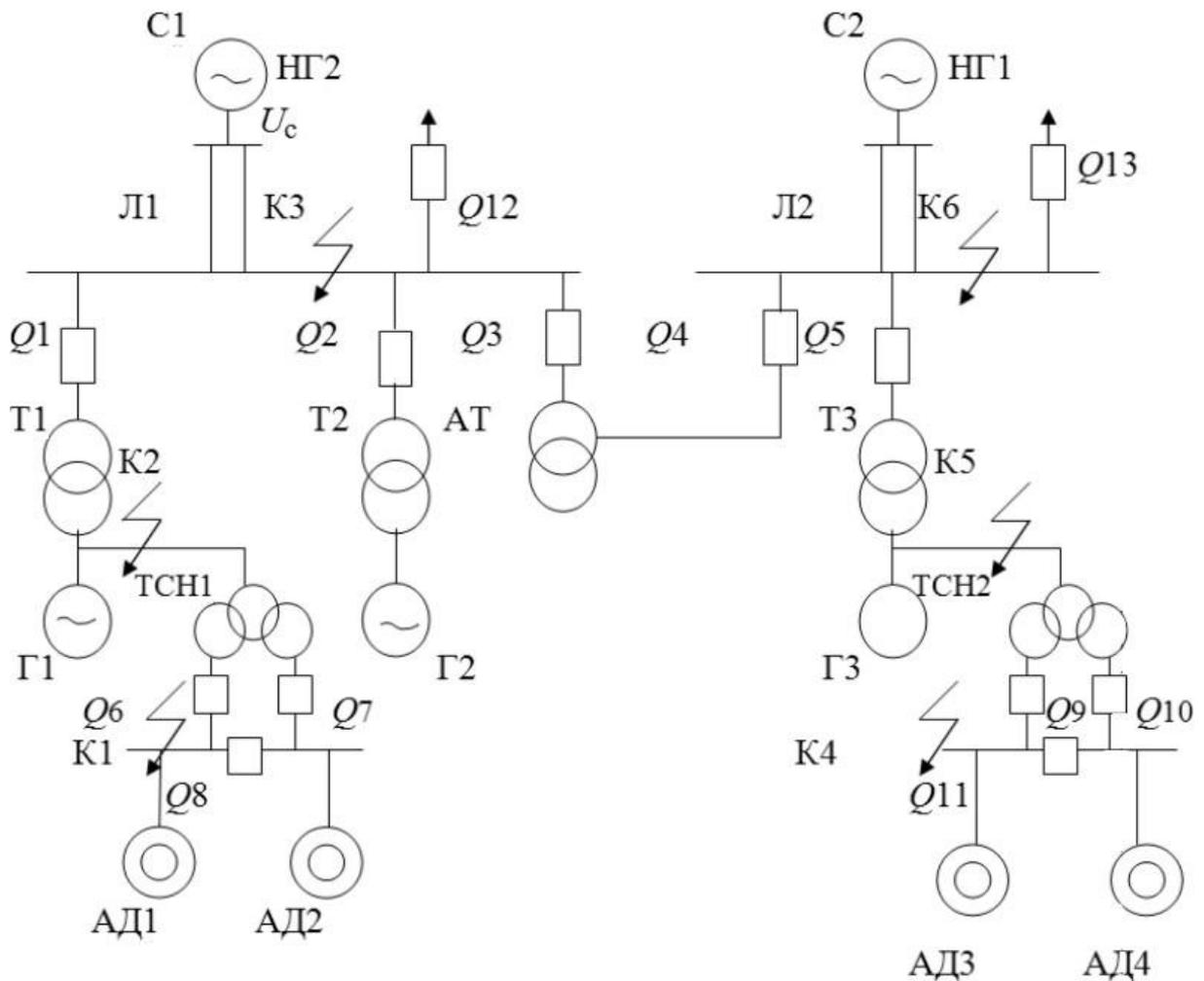


Рис. 8.1. Схема № 1

Таблица 8.2

Данные для трансформаторов и автотрансформатора схемы № 1

№ варианта	Трансформаторы Т1, Т2, Т3					Автотрансформатор АТ		
	$S_{HT},$ МВ·А	$K_{T1},$ о. е.	$K_{T2},$ о. е.	$U_K, \%$		$S_{HAT},$ МВ·А	$K_{TB-C},$ кВ	$U_{BC},$ %
				Т1, Т2	Т3			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	125	254/10,5	127/10,5	11	10,5	125	230/135,5	11

1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	200	248/18	124/18	11	10,5	200	230/135,5	11
3	250	317/15,7 5	121/15,7 5	11	11	250	330/128,8	10
4	400	347/20	118/20	11	11	400	330/121,9	10
5	630	525/20	242/20	14	11	500	500/257,6	9,5
6	1000	525/24	253/24	14	11	500	500/243,8	9,5

Таблица 8.3

Данные для линий схемы № 1

№ вари- анта	Линия Л1			Линия Л2		
	l , км	X_0 , Ом/км	R_0 , Ом/км	l , км	X_0 , Ом/км	R_0 , Ом/км
1	120	0,43	0,13	40	0,41	0,17
2	150	0,42	0,11	50	0,41	0,21
3	220	0,33	0,065	60	0,41	0,13
4	200	0,33	0,065	80	0,42	0,13
5	300	0,29	0,026	100	0,43	0,13
6	400	0,29	0,026	120	0,43	0,13

Таблица 8.4

Данные для трансформатора собственных нужд
и асинхронного двигателя схемы № 1

№ вари- анта	Асинхронный двигатель АД						Трансформатор ТСН		
	$P_{НОМ}$, МВт	$\cos\varphi$, о. е.	$U_{НОМ}$ кВ	$I_{П}/$ $I_{НОМ}$, о. е.	$P_0/$ $P_{НОМ}$, о. е.	$M_{П}/$ $M_{НОМ}$ о. е.	$S_{ТСН}$, МВ·А	$K_{с-н}$, о. е.	U_K , %
1	2,5	0,9	6	5,6	0,8	0,9	6,3	10,5/(6,3–6,3)	8
2	3,2	0,9	6	6,4	0,9	0,7	10	18/(6,3 – 6,3)	8
3	5	0,91	6	5,6	1,0	0,7	16	15,8/(6,3 – 6,3)	10
4	8	0,88	6	5,6	0,75	0,7	25	20/(6,3 – 6,3)	9,5
5	8	0,92	6	5,6	0,8	0,8	32	20/(6,3 – 6,3)	11,5
6	8	0,87	6	5,6	0,8	0,8	63	24/(6,3 – 6,3)	11,5

Данные для составления расчетной схемы № 1

№ варианта	Задание № 1		Задание № 2	
	Точка КЗ	Включены выключатели	Точка КЗ	Включены выключатели
1	К1	$Q1, Q6, Q7$	К2	$Q1, Q2$
2	К2	$Q1, Q6, Q7$	К2	$Q1, Q2$
3	К3	$Q1, Q6, Q7, Q12$	К3	$Q1, Q2$
4	К4	$Q5, Q9, Q10$	К5	$Q2, Q3, Q4, Q5$ (С1 отк.)
5	К5	$Q5, Q9, Q10$	К5	$Q2, Q3, Q4, Q5$ (С1 отк.)
6	К6	$Q5, Q9, Q10, Q13$	К6	$Q2, Q3, Q4, Q5$ (С2 отк.)
7	Пуск АД1	$Q1, Q6, Q7$	К2	$Q1, Q2, Q3, Q4$ (С2 отк.)
8	Пуск АД3	$Q5, Q9, Q10$	К5	$Q2, Q3, Q4, Q5$ (С2 отк.)

Примечания. 1. Все выключатели, не указанные в графах табл. 8.5, считать разомкнутыми.

2. Выключатели $Q8, Q11$ включены при мощности генераторов Г1 – Г3 менее 200 мВт и отключены при мощности генераторов Г1 – Г4, равной или более 200 мВт.

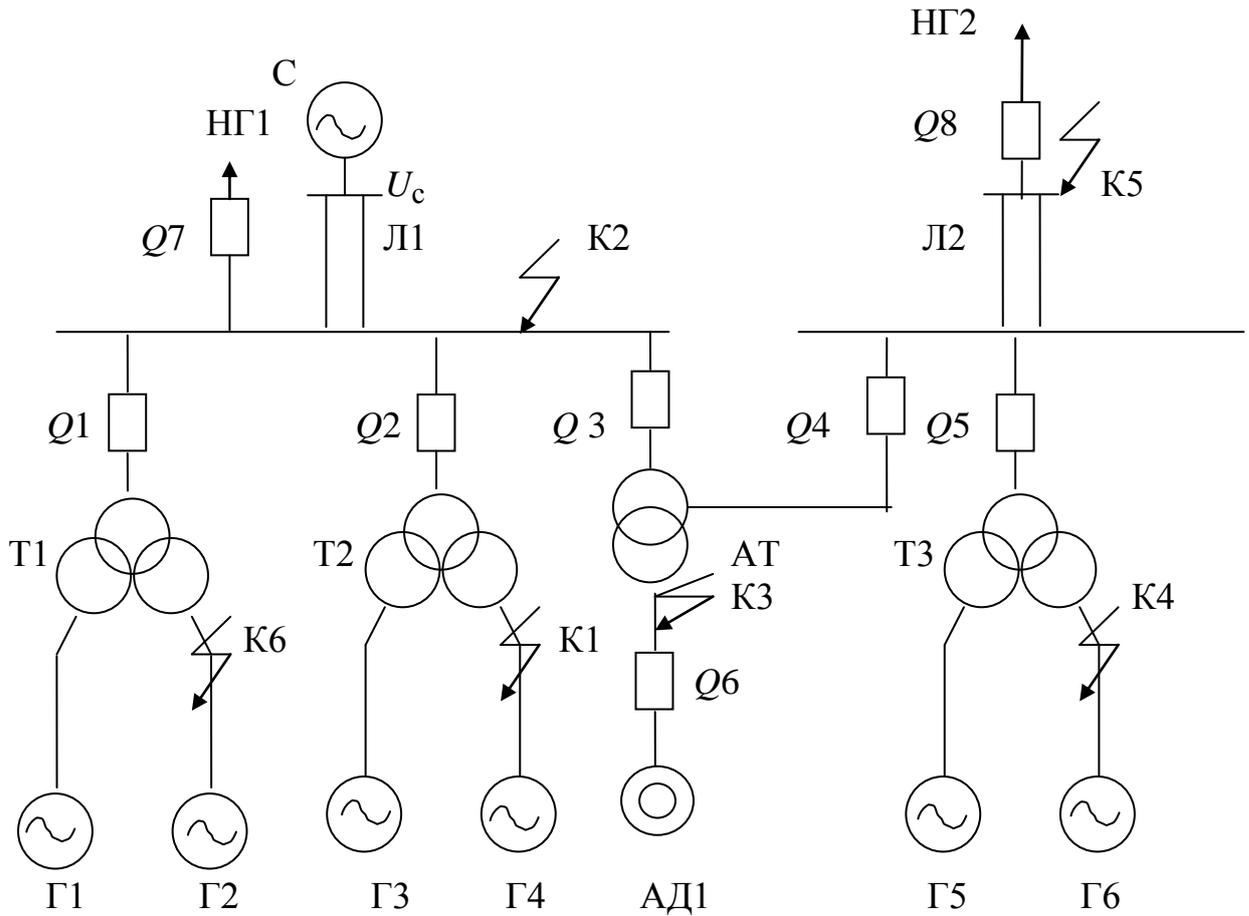


Рис. 8.2. Схема № 2

Таблица 8.6

Данные для генераторов и нагрузки схемы № 2

№ варианта	Генераторы Г1, Г2, Г3, Г4, Г5, Г6							Нагрузка НГ	
	$P_{\text{НОМ}}$, МВт	$\cos\varphi$, о. е.	X'_d , о. е.	X_2 , о. е.	$R \cdot 10^{-3}$, о. е.	$U_{\text{НОМ}}$, кВ	$P_0/P_{\text{НОМ}}$, о. е.	$S_{\text{НГ1}}$, МВ·А	$S_{\text{НГ2}}$, МВ·А
1	30	0,8	0,23	0,29	7	10,5	0,8	20	100
2	40	0,8	0,22	0,29	7	10,5	0,85	25	100
3	60	0,9	0,21	0,26	6	10,5	0,9	30	120
4	100	0,85	0,21	0,26	5	13,8	0,7	40	150
5	120	0,9	0,18	0,22	4	10,5	0,8	40	160
6	180	0,85	0,17	0,21	4	13,8	0,9	100	250
7	200	0,85	0,21	0,26	3	15,75	0,7	100	250
8	300	0,85	0,22	0,26	3	20	0,8	100	250
9	500	0,85	0,3	0,32	2	20	1	150	300

Таблица 8.7

Данные для трансформаторов схемы № 2

№ вари- анта	Трансформаторы Т1, Т2, Т3				
	S_{HT} , МВ·А	K_{T1} , о. е.	K_{T2} , о. е.	U_K , %	
				Т1, Т2	Т3
1	100	242/10,5–10,5	121/10,5–10,5	12	10,5
2	100	236/10,5–10,5	121/10,5–10,5	12	10,5
3	160	218/10,5–10,5	121/10,5–10,5	12	10,5
4	250	347/13,8–13,8	121/13,8–13,8	11	10,5
5	250	347/11–11	121/11–11	11	10,5
6	400	347/13,8–13,8	230/13,8–13,8	11	11
7	500	525/15,75–15,75	230/15,75–15,75	11	11
8	630	525/20–20	230/20–20	14	11
9	1250	525/20–20	230/20–20	14	11

Таблица 8.8

Данные для линий схемы № 2

№ варианта	Линия Л1			Линия Л2		
	l , км	X_0 , Ом/км	R_0 , Ом/км	l , км	X_0 , Ом/км	R_0 , Ом/км
1	80	0,43	0,13	30	0,4	0,13
2	100	0,41	0,08	30	0,4	0,13
3	150	0,41	0,08	40	0,4	0,11
4	200	0,41	0,08	50	0,4	0,11
5	200	0,29	0,08	100	0,4	0,11
6	250	0,29	0,03	150	0,42	0,11
7	250	0,29	0,03	120	0,42	0,11
8	250	0,29	0,03	140	0,42	0,11
9	300	0,29	0,03	150	0,42	0,11

Таблица 8.9

Данные для асинхронного двигателя и автотрансформатора схемы № 2

№ ва- ри- анта	Асинхронный двигатель АД						Автотрансформатор АТ		
	$P_{НОМ}$, МВт	$\cos\varphi$, о.е.	$U_{НОМ}$ кВ	$I_{П}/$ $I_{НОМ}$ о.е.	$P_0/$ $P_{НОМ}$ о.е.	$M_{П}/$ $M_{НОМ}$ о.е.	$S_{ТСН}$ МВ· А	$K_{ат}$, о.е.	$U_{КВС}/U_{КВН}/$ $U_{КСН}$, %
1	3,2	0,9	6	6,5	0,87	0,7	100	230/135/6,3	11/31/19
2	4	0,9	6	6,4	0,9	0,7	100	230/128/6,3	11/31/19
3	5	0,91	6	5,6	0,7	0,7	160	230/123/6,3	11/31/19
4	4	0,91	6	6,4	0,75	0,7	200	347/106/6,3	10/34/22
5	3,2	0,91	6	6,3	0,8	0,7	200	347/113/6,3	10/34/22
6	8	0,91	6	5,4	1	0,8	250	347/253/6,3	10/34/22
7	8	0,91	6	5,4	0,7	0,8	400	525/242/11	10/29/17
8	8	0,91	6	5,4	0,85	0,8	500	525/237/11	10/29/17
9	5	0,91	6	5,6	0,85	0,8	630	525/242/11	10/29/17

Таблица 8.10

Данные для составления расчетной схемы № 2

№ вари- анта	Задание № 1		Задание № 2	
	Точка КЗ	Включены выключатели	Точка КЗ	Включены выключатели
1	К1	$Q2, Q7$	К1	$Q1, Q2$
2	К2	$Q2, Q3, Q6$	К2	$Q1, Q2$
3	К2	$Q1, Q7$	К3	$Q1, Q2$
4	К3	$Q2, Q3, Q6$	К5	$Q2, Q3, Q4, Q5$ (С1 отк.)
5	К4	$Q3, Q4, Q5, Q8$	К5	$Q2, Q3, Q4, Q5$ (С1 отк.)
6	К4	$Q3, Q4, Q5, Q6$	К6	$Q2, Q3, Q4, Q5$ (С1 отк.)
7	К5	$Q3, Q4, Q5, Q8$	К2	$Q1, Q2, Q3, Q4$ (С2 отк.)
8	К6	$Q1, Q2, Q7$	К5	$Q2, Q3, Q4, Q5$ (С2 отк.)

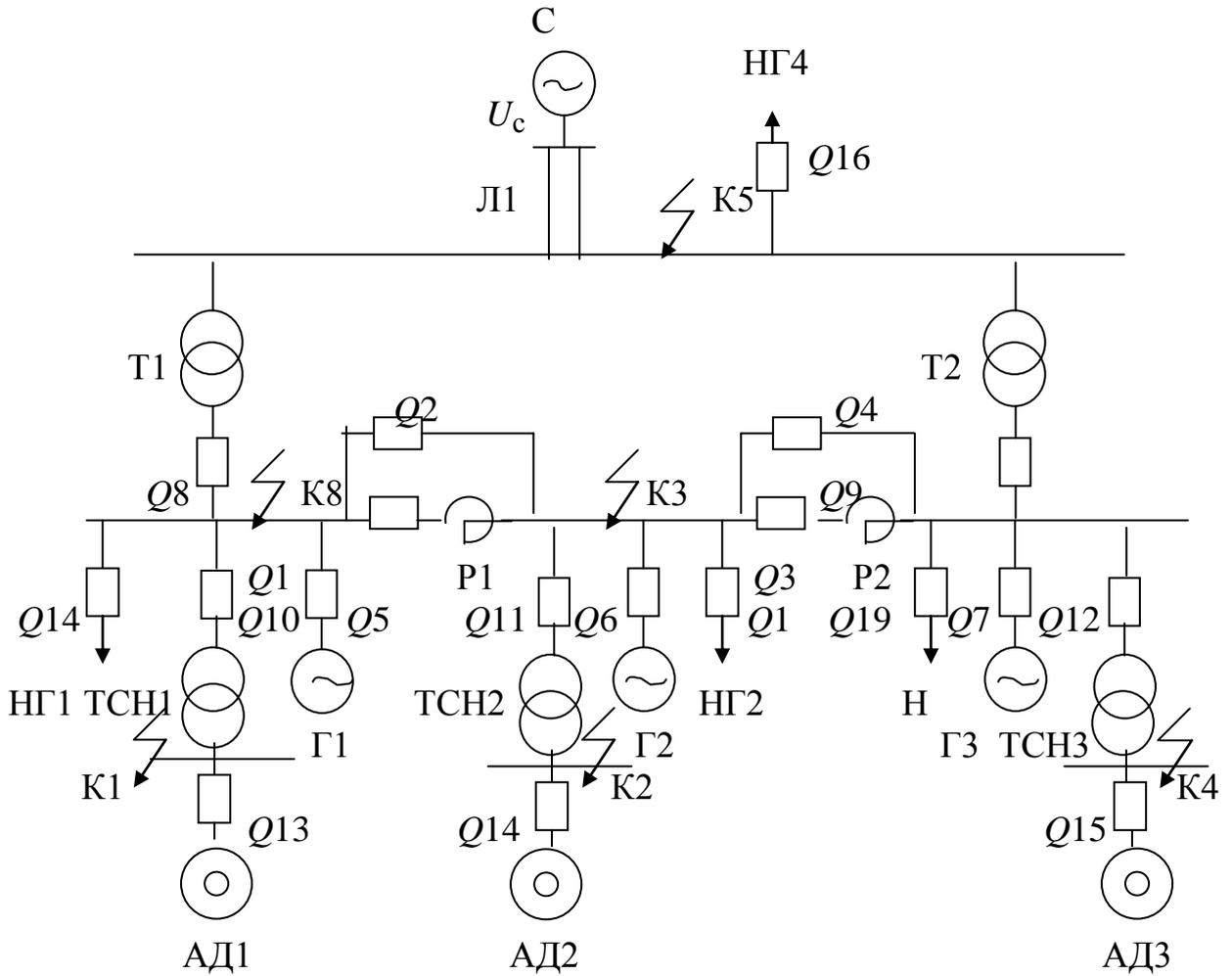


Рис. 8.3. Схема 3

Таблица 8.11

Данные для генераторов и комплексной нагрузки схемы № 3

№ варианта	Генераторы Г1, Г2, Г3							Нагрузка НГ1–НГ4	
	$P_{\text{НОМ}}$	$\cos\varphi$	X'_d	X_2	$R \cdot 10^{-3}$	$U_{\text{НОМ}}$	$P_0/P_{\text{НОМ}}$	$S_{\text{НГ1}} =$ $= S_{\text{НГ2}} =$ $= S_{\text{НГ3}}$	$S_{\text{НГ4}}$
	МВт	о. е.	о. е.	о. е.	о. е.	кВ	о. е.	МВ·А	МВ·А
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	30	0,8	0,15	0,18	3,2	10,5	1,0	60	30
2	55	0,8	0,12	0,15	2,4	10,5	0,85	70	40

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	60	0,8	0,15	0,18	2,9	10,5	0,75	60	40
4	100	0,85	0,18	0,22	1,7	10,5	0,85	140	100
5	500	0,85	0,24	0,29	2,8	20	0,8	300	200
6	800	0,85	0,27	0,33	2,4	25	1	300	300

Таблица 8.12

Данные для трансформаторов
и трансформаторов собственных нужд схемы № 3

№ вариан- та	Трансформаторы Т1, Т2			Трансформаторы собственных нужд ТСН1, ТСН2, ТСН3		
	S_{HT}	K_{T1}	U_{KB-C}	$S_{нат}$	K_{B-C}	U_{KB-C}
	МВ·А	о.е.	%	МВ·А	о. е.	%
1	40	120,75/10,5	10,5	2,5	10/6,3	5,5
2	63	241,5/10,5	10,5	6,3	10/6,3	6,5
3	40	117,87/10,5	10,5	6,3	10/6,3	8
4	100	241,5/10,5	12	10	10/6,3	14
5	630	525/20	12	500	500/257,6	9,5
6	1000	525/24	12	500	500/243,8	9,5

Таблица 8.13

Данные для реакторов и линии схемы № 3

№ вариан- та	Реакторы Р1, Р2				Линия Л1		
	$I_{НОМ}$	$U_{НОМ}$	X_p	$\Delta P_{НОМ \phi}$	l	X_0	R_0
	кА	кВ	Ом	кВт	км	Ом/км	Ом/км
1	1,6	10	0,35	14,3	40	0,4	0,13
2	2,5	10	0,35	25,7	50	0,4	0,17
3	2,5	10	0,35	25,7	60	0,39	0,11
4	4	10	0,18	29,7	80	0,41	0,08
5	4	10	0,18	29,7	80	0,41	0,08
6	4	10	0,18	29,7	80	0,41	0,08

Таблица 8.14

Данные для асинхронных двигателей схемы № 3

№ вари- анта	Асинхронный двигатель АД1, АД2, АД3					
	$P_{\text{НОМ}}$	$\cos\varphi$	$U_{\text{НОМ}}$	$I_{\text{П}}/I_{\text{НОМ}}$	$P_0/P_{\text{НОМ}}$	$M_{\text{П}}/M_{\text{НОМ}}$
	МВт	о. е.	кВ	о. е.	о. е.	о. е.
1	2	0,9	6	5,5	0,87	0,8
2	3	0,91	6	5,6	0,9	0,7
3	5	0,91	6	5,6	0,7	0,7
4	8	0,91	6	5,4	0,75	0,8
5	3,2	0,91	6	6,3	0,8	0,7
6	8	0,91	6	5,4	1	0,8

Таблица 8.15

Дополнительные данные для расчетной схемы № 3

№ вари- анта	Задание № 1		Задание № 2	
	Точка КЗ	Включены выключатели	Точка КЗ	Включены выключатели
1	К1	$Q5, Q8, Q10, Q13$	К6	$Q5, Q7, Q8, Q9$
2	К6	$Q5, Q8, Q10, Q13$	К6	$Q5, Q7, Q8, Q9$
3	К2	$B3, Q4, Q5, Q6, Q7, Q8, Q9, Q11, Q14$	К3	$Q1, Q3, Q5, Q7, Q8, Q9$
4	К3	$Q2, Q4, Q5, Q6, Q7, Q8, Q9, Q17, Q18, Q19$	К3	$Q2, Q4, Q5, Q6, Q7, Q8, Q9,$
5	К6	$Q2, Q4, Q5, Q7, Q8, Q9, Q17, Q19$	К6	$Q2, Q4, Q5, Q7, Q8, Q9$
6	К6	$Q1, Q4, Q5, Q7, Q8, Q9, Q17, Q19$	К6	$Q1, Q4, Q5, Q7, Q8, Q9$
7	К6	$Q1, Q4, Q5, Q7, Q8, Q9$	К6	$Q1, Q4, Q5, Q7, Q8, Q9$
8	К5	$Q2, Q4, Q5, Q6, Q7, Q8, Q9, Q16$	К5	$Q5, Q7, Q8, Q9$
9	Пуск АД1	$Q5, Q8, Q10, Q13$	К6	$Q5, Q7, Q8, Q9$
10	Пуск АД2	$Q2, Q4, Q5, Q6, Q7, Q8, Q9, Q14$	К3	$Q2, Q4, Q5, Q6, Q7, Q8, Q9,$

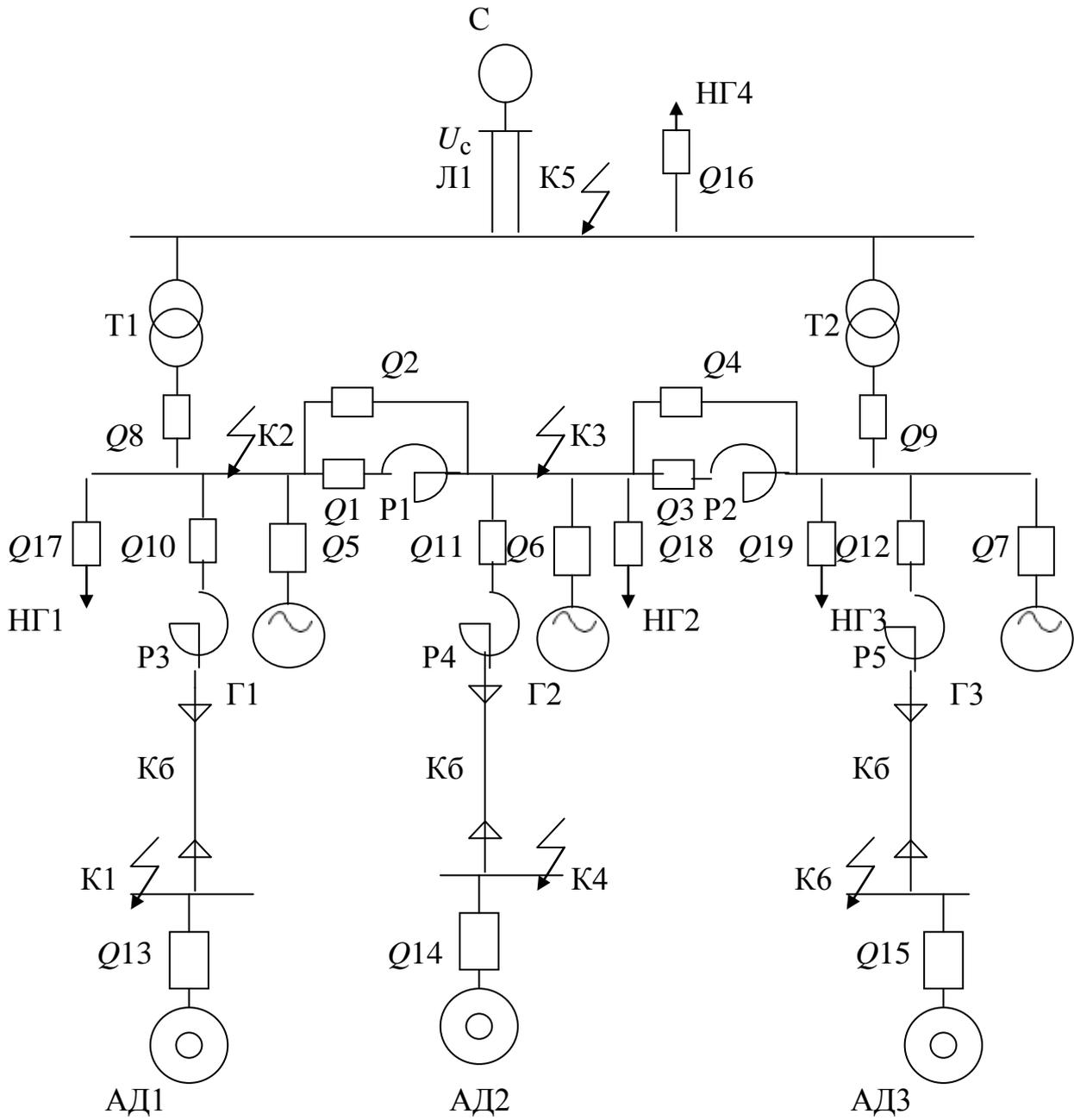


Рис. 8.4. Схема № 4

Таблица 8.16

Данные для генераторов и нагрузки схемы № 4

№ вари- анта	Генераторы Г1, Г2, Г3							Нагрузка НГ1–НГ4	
	$P_{\text{НОМ}}$	$\cos\varphi$	X'_d	X_2	$R \cdot 10^{-3}$	$U_{\text{НОМ}}$	$P_0/P_{\text{НОМ}}$	$S_{\text{НГ1}} =$ $= S_{\text{НГ2}} =$ $S_{\text{НГ3}}$	$S_{\text{НГ4}}$
	МВт	о. е.	о. е.	о. е.	о. е.	кВ	о. е.	МВ·А	МВ·А
1	12	0,8	0,13	0,14	1,8	6,3	1,0	25	20
2	30	0,8	0,14	0,17	3,2	6,3	0,85	50	40
3	50	0,8	0,13	0,16	1,4	6,3	1,0	60	50
4	60	0,85	0,19	0,23	2,4	6,3	0,75	70	40

Таблица 8.17

Данные для трансформаторов и кабельной линии схемы № 4

№ вари- анта	Трансформаторы Т1, Т2			Кабельная линия Кб		
	$S_{\text{НТ}}$	$K_{\text{Т1}}$	$U_{\text{КВ-С}}$	l	X_0	R_0
	МВ·А	о. е.	%	Км	Ом/км	Ом/км
1	25	120,75/6,3	10,5	0,5	0,08	0,44
2	32	117,87/6,3	10,5	1,0	0,078	0,32
3	40	120,75/6,3	10,5	0,75	0,08	0,32
4	63	235,75/6,3	10,5	0,3	0,076	0,26

Таблица 8.18

Данные для реакторов схемы № 4

№ вари- анта	Реакторы Р1, Р2				Реакторы Р3, Р4, Р5 ($K_{\text{СВ}} = 0,5$)			
	$I_{\text{НОМ}}$	$U_{\text{НОМ}}$	X_p	$\Delta P_{\text{НОМ}} \text{ ф}$	$I_{\text{НОМ}}$	$U_{\text{НОМ}}$	X_p	$\Delta P_{\text{НОМ}} \text{ ф}$
	кА	кВ	Ом	кВт	А	кВ	Ом	кВт
1	1,0	6	0,56	8,5	630	6	0,56	8,6
2	2,5	6	0,2	18,1	1600	6	0,2	20,7
3	4	6	0,18	22	1600	6	0,25	18,4
4	4	6	0,18	22	1000	6	0,45	14,8

Таблица 8.19

Исходные данные для асинхронных двигателей и линии схемы № 4

№ вари- анта	Асинхронные двигатели АД1, АД2, АД3						Линия Л1		
	$P_{\text{НОМ}}$	$\cos\varphi$	$U_{\text{НОМ}}$	$I_{\text{П}}/I_{\text{НОМ}}$	$P_0/P_{\text{НОМ}}$	$M_{\text{П}}/M_{\text{НОМ}}$	l	X_0	R_0
	МВт	о. е.	кВ	о. е.	о. е.	о. е.	км	Ом/км	Ом/км
1	2	0,9	6	5,5	0,8	0,8	40	0,41	0,17
2	3,2	0,91	6	6,4	0,7	0,7	50	0,4	0,13
3	4	0,91	6	6,3	0,85	0,7	60	0,39	0,11
4	5	0,91	6	5,6	1	0,7	80	0,43	0,13

Таблица 8.20

Данные для составления расчетной схемы № 4

№ вари- анта	Задание № 1		Задание № 2	
	Точка КЗ	Включены выключатели	Точка КЗ	Включены выключатели
1	К1	Q5, Q8, Q10, Q13	К2	Q5, Q7, Q8, Q9
2	К2	Q5, Q8, Q10, Q13	К2	Q5, Q7, Q8, Q9
3	К4	Q2, Q4, Q5, Q6, Q7, Q8, Q9, Q11, Q14	К3	Q2, Q4, Q5, Q6, Q7, Q8, Q9
4	К3	Q1, Q4, Q5, Q6, Q8, Q9, Q17, Q18	К3	Q1, Q4, B5, B6, B8, B9
5	К2	Q2, Q4, Q5, Q7, Q8, Q9, Q17, Q19	К2	Q5, Q7, Q8, Q9
6	К2	Q1, Q4, Q5, Q7, Q8, Q9, Q17,	К2	Q1, Q4, Q5, Q7, Q8, Q9
7	К5	Q2, Q4, Q5, Q6, Q7, Q8, Q9, Q16	К5	Q2, Q4, Q5, Q7, Q8, Q9
8	Пуск АД1	Q5, Q8, Q10, Q13	К2	
9	Пуск АД2	Q2, Q4, Q6, Q7, Q8, Q9, Q11, Q14	К3	Q2, Q4, Q6, Q8, Q9

Таблица 8.21

Данные для трансформаторов схемы № 5

№ ва- ри- анта	Трансформаторы Т3, Т4			Трансформаторы Т1, Т2				
	$S_{ТСН}$	$K_{ат}$	$U_{квс}$	$S_{ТСН}$	$K_{ат}$	$U_{вс}$	$U_{вн}$	$U_{сн}$
	МВ·А	о. е.	%	МВ·А	о. е.	%	%	%
1	6,3	40,42/6,3	7,5	40	117,87/33,5/6,3	10,5	17	6
2	16	39,46/6,3	10	63	120,75/38,5/6,3	17	10,5	6
3	16	38,5/6,3	10	80	120,75/38,5/6,3	10,5	17	6
4	10	40,42/6,3	14	40	165,9/38,5/6,3	10,5	18	6

Таблица 8.22

Данные для синхронных компенсаторов и нагрузки схемы № 5

№ ва- ри- анта	Синхронные компенсаторы СК1, СК2					Нагрузка НГ1– НГ4			
	$S_{НОМ}$	X'_d	X_2	$R \cdot 10^{-3}$	$U_{НОМ}$	$S_0 / S_{НОМ}$	$S_{НГ1} = S_{НГ2}$	$S_{НГ3}$	$S_{НГ4}$
	МВ·А	о. е.	о. е.	о. е.	кВ	о. е.	МВ·А	МВ·А	МВ·А
1	10	0,22	0,24	4,4	6,6	0,9	10	30	20
2	15	0,2	0,22	4	6,6	0,8	20	40	20
3	15	0,22	0,24	4,4	6,6	1,0	30	20	20
4	10	0,2	0,22	5	6,6	0,9	10	30	20

Таблица 8.23

Данные для реакторов и линий схемы № 5

№ вари- анта	Пусковые реакторы Р1, Р2				Линия Л1			Линия Л2		
	$I_{НОМ}$	$U_{НОМ}$	X_p	$\Delta P_{НОМ \phi}$	l	X_0	R_0	l	X_0	R_0
	А	кВ	Ом	кВт	км	Ом/км	Ом/км	км	Ом/км	Ом/км
1	150	6	0,2	1,8	40	0,42	0,27	8	0,42	0,27
2	300	6	0,2	2	50	0,42	0,21	10	0,42	0,27
3	300	6	0,2	2	60	0,41	0,17	10	0,42	0,27
4	150	6	0,2	1,9	30	0,42	0,27	12	0,42	0,27

Таблица 8.24

Данные для двигателя АД и кабельной линии Кб

№ ва- ри- анта	Асинхронный двигатель АД						Кабель Кб		
	$P_{\text{НОМ}}$	$\cos\varphi$	$U_{\text{НОМ}}$	$I_{\text{П}}/I_{\text{НОМ}}$	$P_0/P_{\text{НОМ}}$	$M_{\text{П}}/$ $M_{\text{НОМ}}$	l	X_0	R_0
	МВт	о. е.	кВ	о. е.	о. е.	о. е.	км	Ом/км	Ом/км
1	2	0,9	6	5,5	0,75	0,8	1	0,08	0,44
2	2,5	0,9	6	5,6	0,8	0,9	1,5	0,078	0,32
3	3,2	0,9	6	6,4	0,9	0,7	1,2	0,08	0,32
4	2	0,9	6	5,5	0,7	0,8	2,0	0,078	0,26

Таблица 8.25

Данные для составления расчетной схемы № 5

№ вари- анта	Задание № 1		Задание № 2	
	Точка КЗ	Включены выключатели	Точка КЗ	Включены выключатели
1	К1	Q1, Q2, Q5, Q13, Q14	К1	Q2, Q5, Q14, Q15
2	К2	Q2, Q5, Q13, Q14	К2	Q2, Q5, Q14, Q15
3	К3	Q2, Q8, Q11, Q14	К3	Q2, Q5, Q8, Q9, Q14, Q15
4	К3	Q1, Q2, Q8, Q11, Q14	К1	Q2, Q5, Q14, Q15
5	К4	Q2, Q5, Q8, Q9, Q10, Q14, Q15	К3	Q2, Q5, Q8, Q9, Q14, Q15
6	К4	Q2, Q8, Q10, Q15	К1	Q2, Q5, Q8, Q9, Q14, Q15
7	К5	Q5, Q12, Q13, Q15	К2	Q2, Q5, Q14, Q15
8	Пуск СК1	Q1, Q4, Q14	К1	Q2, Q5, Q8, Q9, Q14, Q15
9	Пуск СК1	Q3, Q4, Q5, Q8, Q9, Q14, Q15	К1	Q2, Q5, Q8, Q9, Q14, Q15
10	Пуск СД	Q8, Q9, Q10, Q13, Q14	К2	Q2, Q5, Q14, Q15

Таблица 8.27

Данные для трансформаторов и автотрансформаторов. Схема № 6

№ вари- анта	Трансформаторы Т1, Т2			Автотрансформаторы АТ3, АТ4				
	$S_{ТЧН}$	$K_{АТ}$	$U_{ВС}$	$S_{ТЧН}$	$K_{АТ}$	$U_{ВС}$	$U_{ВН}$	$U_{СН}$
	МВ·А	о. е.	%	МВ·А	о. е.	%	%	%
1	125	127,05/10,5	11	250	230/135,5/11	11	32	20
2	200	121/18	11	320	230/128,25/11	11	32	20
3	250	124,02/15,75	11	400	330/128,25/15,75	10	34	22
4	400	230/20	11	630	500/257,8/20	9,5	29	17,5

Таблица 8.28

Данные для асинхронных двигателей и линии. Схема № 6

№ вари- анта	Асинхронные двигатели АД1– АД4						Линия Л1		
	$P_{НОМ}$	$\cos\varphi$	$U_{НОМ}$	$I_{П}/I_{НОМ}$	$P_{0'}/P_{НОМ}$	$M_{П'}/M_{НОМ}$	l	X_0	R_0
	МВт	о. е.	кВ	о. е.	о. е.	о. е.	км	Ом/км	Ом/км
1	2,5	0,9	6	5,8	0,9	0,8	120	0,43	0,12
2	3,3	0,9	6	6,4	0,7	0,9	150	0,42	0,11
3	5	0,91	6	5,6	0,7	1,0	220	0,33	0,065
4	8	0,91	6	5,5	0,8	0,75	200	0,33	0,065

Таблица 8.29

Данные для трансформаторов и линии. Схема № 6

№ вари- анта	Трансформаторы ТЧН1, ТЧН2			Линия Л2		
	$S_{НТ}$	$K_{Т1}$	$U_{КВ-С}$	l	X_0	R_0
	МВ·А	о.е.	%	Км	Ом/км	Ом/км
1	6,3	10, 5/6,3-6,3	8	40	0,41	0,17
2	10	18/6,3-6,3	8	50	0,41	0,21
3	16	15,75/6,3-6,3	10	60	0,4	0,13
4	25	20/6,3-6,3	9,5	80	0,4	0,13

Примечание. Выключатели Q_9 и Q_{12} замкнуты в вариантах 1, 2, 3 и разомкнуты в варианте 4.

Дополнительные данные для схемы № 6

№ варианта	Задание № 1		Задание № 2	
	Точка КЗ	Включены выключатели	Точка КЗ	Включены выключатели
1	К1	$Q1, Q4, Q5, Q7, Q8$	К6	$Q1, Q2, Q4, Q5$
2	К1	$Q3, Q4, Q5, Q6, Q13, Q14, Q15$	К4	$Q5, Q6, Q14, Q15$
3	К2	$Q5, Q10, Q11, Q14$	К4	$Q5, Q6, Q14, Q15$
4	К2	$Q5, Q6, Q10, Q11, Q14, Q15$	К2	$Q2, Q4, Q5, Q14$
5	К4	$Q5, Q10, Q11, Q14$	К4	$Q5, Q6, Q14,$
6	К4	$Q5, Q6, Q10, Q11, Q14, Q15$	К2	$Q2, Q4, Q5, Q14$
7	К3	$Q1, Q4, Q5, Q7, Q8, Q14$	К4	$Q1, Q4, Q5, Q14$
8	К5	$Q5, Q10, Q11, Q14$	К4	$Q1, Q4, Q5, Q14$
9	Пуск АД1	$Q1, Q4, Q5, Q7$	К6	$Q1, Q4, Q5, Q14$
10	Пуск АД3	$Q5, Q10, Q14$	К4	$Q1, Q4, Q5, Q14$
11	Пуск АД1	$Q1, Q4, Q5, Q7, Q8, Q14$	К6	$Q1, Q4, Q5, Q14$

Примечание. Выключатели, не указанные в графах 3 и 5 данной таблицы, считать разомкнутыми.

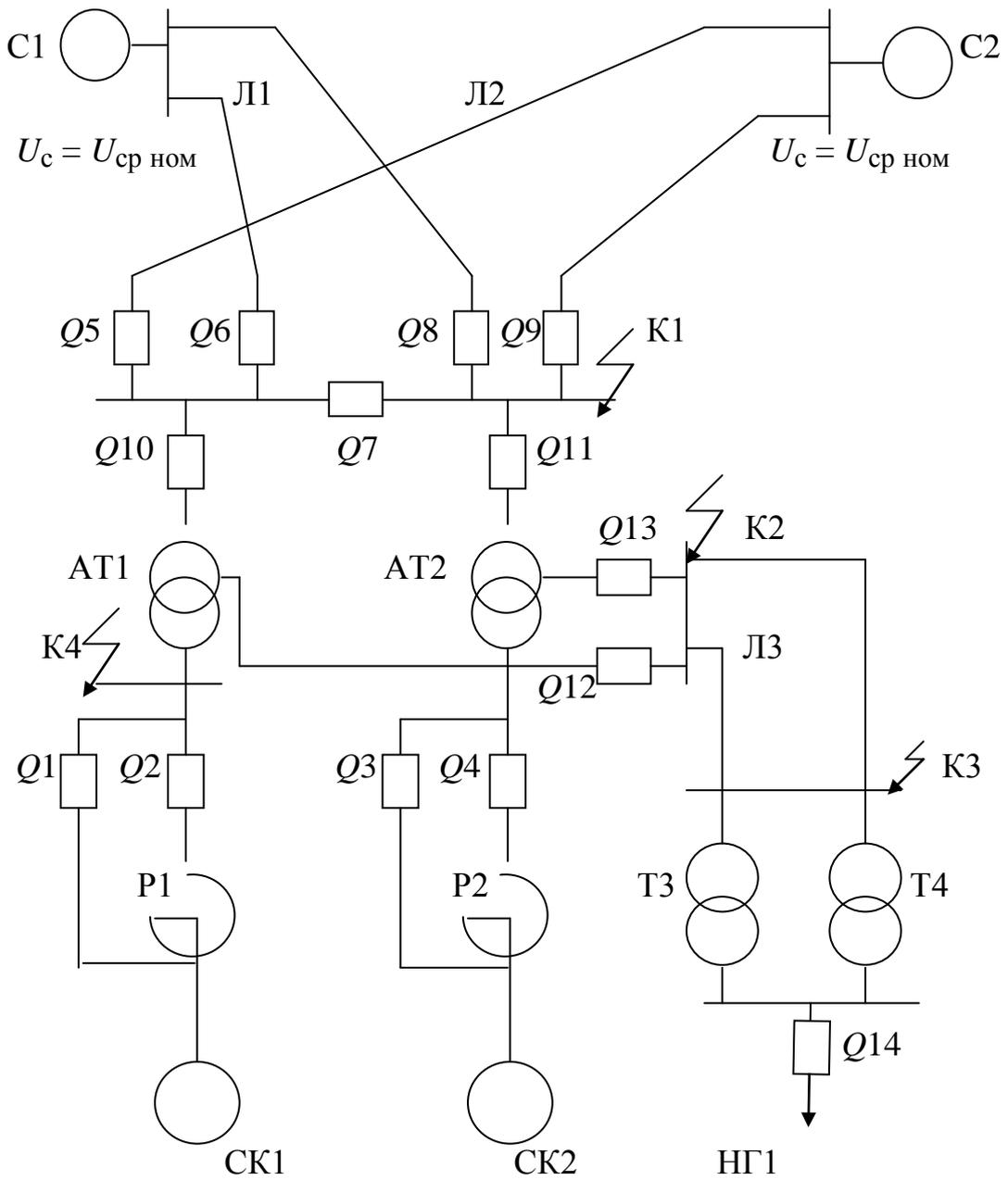


Рис. 8.7. Схема № 7

Таблица 8.31

Данные для трансформаторов, автотрансформаторов и нагрузки схемы № 7

№ вари- анта	Трансформаторы Т3, Т4			Автотрансформаторы АТ1, АТ2					НГ1
	S_{HT}	K_{T1}	U_{BC}	S_{TCH}	K_{AT}	U_B	U_{BH}	U_{CH}	$S_{НГ1}$
	МВ·А	о. е.	%	МВ·А	о. е.	%	%	%	МВ·А
1	25	120,75/10,5	10,5	100	230/128,25/1 1	11	31	19	30
2	40	117,87/10,5	10,5	160	230/125,8/11	11	32	20	45
3	63	118/10,5	10,5	200	230/116,6/11	11	35	20	70
4	25	109,25/10,5	10,5	63	330/116,6/11	10	35	21	30

Таблица 8.32

Данные для синхронных компенсаторов и линии схемы № 7

№ вари- анта	Синхронные компенсаторы СК1, СК2						Линия Л1		
	$S_{НОМ}$	X'_d	X_2	$R \cdot 10^{-3}$	$U_{НОМ}$	$S_0/S_{НОМ}$	l	X_0	R_0
	МВ·А	о. е.	о. е.	о. е.	кВ	о. е.	км	Ом/км	Ом/км
1	30	0,22	0,22	4	10,5	0,9	120	0,43	0,13
2	50	0,38	0,38	1	11	1,0	140	0,42	0,11
3	75	0,23	0,23	0,68	11	0,8	150	0,42	0,11
4	30	0,22	0,24	4	10,5	1,0	180	0,33	0,065

Таблица 8.33

Данные для реакторов и линий

№ вари- анта	Пусковые реакторы Р1, Р2				Линия Л2			Линия Л3		
	$I_{НОМ}$	$U_{НОМ}$	X_p	$\Delta P_{НОМ \text{ ф}}$	l	X_0	R_0	l	X_0	R_0
	кА	кВ	Ом	кВт	км	Ом/км	Ом/км	км	Ом/км	Ом/км
1	0,4	10	0,2	6	80	0,43	0,13	25	0,41	0,17
2	0,63	10	0,2	8,5	90	0,42	0,11	40	0,41	0,21
3	1,0	10	0,2	7,8	100	0,42	0,11	35	0,39	0,11
4	0,4	10	0,2	6	80	0,33	0,065	40	0,41	0,21

Дополнительные данные для схемы № 7

№ варианта	Задание № 1		Задание № 2	
	Точка КЗ	Включены выключатели	Точка КЗ	Включены выключатели
1	К1	<i>Q1, Q4, Q5, Q6, Q7, Q8, Q9, Q10, Q11</i>	К1	<i>Q1, Q4, Q5, Q6, Q13, Q14, Q15</i>
2	К4	<i>Q1, Q4, Q5, Q7, Q8, Q10, Q11</i>	К4	<i>Q1, Q4, Q5, Q7, Q8, Q10, Q11</i>
3	К2	<i>Q1, Q5, Q7, Q8, Q10, Q12, Q14</i>	К2	<i>Q1, Q5, Q7, Q8, Q10, Q12</i>
4	К3	<i>Q1, Q4, Q5, Q7, Q8, Q10, Q11, Q12, Q13, Q14</i>	К4	<i>Q1, Q4, Q5, Q7, Q8, Q10, Q11, Q12, Q13</i>
5	Пуск АД1	<i>Q2, Q5, Q7, Q8, Q10, Q12, Q14</i>	К4	<i>Q1, Q4, Q5, Q7, Q8, Q10, Q11, Q12, Q13</i>
6	Пуск АД3	<i>Q2, Q4, Q5, Q7, Q8, Q10, Q11, Q12, Q13</i>	К4	<i>Q1, Q4, Q5, Q7, Q8, Q10, Q10, Q11, Q12, Q13</i>

Примечание. Выключатели, не указанные в графах 3 и 5 данной таблицы, считать разомкнутыми.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
4	80	120,75/10,5–10,5	10,5	6,3	218/6,3	10,5	37	42
5	100	241,5/10,5–10,5	12	32	224/6,3	12	43	55
6	63	235,25/10,5–10,5	12	32	313/6,3	12	26	35
7	63	346,5/10,5–10,5	11	32	321/6,3	11	30	34
8	125	332,5/10,5–10,5	11	32		11	48	60

Таблица 8.36

Исходные данные для асинхронного двигателя и линии схемы № 8

№ вари- анта	Асинхронный двигатель АД						Линия Л1		
	$P_{\text{НОМ}}$	$\cos\varphi$	$U_{\text{НОМ}}$	$I_{\text{П}}/I_{\text{НОМ}}$	$P_0/P_{\text{НОМ}}$	$M_{\text{П}}/$ $M_{\text{НОМ}}$	l	X_0	R_0
	МВт	о. е.	кВ	о. е.	о. е.	о. е.	км	Ом/км	Ом/км
1	2	0,9	6	5,5	0,8	0,8	40	0,42	0,21
2	2,5	0,9	6	5,4	0,85	0,9	50	0,42	0,21
3	2,5	0,91	6	5,6	0,75	0,9	40	0,41	0,17
4	1	0,91	6	5,5	0,7	0,7	60	0,41	0,17
5	5	0,9	6	5,4	0,9	0,7	70	0,4	0,13
6	4	0,9	6	5,5	1	0,7	80	0,4	0,13
7	8	0,9	6	5,4	0,9	0,8	70	0,32	0,06
8	8	0,9	6	5,4	1	0,8	80	0,32	0,06

Таблица 8.37

Исходные данные для синхронного двигателя и линии схемы № 8

№ вари- анта	Синхронный двигатель СД						Линия Л2		
	$P_{\text{НОМ}}$	$\cos\varphi$	$U_{\text{НОМ}}$	$I_{\text{П}}/I_{\text{НОМ}}$	$P_0/P_{\text{НОМ}}$	$R \cdot 10^{-3}$	l	X_0	R_0
	МВт	о. е.	кВ	о. е.	о. е.	о. е.	км	Ом/км	Ом/км
1	4	0,8	6	9,24	0,8	6	15	0,44	0,45
2	5	0,8	10	10	0,85	5	25	0,21	0,45
3	9	0,8	10	8,9	1,0	4	15	0,43	0,33
4	5	0,8	10	10	0,7	5	10	0,44	0,45
5	12	0,8	10	7,7	0,9	4	25	0,43	0,13
6	9	0,8	10	8,9	0,8	5	45	0,43	0,13
7	1	0,8	10	9,24	0,9	6	50	0,32	0,06
8	12	0,8	10	7,7	1	6	40	0,32	0,06

Дополнительные данные для схемы № 8

№ вари- анта	Задание № 1		Задание № 2	
	Точка КЗ	Включены выключатели	Точка КЗ	Включены выключатели
1	К1	$Q1, Q2, Q3, Q12, Q13$	К1	$Q2, Q6, Q13, Q15$
2	К2	$Q1, Q2, Q3, Q12, Q13$	К1	$Q2, Q6, Q13, Q15$
3	К3	$Q1, Q2, Q3, Q9, Q12, Q13$	К3	$Q2, Q6, Q13, Q15$
4	К4	$Q9, Q10, Q11, Q15$	К3	$Q2, Q6, Q13, Q15$
5	Пуск СД	$Q2, Q6, Q13, Q15$	К1	$Q2, Q6, Q13, Q15$
6	Пуск АД	$Q9, Q10, Q11, Q16$	К1	$Q2, Q6, Q13, Q15$

Примечание. Выключатели, не указанные в графах 3 и 5 данной таблицы, считать разомкнутыми.

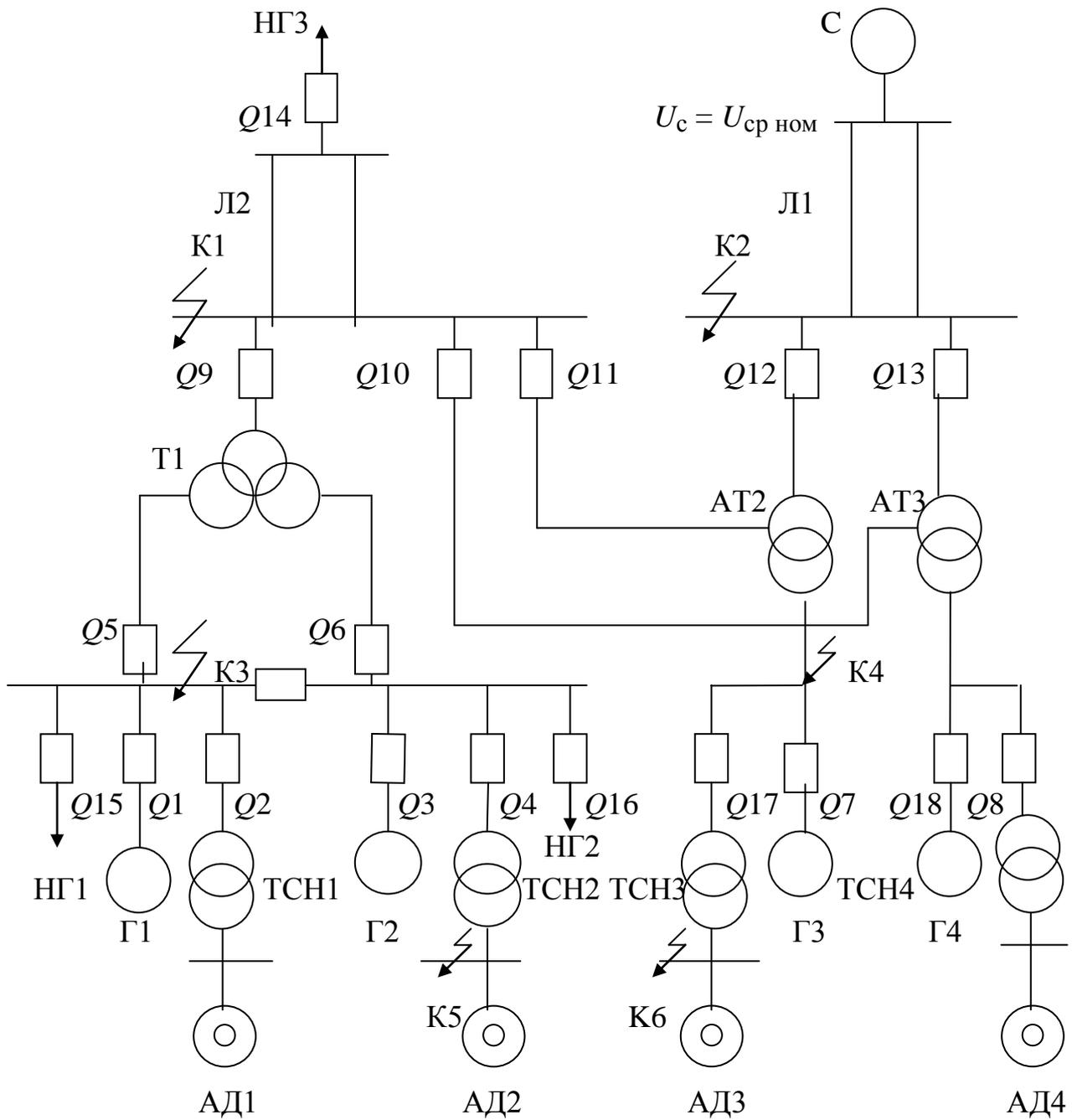


Рис. 8.9. Схема № 9

Таблица 8.39

Данные для генераторов и нагрузки схемы № 9

№ вари- анта	Генераторы Г1, Г2							Нагрузка НГ
	$P_{\text{НОМ}}$	$\cos\varphi$	X'_d	X_2	$R \cdot 10^{-3}$	$U_{\text{НОМ}}$	$P_0/P_{\text{НОМ}}$	$S_{\text{НГ1}} = S_{\text{НГ2}}$
	МВт	о. е.	о. е.	о. е.	о. е.	кВ	о. е.	МВ·А
1	30	0,8	0,15	0,18	3,2	10,5	0,85	22
2	60	0,8	0,15	0,18	2,9	10,5	0,8	40
3	60	0,8	0,15	0,18	2,9	10,5	1,0	40
4	100	0,85	0,18	0,22	1,7	10,5	0,7	60

Таблица 8.40

Данные для генераторов, нагрузки схемы № 9

№ вари- анта	Генераторы Г3, Г4							НГ3
	$P_{\text{НОМ}}$	$\cos\varphi$	X'_d	X_2	$R \cdot 10^{-3}$	$U_{\text{НОМ}}$	$P_0/P_{\text{НОМ}}$	$S_{\text{НГ3}}$
	МВт	о. е.	о. е.	о. е.	о. е.	кВ	о. е.	МВ·А
1	60	0,8	0,15	0,18	2,9	10,5	0,8	60
2	60	0,8	0,15	0,18	2,9	10,5	0,8	70
3	100	0,85	0,18	0,22	1,7	10,5	1,0	80
4	165	0,85	0,21	0,26	1,5	18	0,9	90

Таблица 8.41

Данные для автотрансформаторов, трансформаторов
собственных нужд схемы № 9

№ вари- анта	Трансформаторы ТСН1, ТСН2, ТСН3, ТСН4			Автотрансформаторы АТ3, АТ4				
	$S_{\text{ТСН}}$	K_T	$U_{\text{КВ}}$	$S_{\text{ТСН}}$	$K_{\text{АТ}}$	$U_{\text{КВС}}$	$U_{\text{КВН}}$	$U_{\text{КСН}}$
	МВ·А	о. е.	%	МВ·А	о. е.	%	%	%
1	4	10/6,3	7,5	80	230/135, 5/10,5	11	35	22
2	6,3	10/6,3	7,5	80	230/133,1/10,5	11	35	22
3	6,3	10/6,3	7,5	125	230/130,7/10,5	11	32	19
4	10	20/6,3	14	200	230/123,4/18	11	32	20

Данные для асинхронного двигателя АД схемы № 9

№ вари- анта	Асинхронный двигатель АД					
	$P_{\text{НОМ}}$	$\cos\varphi$	$U_{\text{НОМ}}$	$I_{\text{П}}/I_{\text{НОМ}}$	$P_0/P_{\text{НОМ}}$	$M_{\text{П}}/M_{\text{НОМ}}$
	МВт	о. е.	кВ	о. е.	о. е.	о. е.
1	5	0,9	6	5,6	0,8	0,7
2	4	0,91	6	6,3	0,6	0,7
3	5	0,9	6	5,6	1,0	0,7
4	8	0,91	6	5,4	0,85	0,8

Таблица 8.44

Данные для трансформатора Т, линий Л схемы № 9

№ вари- анта	Трансформатор Т			Линия Л1			Линия Л2		
	$S_{\text{НТ}}$	K_{T}	$U_{\text{КВС}}$	l	X_0	R_0	l	X_0	R_0
	МВ·А	о. е.	%	км	Ом/ км	Ом/ км	км	Ом/ км	Ом/ км
1	20	120,75/10,5– 10,5	10,5	70	0,43	0,13	30	0,41	0,21
2	40	117,87/10,5– 10,5	10,5	80	0,42	0,11	40	0,41	0,17
3	40	115/10,5–10,5	10,5	120	0,4	0,13	25	0,4	0,13
4	63	120,75/10,5– 10,5	10,5	100	0,42	0,11	50	0,41	0,21

Дополнительные данные для схемы № 9

№ варианта	Задание № 1		Задание № 2	
	Точка КЗ	Включены выключатели	Точка КЗ	Включены выключатели
1	К1	<i>Q1, Q4, Q5, Q7, Q8</i>	К6	<i>Q1, Q2, Q4, Q5</i>
2	К1	<i>Q3, Q4, Q5, Q6, Q13, Q14, Q15</i>	К4	<i>Q5, Q6, Q14, Q15</i>
3	К2	<i>Q5, Q10, Q11, Q14</i>	К4	<i>Q5, Q6, Q14, Q15</i>
4	К2	<i>Q5, Q6, Q10, Q11, Q14, Q15</i>	К2	<i>Q2, Q4, Q5, Q14</i>
5	К4	<i>Q5, Q10, Q11, Q14</i>	К4	<i>Q5, Q6, Q14,</i>
6	К4	<i>Q5, Q6, Q10, Q11, Q14, Q15</i>	К2	<i>Q2, Q4, Q5, Q14</i>
7	К3	<i>Q1, Q4, Q5, Q7, Q8, Q14</i>	К4	<i>Q1, Q4, Q5, Q14</i>
8	К5	<i>Q5, Q10, Q11, Q14</i>	К4	<i>Q1, Q4, Q5, Q14</i>
9	Пуск АД1	<i>Q1, Q4, Q5, Q7</i>	К6	<i>Q1, Q4, Q5, Q14</i>
10	Пуск АД3	<i>Q5, Q10, Q14</i>	К4	<i>Q1, Q4, Q5, Q14</i>
11	Пуск АД1	<i>Q1, Q4, Q5, Q7, Q8, Q14</i>	К6	<i>Q1, Q4, Q5, Q14</i>

Библиографический список

1. ГОСТ 52735-2007 Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ. – М.: Стандартинформ, 2007. – 42 с.
2. ГОСТ Р 50270-92. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ. – М.: изд-во стандартов, 1993. – 60 с
3. Сайтбаталова Р.С. Переходные процессы электрических систем в примерах и иллюстрациях / Р.С. Сайтбаталова, Р.Ш. Бикбов. – Казань: КГЭУ, 2006. – 306 с.
4. Нестационарные режимы в электроэнергетических системах: программа, метод. указания и контрольные задания. / Сост.: Р.У. Галеева, Р.С. Сайтбаталова, О.А. Аксенов. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2008. – 105 с.
5. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах: учеб. пособие / Ю.А. Куликов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 284 с.
6. ГОСТ 26522-85. Короткие замыкания в электроустановках. Термины и определения. – М.: изд-во стандартов, 1985. – 17 с.
7. ГОСТ 27514-87. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ. – М.: изд-во стандартов, 1988. – 40 с.
8. ГОСТ 29176-91. Короткие замыкания в электроустановках. Методика расчета в электроустановках постоянного тока. – М.: изд-во стандартов, 1992. – 40 с.
9. ГОСТ Р 50254-92. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия токов короткого замыкания. – М.: изд-во стандартов, 1993. – 57 с.
10. Правила устройства электроустановок. – 6-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 640 с.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.	3
1. СОСТАВЛЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ И СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ.	5
1.1. Основные определения, буквенные обозначения.	5
1.2. Причины возникновения электромагнитных переходных процессов и следствия. Основные допущения.	9
1.3. Система относительных единиц.	11
1.4. Определение параметров элементов системы в относительных единицах.	12
1.5. Составление схемы замещения.	21
2. РАСЧЕТ ТОКА ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ. .	30
2.1. Расчет действующего значения периодической составляющей тока трехфазного короткого замыкания в начальный момент времени.	31
2.2. Учет синхронных и асинхронных электродвигателей при расчете начального тока короткого замыкания.	32
2.3. Учет комплексной нагрузки при расчете начального тока короткого замыкания.	34
2.4. Расчет аperiodической составляющей тока трехфазного короткого замыкания.	36
2.5. Расчет полного и ударного тока трехфазного короткого замыкания.	37
2.6. Расчет установившегося тока трехфазного короткого замыкания при отсутствии автоматического регулирования возбуждения генераторов.	39
2.7. Расчет установившегося тока трехфазного короткого замыкания при наличии автоматического регулирования возбуждени.генераторов.	40
2.8. Расчет периодической составляющей тока короткого замыкания для произвольного момента времени.	41
2.9. Определение действующего значения периодической составляющей тока КЗ от синхронных генераторов в произвольный момент времени.	46
2.10. Определение действующего значения периодической составляющей тока КЗ от синхронных и асинхронных электродвигателей в произвольный момент времени.	51

3. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ТОКА ТРЕХФАЗНОГО КРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1 КВ.	60
3.1. Общие положения.	60
3.2. Определение параметров элементов электрической сети.	62
3.3. Расчет начального тока при трехфазном коротком замыкании. .	69
3.4. Учет конденсаторных батарей при расчете токов короткого замыкания.	71
3.5. Расчет аperiodической составляющей тока короткого замыкания.	72
3.6. Расчет ударного тока короткого замыкания.	73
3.7. Расчет периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени.	75
4. РАСЧЕТ ТОКОВ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ ВЫШЕ 1 КВ.	81
4.1. Метод симметричных составляющих.	81
4.2. Параметры элементов для токов различных последовательностей.	83
4.3. Составление схемы замещения.	85
4.4. Расчет начального тока несимметричного короткого замыкания	90
4.5. Расчет периодического тока короткого замыкания в произвольный момент времени.	92
5. РАСЧЕТ ТОКОВ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1 КВ.	96
5.1. Составление схемы замещения.	96
5.2. Расчет начального тока несимметричного короткого замыкания	97
5.3. Расчет аperiodической составляющей тока короткого замыкания.	100
5.4. Расчет ударного тока короткого замыкания.	101
5.5. Расчет периодической составляющей тока КЗ для произвольного тока КЗ для произвольного момента времени.	102
6. ПРОСТОЕ ЗАМЫКАНИЕ НА ЗЕМЛЮ (ЗАМЫКАНИЕ В СХЕМЕ БЕЗ ГЛУХОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ)	105
7. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ТОКОВ КРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ. . .	110
8. ВАРИАНТЫ КОНТРОЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ.	145
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.	175

Учебное издание

**Саитбаталова Раиса Садыковна
Варламов Николай Иванович
Галеева Раиса Усмановна**

**ПРАКТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТОКОВ
КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ**

Учебное пособие

3-е изд., доп.

Кафедра электроснабжения промышленных предприятий

Редактор издательского отдела *М.С. Беркутова*
Компьютерная верстка *Ю.Ф. Мухаметшина*

Подписано в печать 21.04.15.

Формат 60×84/16. Бумага «Business». Гарнитура «Times». Вид печати РОМ.
Усл. печ. л. 10,34. Уч.-изд. л. 11,48. Тираж 500 экз. Заказ № 10/эл.

Редакционно-издательский отдел КГЭУ,
420066, Казань, Красносельская, 51