

**ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ  
ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

**РАСЧЕТ ТОКОВ  
ОДНОФАЗНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ**

*Методические указания к самостоятельным работам  
для студентов специальности 21.05.04*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2021**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
Санкт-Петербургский горный университет

Кафедра электроэнергетики и электромеханики

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ  
ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА  
РАСЧЕТ ТОКОВ  
ОДНОФАЗНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

*Методические указания к самостоятельным работам  
для студентов специальности 21.05.04*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2021

УДК 621.31.622 (073)

**ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА. Расчет токов однофазных коротких замыканий:** Методические указания к самостоятельным работам / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: *Д.А. Устинов, А.В. Кривенко*. СПб, 2021. 47 с.

Изложены порядок расчета тока однофазного короткого замыкания в сетях с глухозаземленной и изолированной нейтралью. Приведенная методика может быть использована при выполнении раздела «Электроснабжение горного предприятия» в пояснительной записке дипломного проекта.

Предназначены для студентов специальности 21.05.04 «Горное дело», специализации «Электрификация и автоматизация горного производства». Могут быть использованы бакалаврами, магистрами и аспирантами данного профиля.

Научный редактор проф. *А.Е. Козярук*

Рецензент канд. техн. наук. *В.А. Соловьев* (ООО «НПК «ЭНЕРГОПРОГРЕСС»)

## ВВЕДЕНИЕ

В данных методических указаниях приведены учебно-методические материалы, необходимые для изучения одного из базисных курсов **«ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА»** и выполнения курсового проекта.

Учебная дисциплина **«ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА»** является специальной дисциплиной и предназначена для формирования у студентов профессиональных знаний по проектированию надежных и экономических систем электроснабжения (СЭС).

В результате изучения дисциплины студент должен:

- иметь понятие о проектной документации;
- знать принципы, методы и алгоритмы проектирования СЭС;
- знать принципы построения и реализации устройств СЭС, а также устройств защиты и сетевой автоматики;
- уметь выполнять проектирование основных элементов СЭС с использованием компьютерных средств.

Дисциплина «Электроснабжение горного производства» относится к базовой части Блока 1 «Дисциплины (модули)» основной профессиональной образовательной программы по специальности «21.05.04 Горное дело (уровень специалитета)», специализация «Электрификация и автоматизация горного производства».

Для изучения дисциплины «Электроснабжение горного производства» необходимы знания, умения и компетенции, полученные обучающимися при изучении в Университете дисциплин «Материаловедение», «Введение в специальность», «Электротехника», «Электрические и электронные аппараты», «Электрические машины», «Горные машины и оборудование».

Знания, умения и компетенции, освоенные при изучении данной дисциплины, используются в процессе изучения специальных дисциплин «Математическое моделирование электротехнических систем», «Математическое моделирование электромеханических систем», «Электрические и электронные

аппараты», и ряда специальных дисциплин, в которых рассматриваются разделы, специфичные для данного направления подготовки «Эксплуатация систем электроснабжения», «Электробезопасность на горных предприятиях».

Номер выполняемого варианта соответствует порядковому номеру в журнале учёта текущей успеваемости.

## 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Расчет токов однофазных коротких замыканий (КЗ) в сетях до 1 кВ необходим для обеспечения надежной работы защиты при минимальных значениях тока КЗ в конце защищаемой линии.

В соответствии с требованиями «Правил устройства электроустановок» (ПУЭ) для надежного отключения поврежденного участка сети наименьший расчетный ток короткого замыкания должен превышать номинальный ток плавкой вставки или номинальный ток расцепителя автоматического выключателя с обратозависимой от тока характеристикой не менее, чем в 3 раза.

Для электрических сетей во взрывоопасных зонах требования к кратности тока короткого замыкания (ТКЗ) повышаются: наименьший расчетный ток короткого замыкания должен превышать номинальный ток плавкой вставки не менее, чем в 4 раза, а номинальный ток расцепителя автоматического выключателя с обратозависимой от тока характеристикой - не менее, чем в 6 раз.

Если автоматический выключатель имеет только мгновенно действующий расцепитель (отсечку), то наименьший расчетный ток короткого замыкания должен превышать уставку отсечки не менее, чем в 1,4 раза.

Из трех видов КЗ однофазные являются наиболее сложными для расчета. Если при расчете трех- и двухфазных КЗ нужно учитывать сопротивления только в прямой цепи короткого замыкания (в фазе), то при расчете однофазных КЗ необходим учет сопротивлений и в цепи зануления (в обратной цепи). Когда для зануления используются стальные трубы, обрамления кабельных каналов и другие строительные конструкции, в решении вопроса о

сопротивлении цепи короткого замыкания появляется много неопределенностей.

Кроме того, однофазные короткие замыкания относятся к несимметричным, что вносит в расчет дополнительные осложнения.

## **2. РАСЧЕТ ТОКА ОДНОФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СЕТИ С ГЛУХОЗАЕМЛЕННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ**

### **2.1. Методы расчета**

Расчет токов однофазных КЗ можно выполнять методом симметричных составляющих или по сопротивлению петли фаза-нуль. Оба метода широко описаны в технической литературе. Метод симметричных составляющих предложен для упрощения расчетов несимметричных КЗ. Сущность этого метода состоит в замене несимметричной системы токов трехфазной сети при однофазном коротком замыкании тремя симметричными системами: прямой, обратной и нулевой последовательности. Симметричные системы являются достаточно простыми для теоретического расчета. Но поскольку переход от одной несимметричной системы к трем симметричным выполняется с помощью формального приема, из методики расчета исчезает наглядность, связанная с привычным определением тока по закону Ома. При практическом использовании этого метода часто возникают затруднения из-за отсутствия справочных материалов по сопротивлениям нулевой последовательности для принятого варианта выполнения цепи зануления.

При расчете тока однофазного КЗ по сопротивлению петли фаза-нуль используется закон Ома, но встречаются те же затруднения с исходными данными. Так что выбор метода расчета может определяться для пользователя наличием у него тех или иных справочных материалов.

Оба метода должны давать один и тот же результат и теоретически могут быть выведены один из другого. Точность расчета определяется только точностью исходных данных. Покажем это, взяв за исходный метод симметричных составляющих.

Расчет однофазного КЗ методом симметричных составляющих производят по формуле:

$$I_1 = \frac{\sqrt{3} \cdot U_n}{\sqrt{(2R_{1\Sigma} + R_{0\Sigma})^2 + (2X_{1\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}}, \quad (2.1)$$

где  $I_1$  – действующее значение периодической составляющей тока однофазного КЗ, кА;

$U_n$  – среднее номинальное (линейное) напряжение сети, В. При расчете следует использовать следующую шкалу значений  $U_n$ : 690, 525, 400, 230 В;

$R_{1\Sigma}$  – суммарное активное сопротивление фазной цепи короткого замыкания (сопротивление прямой последовательности), мОм;

$R_{0\Sigma}$  – суммарное активное сопротивление цепи КЗ для тока нулевой последовательности (сопротивление нулевой последовательности), мОм;

$X_{1\Sigma}$  – суммарное индуктивное сопротивление фазной цепи короткого замыкания (сопротивление прямой последовательности), мОм;

$X_{0\Sigma}$  – суммарное индуктивное сопротивление цепи КЗ для тока нулевой последовательности (сопротивление нулевой последовательности), мОм.

Сопротивления обратной последовательности равны сопротивлениям прямой последовательности и в формуле (2.1) учитываются коэффициентом 2 перед  $R_{1\Sigma}$  и  $X_{1\Sigma}$ .

Суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивления фазной цепи короткого замыкания определяются по формулам:

$$R_{1\Sigma} = r_{1T} + r_{1Л} + r_{ТТ} + r_a + r_k + r_d; \quad (2.2)$$

$$X_{1\Sigma} = x_{1T} + x_{1Л} + x_{ТТ} + x_a, \quad (2.3)$$

где  $r_{1T}$ ,  $x_{1T}$  – сопротивления прямой последовательности силового трансформатора, мОм;

$r_{1Л}$ ,  $x_{1Л}$  – сопротивления прямой последовательности линии (фазного проводника), мОм;

$r_{ТТ}$ ,  $x_{ТТ}$  – сопротивления первичных обмоток трансформаторов тока, мОм;

$r_a, x_a$  – сопротивления автоматических выключателей, мОм;  
 $r_k$  – суммарное активное сопротивление различных контактов в фазной цепи КЗ, мОм;  
 $r_d$  – активное сопротивление электрической дуги в месте КЗ, мОм.

Суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивления цепи КЗ для тока нулевой последовательности определяются по формулам:

$$R_{0\Sigma} = r_{0T} + r_{0Л} + r_{ТТ} + r_a + r_k + r_d; \quad (2.4)$$

$$X_{0\Sigma} = x_{0T} + x_{0Л} + x_{ТТ} + x_a, \quad (2.5)$$

где  $r_{0T}, x_{0T}$  – сопротивления нулевой последовательности силового трансформатора, мОм;

$r_{0Л}, x_{0Л}$  – сопротивления нулевой последовательности линии (сопротивления шинопроводов, проводов, кабелей с учетом цепи зануления), мОм;

$r_{ТТ}, x_{ТТ}, r_a, x_a, r_k, r_d$  – см. в формулах (2.2) и (2.3).

Сопротивление нулевой последовательности линии равно сопротивлению фазного проводника плюс утроенное сопротивление цепи зануления:

$$r_{0Л} = r_{1Л} + 3r_n; \quad x_{0Л} = x_{1Л} + 3x_n, \quad (2.6)$$

где  $r_{1Л}, x_{1Л}$  – см. в формулах (2.2) и (2.3);

$r_n, x_n$  – эквивалентные сопротивления цепи зануления (нуля) от точки КЗ до трансформатора с учетом всех зануляющих элементов (нулевого провода, оболочки кабеля, стальных труб и т.д.), мОм.

Значение сопротивления цепи зануления для тока нулевой последовательности поврежденной фазы увеличивается в 3 раза, так как в соответствии с теоретическими предпосылками метода симметричных составляющих через цепь зануления замыкаются равные по значению токи нулевой последовательности всех трех фаз.

С учетом формул (2.6) формулы (2.4) и (2.5) примут вид:

$$R_{0\Sigma} = r_{0T} + r_{1Л} + 3r_n + r_{ТТ} + r_a + r_k + r_d; \quad (2.7)$$

$$X_{0\Sigma} = x_{0T} + x_{1Л} + 3x_n + x_{ТТ} + x_a, \quad (2.8)$$

Теперь суммы активных и индуктивных сопротивлений в подкоренном выражении формулы (2.1) можно выразить через слагаемые в формулах (2.2), (2.3), (2.7) и (2.8):

$$2R_{1\Sigma} + R_{0\Sigma} = 2(r_{1T} + r_{1Л} + r_{ТТ} + r_a + r_k + r_d) + (r_{0T} + r_{1Л} + 3r_n + r_{ТТ} + r_a + r_k + r_d) = 2r_{1T} + r_{0T} + 3(r_{1Л} + r_n + r_{ТТ} + r_a + r_k + r_d), \quad (2.9)$$

$$2X_{1\Sigma} + X_{0\Sigma} = 2(x_{1T} + x_{1Л} + x_{ТТ} + x_a) + (x_{0T} + x_{1Л} + 3x_n + x_{ТТ} + x_a) = 2x_{1T} + x_{0T} + 3(x_{1Л} + x_n + x_{ТТ} + x_a). \quad (2.10)$$

Два первых слагаемых в формулах (2.9) и (2.10) являются сопротивлениями трансформатора току однофазного КЗ:

$$r_T^{(1)} = 2r_{1T} + r_{0T}; \quad x_T^{(1)} = 2x_{1T} + x_{0T}; \\ z_T^{(1)} = \sqrt{(2r_{1T} + r_{0T})^2 + (2x_{1T} + x_{0T})^2}. \quad (2.11)$$

Суммы слагаемых в скобках в формулах (2.9) и (2.10) являются соответственно активным и индуктивным сопротивлениями петли фаза-нуль. Обозначив их  $r_n$  и  $x_n$  (сопротивления петли), получим:

$$r_n = r_{1Л} + r_n + r_{ТТ} + r_a + r_k + r_d, \\ x_n = x_{1Л} + x_n + x_{ТТ} + x_a. \quad (2.12)$$

Формулу (2.1) для определения тока однофазного КЗ методом симметричных составляющих с учетом формул (2.9), (2.10), (2.11) и (2.12) можно представить теперь в виде:

$$I_1 = \frac{\sqrt{3} \cdot U_n}{\sqrt{(r_T^{(1)} + 3r_n)^2 + (x_T^{(1)} + 3x_n)^2}}. \quad (2.13)$$

В аналогичной формуле для расчета тока однофазного КЗ по сопротивлению петли фаза-нуль в числителе стоит фазное напряжение сети. Чтобы привести формулы двух методов к

сопоставимому виду, разделим и числитель, и знаменатель формулы (2.13) на 3. Тогда в числителе окажется фазное напряжение сети и формула (2.13) примет вид:

$$I_1 = \frac{U_\phi}{\sqrt{\left(\frac{r_T^{(1)}}{3} + r_n\right)^2 + \left(\frac{x_T^{(1)}}{3} + 3x_n\right)^2}}. \quad (2.14)$$

Фазное напряжение сети:

$$U_\phi = U_n / \sqrt{3}, \quad (2.15)$$

где  $U_n$  – см. в формуле (2.1).

В знаменателе формулы (2.14) стоит полное сопротивление петли фаза-нуль, выраженное через активные и индуктивные составляющие. Причем, в сумму составляющих (в отличие от формулы 2.13) входит только одна третья часть сопротивления трансформатора току однофазного КЗ. Объясняется это тем, что сопротивления трансформатора току однофазного КЗ даются в технической литературе для расчета методом симметричных составляющих, где в формулах используются целые значения этих сопротивлений.

Формула (2.14), которая относится уже к методу определения тока однофазного КЗ по сопротивлению петли фаза-нуль, получена без каких-либо упрощений из формулы (2.1), и, следовательно, оба метода при одних и тех же исходных данных дают один и тот же результат.

Но на практике результаты расчетов, выполненных двумя методами, могут не совпадать, так как исходные данные берутся из разных источников. В исходных данных для расчета тока КЗ по сопротивлению петли фаза-нуль сопротивление цепи зануления связывается с физическим ее выполнением (угловая сталь, полоса, стальные трубы). В исходных данных для расчета методом симметричных составляющих сопротивления нулевой последовательности от способа выполнения цепи зануления часто не

зависят. Методика определения этих сопротивлений в литературе не раскрывается.

Формула (2.14) – это точная формула для расчета тока КЗ по сопротивлению петли фаза-нуль, позволяющая учитывать сопротивления всех элементов цепи короткого замыкания, когда известны активные и индуктивные составляющие этих сопротивлений. В технической литературе чаще всего описывается упрощенный вариант этой формулы:

$$I_1 = \frac{U_\phi}{\frac{z_T^{(1)}}{3} + z_n}, \quad (2.16)$$

где  $I_1$  – действующее значение однофазного периодической составляющей тока КЗ, кА;

$U_\phi$  – фазное напряжение сети, В;

$z_T^{(1)}$  – полное сопротивление понижающего трансформатора току однофазного КЗ, мОм;

$z_n$  – полное сопротивление петли фаза-нуль от понижающего трансформатора до точки КЗ, мОм.

Основное отличие формулы (2.16) от формулы (2.14) состоит в том, что в ней сопротивление цепи короткого замыкания определяется как арифметическая сумма полных ( $z$ ) сопротивлений отдельных участков цепи, тогда как в формуле (2.14) это сопротивление определяется через активные ( $r$ ) и индуктивные ( $x$ ) составляющие, т. е. путем геометрического сложения.

Сопротивления трансформаторов тока, автоматических выключателей, контактных соединений и электрической дуги в формуле (2.16) не учитываются, поскольку арифметическое (вместо геометрического) сложение полных сопротивлений отдельных участков линии, как правило, приводит к некоторому увеличению общего сопротивления цепи короткого замыкания и как бы компенсирует неучет сопротивлений вышеуказанных элементов.

Значения полного сопротивления трансформатора току однофазного КЗ, которые приводятся в справочной литературе, учитывают только сопротивления прямой и нулевой последовательности трансформатора (см/ формулу 2.11). Но если от

расчета требуется повышенная точность, в полном сопротивлении трансформатора нужно учитывать и индуктивное сопротивление системы, к которой он подключен. Для этого индуктивное сопротивление системы ( $x_c$ ) нужно включить дополнительным слагаемым в формулу (2.3). При этом формулы (2.3) и (2.11) примут соответственно вид:

$$X_{1\Sigma} = x_c + x_{1T} + x_{1Л} + x_{ТТ} + x_a, \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} r_T^{(1)} &= 2r_{1T} + r_{0T}; \quad x_T^{(1)} = 2x_c + 2x_{1T} + x_{0T}; \\ z_T^{(1)} &= \sqrt{(2r_{1T} + r_{0T})^2 + (2x_c + 2x_{1T} + x_{0T})^2}, \end{aligned} \quad (2.19)$$

где  $x_c$  – эквивалентное индуктивное сопротивление системы до понижающего трансформатора, приведенное к ступени низшего напряжения, мОм.

$$x_c = \frac{U_n^2}{1000S_k}, \quad (2.20)$$

где  $S_k$  – мощность короткого замыкания (трехфазного) у выводов обмотки высшего напряжения трансформатора, МВ·А.

При определении минимальных значений ТКЗ для проверки чувствительности защиты рекомендуется учитывать увеличение активного сопротивления проводников в результате нагревания их током короткого замыкания. Для этого сопротивления проводников сечением до 16 мм<sup>2</sup> (включительно) рекомендуется приводить к температуре 145°С, сопротивления проводников сечением 25÷95 мм<sup>2</sup> – к температуре 120°С, сопротивления проводников сечением 120÷240 мм<sup>2</sup> – к температуре 95°С. Такие (ориентировочные) значения температуры проводников в конце КЗ получены в результате расчетов с учетом реальных время-токовых характеристик аппаратов защиты и при условии адиабатического процесса нагрева жил проводников. Государственным стандартом ГОСТ 28249-89 допускается принимать для всех сечений значение температурного коэффициента электрического сопротивления равным 1,5, что соответствует температуре 145°С. Но проводники крупных сечений до такой температуры за время КЗ практически не нагреваются.

Температурный коэффициент для приведения сопротивления проводника при 20°C к сопротивлению при конечной температуре вычисляется по формуле:

$$\kappa_T = 1 + 0,004(\Theta_{\text{кон}} - 20), \quad (2.21)$$

где  $\Theta_{\text{кон}}$  – температура жилы проводника в конце КЗ, °С.

Сопротивление проводника при конечной температуре:

$$r_{\text{кон}} = r_{20} \cdot \kappa_T, \quad (2.22)$$

где  $r_{20}$  – сопротивление проводника при температуре 20°C.

Сопротивления прямой последовательности трансформатора можно определить по формулам:

$$z_T = \frac{u_k \cdot U_{\text{НОМ}}^2}{100 S_{\text{НОМ}}}, \quad (2.23)$$

$$r_T = \frac{P_k \cdot U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}^2}, \quad (2.24)$$

$$x_T = \sqrt{z_T^2 + r_T^2}, \quad (2.25)$$

где  $u_k$  – напряжение короткого замыкания трансформатора, %;

$P_k$  – мощность потерь короткого замыкания трансформатора, Вт;

$S_{\text{НОМ}}$  – номинальная мощность трансформатора, В·А.

## 2.2. Пример расчета по методу симметричных составляющих

Для определения тока однофазного КЗ методом симметричных составляющих нужно знать значения сопротивлений прямой и нулевой последовательности цепи короткого замыкания (см. формулу 2.1).

В сопротивления прямой последовательности входят сопротивления прямой последовательности трансформатора, сопротивления прямой последовательности линии (сопротивления фазного проводника) и дополнительные сопротивления в фазной цепи, к которым относятся сопротивления трансформаторов тока, автоматических выключателей, неподвижных контактных соединений и сопротивление электрической дуги (см. формулы 2.2 и

2.3). Кроме того, в сопротивлениях прямой последовательности может учитываться сопротивление системы (см. формулы 2.18 и 2.20).

В сопротивления нулевой последовательности входят сопротивления нулевой последовательности трансформатора, сопротивления нулевой последовательности линии (сопротивления фазного проводника плюс эквивалентное сопротивление цепи зануления току нулевой последовательности) и те же дополнительные сопротивления в фазной цепи, которые входят в сопротивление прямой последовательности (см. формулы 2.4 и 2.5).

Рассмотрим схему электрической сети, изображенную на рис. 2.1, и определим токи однофазного короткого замыкания в точках К1 и К2.

Параметры системы заданы значением мощности короткого замыкания на стороне 10 кВ:  $S_k = 250 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ .

Определим индуктивное сопротивление системы, приведенное к напряжению 0,4 кВ (см. формулу 2.20):

$$x_c = \frac{400^2}{250 \cdot 10^6} = 0,64 \text{ мОм.}$$

Сопротивления прямой и нулевой последовательности трансформатора (см. табл. П.1.1):

$$r_{1T} = 1,7 \text{ мОм}, x_{1T} = 8,6 \text{ мОм}, r_{0T} = 19,6 \text{ мОм}, x_{0T} = 60,6 \text{ мОм.}$$

Сопротивления автоматического выключателя 1600 А (см. табл. П.1.2)

$$r_a = 0,14 \text{ мОм}, x_a = 0,08 \text{ мОм.}$$

Сопротивления прямой и нулевой последовательности комплектного шинпровода ШМА4, 1600 А (см. табл. П.1.4):

$$r_1 = 0,03 \text{ мОм/м}, x_1 = 0,014 \text{ мОм/м}, r_0 = 0,14 \text{ мОм/м}, x_0 = 0,13 \text{ мОм/м.}$$

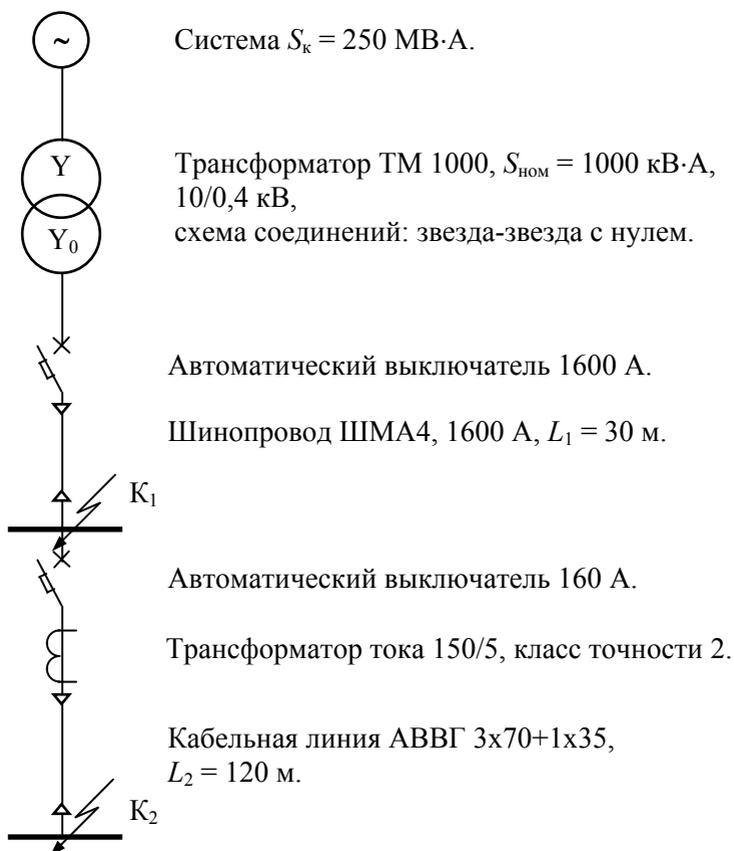


Рис. 2.1. Схема электрической сети

Сопротивления линии длиной 30 м, выполненные этим шинопроводом:

$$r_{1л} = 0,03 \cdot 30 = 0,9 \text{ мОм}, x_{1л} = 0,014 \cdot 30 = 0,42 \text{ мОм},$$

$$r_{0л} = 0,14 \cdot 30 = 4,2 \text{ мОм}, x_{0л} = 0,13 \cdot 30 = 3,9 \text{ мОм}.$$

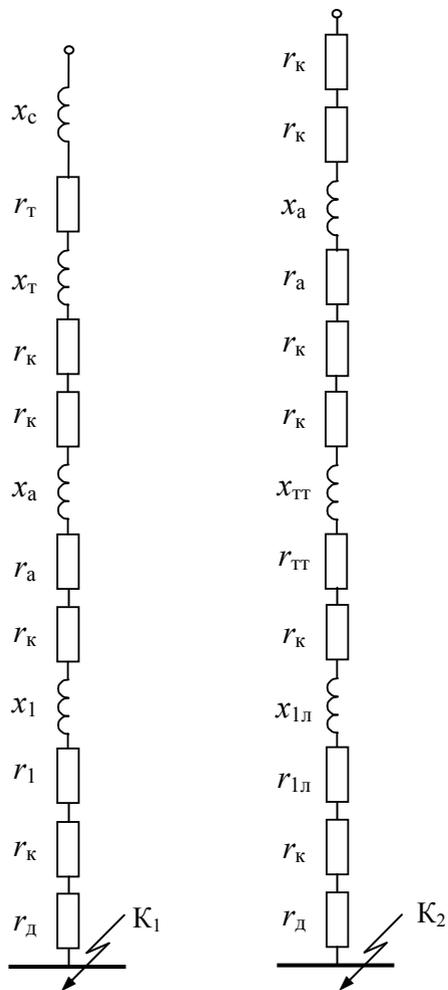


Рис. 2.2. Схема замещения электрической сети

Учтем переходное сопротивление четырех неподвижных контактных соединений на шинопроводе до точки  $K_1$  (см. табл. П1.5):

$$r_k = 0,0034 \cdot 4 = 0,014 \text{ мОм.}$$

Сопротивление электрической дуги по табл. П1.5 принимаем равным 6 мОм:

$$r_d = 6 \text{ мОм.}$$

Теперь определяем суммарные сопротивления прямой и нулевой последовательности для цепи короткого замыкания в точке К1 (см. формулы 2.2, 2.4, 2.5, 2.18.):

$$R_{1\Sigma} = r_{1T} + r_{1Л} + r_a + r_k + r_d = 1,7 + 0,9 + 0,14 + 0,014 + 6 = 8,75 \text{ мОм;}$$

$$X_{1\Sigma} = x_c + x_{1T} + x_{1Л} + x_a = 0,64 + 8,6 + 0,42 + 0,08 = 9,74 \text{ мОм;}$$

$$R_{0\Sigma} = r_{0T} + r_{0Л} + r_a + r_k + r_d = 19,6 + 4,2 + 0,14 + 0,014 + 6 = 29,9 \text{ мОм;}$$

$$X_{0\Sigma} = x_{0T} + x_{0Л} + x_a = 60,6 + 3,9 + 0,08 = 64,6 \text{ мОм.}$$

По формуле (2.1) определяем ток короткого замыкания в точке К1:

$$I_1 = \frac{\sqrt{3} \cdot U_d}{\sqrt{(2R_{1\Sigma} + R_{0\Sigma})^2 + (2X_{1\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}} =$$

$$= \frac{\sqrt{3} \cdot 400}{\sqrt{(2 \cdot 8,75 + 29,9)^2 + (2 \cdot 9,74 + 64,6)^2}} = 7,178 \text{ кА.}$$

Аналогичным образом найдем значения сопротивлений прямой и нулевой последовательности на участке 2 цепи короткого замыкания и определим ток КЗ в точке К2.

Сопротивления автоматического выключателя 160 А (см. табл П1.2):

$$r_a = 1,3 \text{ мОм, } x_a = 0,7 \text{ мОм.}$$

Т.к. в табл. П1.2 нет расцепителя 160 А, значения сопротивлений приняты для расцепителя 140 А, т.е. для более жестких расчетных условий.

Сопротивления трансформатора тока второго класса точности с коэффициентом трансформации 150/5 (см. табл. П1.7):

$$r_{тТ} = 0,33 \text{ мОм, } x_{тТ} = 0,3 \text{ мОм.}$$

Сопrotивления прямой последовательности кабеля сечением 70 мм<sup>2</sup> при 65°С (см. табл. П1.8):

$$r_1 = r_2 = 0,549 \text{ мОм/м}; x_1 = x_2 = 0,065 \text{ мОм/м.}$$

Приведем сопротивление кабеля к температуре 120°С, пользуясь формулами (2.21) и (2.22):

$$r_1 = 0,549 \cdot [1 + 0,004 \cdot (120 - 65)] = 0,67 \text{ мОм/м.}$$

Сопrotивления прямой последовательности линии длиной 120 м, выполненной этим кабелем:

$$r_{1л} = 0,67 \cdot 120 = 80,4 \text{ мОм};$$

$$x_{1л} = 0,065 \cdot 120 = 7,8 \text{ мОм.}$$

Значения сопротивлений нулевой последовательности линии:

$$r_{0л} = 2,039 \cdot 120 = 244,68 \text{ мОм};$$

$$x_{0л} = 0,741 \cdot 120 = 88,92 \text{ мОм.}$$

Учтем сопротивление шести неподвижных контактных соединений кабеля 70 мм<sup>2</sup> (см. табл. П1.5):

$$r_k = 0,029 \cdot 6 = 0,174 \text{ мОм.}$$

Сопротивление электрической дуги по табл. П1.6 принимаем равным 20 мОм:

$$r_d = 20 \text{ мОм.}$$

Теперь определяем суммарные сопротивления прямой и нулевой последовательности для цепи короткого замыкания на участке 2 (см. формулы 2.2, 2.3, 2.4, 2.5):

$$\begin{aligned} R_{1\Sigma} &= r_a + r_{тТ} + r_{1л} + r_k + r_d = \\ &= 1,3 + 0,33 + 80,4 + 0,174 + 20 = 102,2 \text{ мОм}; \end{aligned}$$

$$X_{1\Sigma} = x_a + x_{тТ} + x_{1л} = 0,7 + 0,3 + 7,8 = 8,8 \text{ мОм};$$

$$R_{0\Sigma} = r_a + r_{тТ} + r_{0л} + r_k + r_d =$$

$$= 1,3 + 0,33 + 244,68 + 0,174 + 20 = 266,48 \text{ мОм};$$

$$X_{0\Sigma} = x_a + x_{тг} + x_{0л} = 0,7 + 0,3 + 88,92 = 89,92 \text{ мОм}.$$

Найдем сумму сопротивлений двух участков цепи КЗ (до точки К2). Причем в сумме сопротивлений, двух участков сопротивление электрической дуги должно учитываться только один раз: в конце последнего участка. Поэтому при сложении из суммы сопротивлений первого участка сопротивление электрической дуги (6 мОм) нужно исключить.

$$R_{1\Sigma} = 8,75 - 6 + 102,2 = 104,95 \text{ мОм};$$

$$X_{1\Sigma} = 9,74 + 8,8 = 18,54 \text{ мОм};$$

$$R_{0\Sigma} = 29,9 - 6 + 266,48 = 290,38 \text{ мОм};$$

$$X_{0\Sigma} = 64,6 + 89,92 = 154,52 \text{ мОм}.$$

По формуле (2.1) определяем ток короткого замыкания в точке К1:

$$I_1 = \frac{\sqrt{3} \cdot U_n}{\sqrt{(2R_{1\Sigma} + R_{0\Sigma})^2 + (2X_{1\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}} =$$

$$= \frac{\sqrt{3} \cdot 400}{\sqrt{(2 \cdot 104,95 + 290,38)^2 + (2 \cdot 18,54 + 154,52)^2}} = 1,293 \text{ кА}.$$

### 3. РАСЧЕТ ТОКА ОДНОФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СЕТИ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

#### 3.1. Методы расчета

Режим изолированной нейтрали достаточно широко применяется в России. При этом способе заземления нейтральная точка источника (генератора или трансформатора) не присоединена к контуру заземления. Работа сети в режиме с изолированной нейтралью (рис. 3.1) допускается Правилами в тех случаях, когда суммарный емкостной ток  $I_{C\Sigma}$  не превышает 30 А для сети 6 кВ,

20 А – для сети 10 кВ, 15 А – для сети 15 – 20 кВ и т.д. Рассмотрим этот режим заземления нейтрали более подробно.

Как видно из рис. 3.1, фазы всех линий имеют емкость  $C$  по отношению к земле (условно они показаны сосредоточенными в одной точке линии). На поврежденной линии емкости фаз обозначены  $C_0$ , а на неповрежденной линии, которая представляет всю остальную электрически связанную сеть, обозначены как суммарные емкости  $C_{0\Sigma}$ . Емкость  $C_{0\Sigma}$  определяет значение суммарного емкостного тока сети  $I_{C\Sigma}^{(1)}$ .

При металлическом ОЗЗ в точке  $K_1$  на фазе А (рис. 3.1, а) через место повреждения будет проходить суммарный ток  $I_{C\Sigma}^{(1)}$ , определяемый емкостями неповрежденных фаз всей остальной сети (емкость поврежденной фазы в создании этого тока не участвует, так как она зашунтирована в месте ОЗЗ).

Ток поврежденной фазы возвращается в сеть через емкости неповрежденных фаз (показан штриховыми линиями).

Таким образом, устройство защиты от ОЗЗ, подключенное к поврежденной линии через специальный трансформатор тока нулевой последовательности ТТНП кабельного типа, реагирует на суммарный емкостной ток сети  $I_{C\Sigma}^{(1)}$  (за вычетом тока  $I_{л.собст}$ , определяемого емкостью поврежденной линии).

При ОЗЗ в точке  $K_2$  вне защищаемой линии (рис. 3.1, б) через рассматриваемую защиту, проходит «собственный» емкостной ток линии, определяемый емкостью ее фаз. Если эта токовая защита выполнена без элемента направления мощности, то необходимо обеспечить ее несрабатывание при внешнем ОЗЗ путем отстройки от собственного тока линии (фидера)  $I_{л.собст}$ .

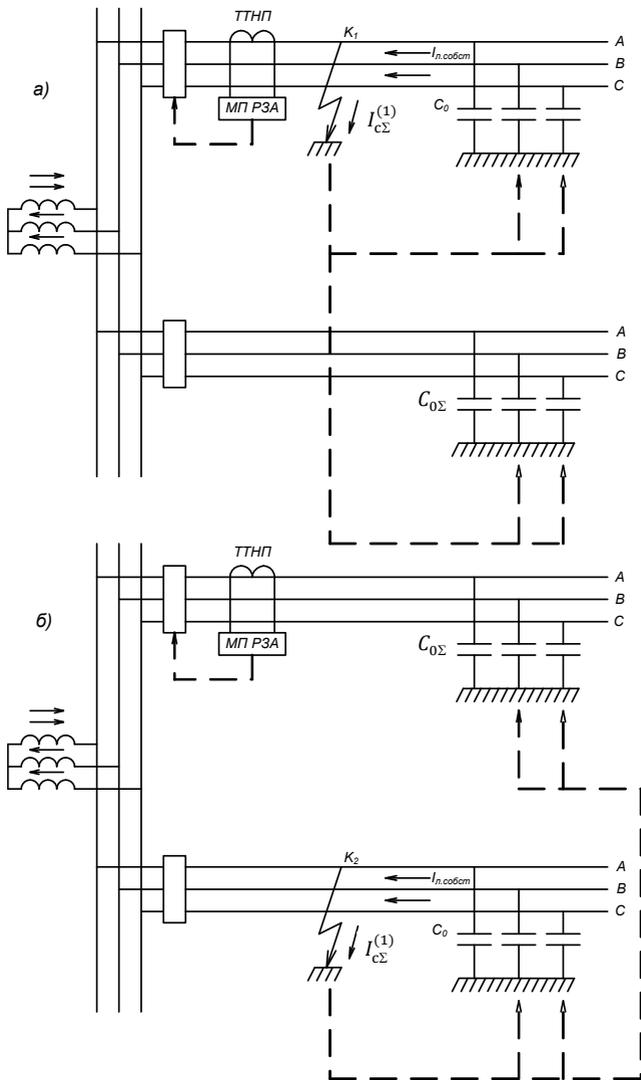


Рис. 3.1. Распределение емкостных токов при ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью.

Имеется два концептуальных подхода к решению проблемы защиты от ОЗЗ: выполнение устройств релейной защиты индивидуальными или групповыми, причем как те, так и другие могут выполняться реагирующими как на одну, так и на несколько электрических величин. Используются следующие основные принципы построения защиты (сигнализации) при ОЗЗ:

- измерения напряжения нулевой последовательности  $3U_0$ ;
- измерения тока нулевой последовательности  $3I_0$  промышленной частоты;
- измерения гармонических составляющих в токе ОЗЗ;
- измерение мощности нулевой последовательности промышленной частоты;
- измерение переходных токов и напряжений нулевой последовательности при возникновении ОЗЗ.

Широкое распространение в данных сетях получила индивидуальная токовая защита от ОЗЗ, реагирующая на действующее значение тока нулевой последовательности промышленной частоты. Эта защита работает с независимой характеристикой срабатывания и настраивается исходя из следующих условий:

1. Условие несрабатывания защиты при ОЗЗ на других ЛЭП (внешнем ОЗЗ):

$$I_{\text{ср.з.}} \geq k_n \cdot k_{\text{бр}} \cdot I_{\text{л.собст}} \quad (3.1)$$

где  $k_n$  – коэффициент надёжности;  $k_{\text{бр}}$  – коэффициент “броска”, учитывающий бросок емкостного тока в момент возникновения ОЗЗ, а также способность реле реагировать на него. Для электромеханических и статических  $k_{\text{бр}} = 3 \div 5$  Для современных микропроцессорных терминалов защиты от ОЗЗ можно принимать значение  $k_{\text{бр}} = 1,5$ ;  $I_{\text{л.собст}}$  – ток ОЗЗ линии, зависящий от собственной емкости линии.

2. Условие срабатывания защиты повреждённой линии:

$$I_{\text{ср.з}} \leq \frac{I_{\text{С}\Sigma}^{(1)} - I_{\text{л.собст}}}{k_{\text{ч}}}, \quad (3.2)$$

где  $I_{\text{С}\Sigma}^{(1)}$  – общий (суммарный) ток однофазного замыкания на землю электрически связанных линий;  $k_{\text{ч}} = 1,2 \div 2$  – коэффициент чувствительности.

Значение емкостного тока линии и, соответственно, суммарного емкостного тока линий всей сети можно ориентировочно определить по эмпирическим формулам:

$$\text{для кабельных сетей } I_{\text{С}\Sigma}^{(1)} \approx \frac{U_{\text{н}} \cdot l_{\Sigma}}{10}; \quad (3.3)$$

$$\text{для воздушных сетей } I_{\text{С}\Sigma}^{(1)} \approx \frac{U_{\text{н}} \cdot l_{\Sigma}}{350}; \quad (3.4)$$

где  $U_{\text{н}}$  – номинальное напряжение сети (кВ),  $l_{\Sigma}$  – суммарная длина линий (км).

Для воздушных сетей 6÷35 кВ известна и другая аналогичная эмпирическая формула:

$$I_{\text{С}\Sigma}^{(1)} \approx 2,7 \cdot U_{\text{н}} \cdot l_{\Sigma} \cdot 10^{-3}. \quad (3.5)$$

Если в сети имеются крупные электродвигатели напряжением 6 или 10 кВ, то следует учитывать их собственные емкостные токи. Емкостной ток электродвигателя (при внешнем ОЗЗ) можно ориентировочно определить по эмпирической формуле:

$$\text{при } U_{\text{н.дв}} = 6 \text{ кВ } I_{\text{с.д.}} \approx 0,017 \cdot S_{\text{н.дв}}; \quad (3.6)$$

$$\text{при } U_{\text{н.дв}} = 10 \text{ кВ } I_{\text{с.д.}} \approx 0,03 \cdot S_{\text{н.дв}}; \quad (3.7)$$

$$\text{где } S_{\text{н.дв}} = \frac{P_{\text{н.дв}}}{\cos \varphi \eta}.$$

Например, у двигателя мощностью  $P=5$  МВт напряжением 10 кВ собственный емкостной ток может иметь значение  $I_{с.д.} = 0,17$  А.

Для более точного определения емкостного тока двигателя напряжением выше 1 кВ применяется следующая формула:

$$I_{емк.дв} = 2\pi \cdot f \cdot \sqrt{3} \cdot C_{дв} \cdot U_{ном.дв} \text{ А}, \quad (3.8)$$

где  $C_{дв}$  – электрическая емкость двигателя в фарадах (Ф);  
 $U_{ном.дв.}$  – номинальное напряжение двигателя в вольтах (В);  
 $f_{ном}$  – номинальная частота питающей сети в герцах (Гц).

Для явнополюсных синхронных двигателей  $C_{дв}$  определяется по формуле:

$$C_{дв} \approx \frac{40^4 \sqrt{S_{ном.дв}^3} \cdot 10^{-6}}{3 \cdot (U_{ном.дв} + 3600) \cdot \sqrt[3]{n}}, \quad (3.9)$$

где  $S_{ном.дв}$  – полная мощность электродвигателя, кВ·А;  
 $U_{ном.дв.}$  – номинальное напряжение двигателя, В;  
 $n$  – синхронная скорость вращения двигателя, об/мин.

Для неявнополюсных синхронных двигателей и асинхронных двигателей  $C_{дв}$  определяется по формуле:

$$C_{дв} \approx \frac{0,0187 \cdot S_{ном.дв} \cdot 10^{-6}}{1,2 \cdot \sqrt{U_{ном.дв} \cdot (1 + 0,08 \cdot U_{ном.дв})}}, \quad (3.10)$$

где  $S_{ном.дв}$  – полная мощность электродвигателя, МВ·А;  
 $U_{ном.дв.}$  – номинальное напряжение двигателя, кВ.

Более точно  $I_{с\sigma}^{(1)}$  можно определить экспериментально (что и требуется делать регулярно, т.к. протяженность сети изменяется в течение эксплуатационного периода).

Таким образом, объединив оба условия, получим выражения для определения тока срабатывания защиты  $I_{ср.з}$ , которое регламентируется следующим двойным неравенством:

$$\frac{I_{C\Sigma}^{(1)} - I_{\text{л.собст}}}{k_q} \geq I_{\text{ср.з}} \geq k_n k_{\text{бр}} I_{\text{л.собст}}, \quad (3.11)$$

Оценим область применения этой защиты, воспользовавшись отношением собственного тока линии к значению общего тока замыкания на землю:

$$\frac{I_{\text{л.собст}}}{I_{C\Sigma}^{(1)}} \leq \frac{1}{k_q k_n k_{\text{бр}} + 1}. \quad (3.12)$$

Например, для защиты с параметрами  $k_q = 1,5$ ,  $k_n = 1,2$ ,  $k_{\text{бр}} = 3$ , селективная работа этой защиты может быть обеспечена лишь при кратности токов в сети:

$$\frac{I_{\text{л.собст}}}{I_{C\Sigma}^{(1)}} \leq \frac{1}{1,5 \cdot 1,2 \cdot 3 + 1} \leq 0,15, \quad (3.13)$$

т.е. предельное значение доли собственного тока линии в общем токе сети может составлять не более 15%. Это существенно ограничивает область применения защиты от ОЗЗ на базе электромеханических реле.

Если в расчете коэффициент чувствительности получается меньше допустимого, то необходимо воспользоваться направленной токовой защитой и коэффициент броска уменьшается до  $k_{\text{бр}} = 1,0$ . При этом необходимо пересчитать значение тока срабатывания защиты и коэффициент чувствительности.

Так же существенно влияние броска емкостного тока на работу данной защиты при внешних ОЗЗ, не всегда возможно обеспечить селективность (избирательность) защиты в сети с изолированной нейтралью, особенно в сетях с нестабильной первичной схемой сети и, следовательно, периодически изменяющимися значениями собственных емкостных токов отдельных фидеров и суммарного емкостного тока, а также в сети с малым количеством фидеров.

Улучшить ситуацию защит сетей 6-35 кВ с изолированной нейтралью можно используя групповые защиты. Сам принцип действия групповых защит, использующих информацию не только своего присоединения или секции сборных шин, но и информацию с других объектов, например, поступающую от других элементов, подключенных к той же самой секции сборных шин или ко второй секции этих шин, позволяет обеспечить в ряде случаев более высокое техническое совершенство защиты.

Известные в настоящее время групповые защиты (ГЗ) от 033 основаны на принципе сравнения токов нулевой последовательности присоединений. Могут сравниваться амплитудные, действующие и средние значения следующих токов: переходных, установившихся, высших гармонических составляющих, наложенных с частотой, отличной от промышленной. Ещё больший эффект можно получить, задействовав, например, информацию о напряжении нулевой последовательности на второй секции подстанции. В зависимости от вида используемых составляющих сравниваемых токов ГЗ могут применяться в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью, а также нейтралью, заземлённой через высокоомный резистор.

Для обеспечения селективности ГЗ необходимо, чтобы число присоединений, отходящих от шин подстанции, было не менее трёх при отсутствии в сети источников дополнительного тока.

Одним из важнейших достоинств ГЗ в отличие от индивидуальных токовых защит является то, что они не требуют отстройки от бросков собственных ёмкостных токов, что позволяет создавать более чувствительные и одновременно более селективные устройства.

Достоинства изолированного заземления нейтрали:

- отсутствие необходимости в немедленном отключении первого однофазного замыкания на землю;
- малый ток в месте повреждения (при малой емкости сети на землю).

Недостатки изолированного режима заземления нейтрали:

- возможность возникновения дуговых перенапряжений при перемежающемся характере дуги с малым

током (единицы–десятки ампер) в месте однофазного замыкания на землю;

- возможность возникновения множественных повреждений (выход из строя нескольких электродвигателей, кабелей) из-за пробоев изоляции на других присоединениях, связанных с дуговыми перенапряжениями;

- возможность длительного воздействия на изоляцию дуговых перенапряжений, что ведет к накоплению в ней дефектов и снижению срока службы;

- необходимость выполнения изоляции электрооборудования относительно земли на линейное напряжение;

- сложность обнаружения места повреждения;

- опасность электропоражения персонала и посторонних лиц при длительном существовании замыкания на землю в сети;

- сложность обеспечения правильной работы релейных защит от однофазных замыканий, так как реальный ток замыкания на землю зависит от режима работы сети (числа включенных присоединений).

### 3.2. Пример расчета тока ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью

Напряжение сети  $U = 6$  кВ.

Ячейка №1: кабельная линия,  $S = 70$  мм<sup>2</sup>,  $L = 55$  м.

Ячейка №2: воздушная линия,  $L = 3,0$  км.

Ячейка №3: воздушная линия,  $L = 4,5$  км.

Параметры двигателя:  $P_{\text{ном}} = 630$  кВт,  $\cos\varphi = 0,88$ ,  $\eta = 0,952$ .

Определяем полную мощность двигателя:

$$S_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\cos\varphi \cdot \eta} = \frac{0,63}{0,88 \cdot 0,952} = 0,752 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Определяем значение емкостного тока двигателя:

$$I_{\text{емк.дв}} \approx 0,017 \cdot S_{\text{ном}} = 0,017 \cdot 0,752 = 0,0128 \text{ А}.$$

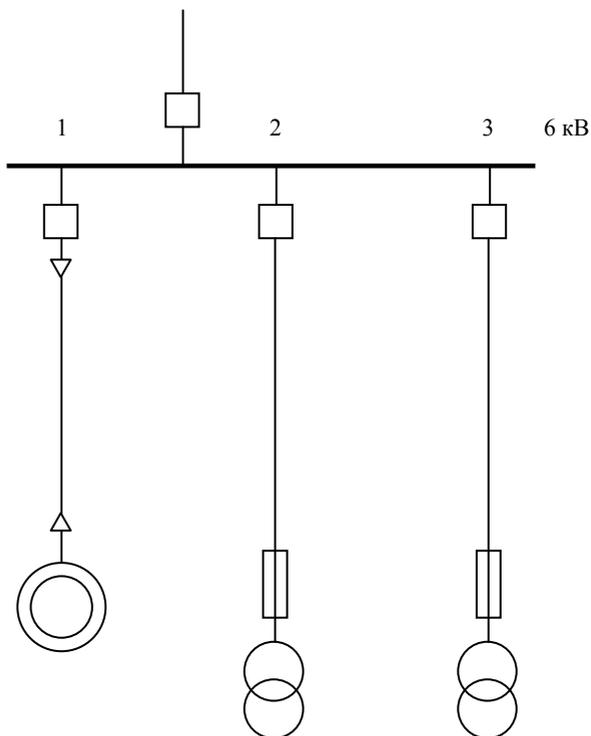


Рис. 3.2. Расчетная схема

Определим значение емкостного тока двигателя вторым способом. Определим значение электрической емкости двигателя:

$$C_{\text{дв}} \approx \frac{0,0187 \cdot S_{\text{ном.дв}} \cdot 10^{-6}}{1,2 \cdot \sqrt{U_{\text{ном.дв}} \cdot (1 + 0,08 \cdot U_{\text{ном.дв}})}} =$$

$$= \frac{0,0187 \cdot 0,752 \cdot 10^{-6}}{1,2 \cdot \sqrt{6 \cdot (1 + 0,08 \cdot 6)}} = 3,93 \cdot 10^{-9} \text{ Ф.}$$

По формуле 3.8 выполним расчет значения емкостного тока двигателя:

$$I_{с.дв} = 2\pi \cdot f \cdot \sqrt{3} \cdot C_{дв} \cdot U_{ном,дв} =$$

$$= 2\pi \cdot 50 \cdot \sqrt{3} \cdot 3,93 \cdot 10^{-9} \cdot 6000 = 0,0128 \text{ А.}$$

Результаты расчетов значения емкостного тока электродвигателя обоими способами одинаковы.

Рассчитаем емкостные токи в линиях и соответствующие им токи срабатывания защит.

$$I_{с.Л1} = I_{с1,уд} \cdot L_1 = 0,8 \cdot 55 \cdot 10^{-3} = 0,044 \text{ А.}$$

Общий емкостной ток двигателя и кабельной линии:

$$I_{л.собст.1} = I_{с.Л1} + I_{с.дв} = 0,0128 + 0,044 = 0,0568 \text{ А.}$$

При  $k_{бр} = 1,5$  и  $k_{н} = 1,2$

$$I_{сз.1} = k_{бр} \cdot k_{н} \cdot I_{л.собст.1} = 1,5 \cdot 1,2 \cdot 0,0568 = 0,1022 \text{ А;}$$

$$I_{л.собст.2} = \frac{U \cdot L_2}{350} = \frac{6 \cdot 3}{350} = 0,0514 \text{ А;}$$

$$I_{сз.2} = k_{бр} \cdot k_{н} \cdot I_{с2} = 1,5 \cdot 1,2 \cdot 0,0514 = 0,0925 \text{ А;}$$

$$I_{л.собст.3} = \frac{U \cdot L_3}{350} = \frac{6 \cdot 4,5}{350} = 0,0771 \text{ А;}$$

$$I_{сз.3} = k_{бр} \cdot k_{н} \cdot I_{л.собст.3} = 1,5 \cdot 1,2 \cdot 0,0771 = 0,1388 \text{ А.}$$

Суммарный емкостной ток на секции будет равен:

$$I_{с\Sigma} = I_{л.собст.1} + I_{л.собст.2} + I_{л.собст.3} =$$

$$= 0,0568 + 0,0514 + 0,0771 = 0,1853 \text{ А.}$$

Коэффициент чувствительности защиты от ОЗЗ линий 1, 2 и 3 будут равны:

$$k_{ч.1} = \frac{I_{с\Sigma} - I_{л.собст.1}}{I_{сз.1}} = \frac{0,1853 - 0,0568}{0,1022} = 1,3 < 1,5;$$

$$k_{ч.2} = \frac{I_{с\Sigma} - I_{л.собст.2}}{I_{сз.2}} = \frac{0,1853 - 0,0514}{0,0925} = 1,4 < 1,5;$$

$$k_{ч.3} = \frac{I_{с\Sigma} - I_{л.собст.3}}{I_{сз.3}} = \frac{0,1853 - 0,0771}{0,1388} = 0,8 < 1,5;$$

Для всех линии коэффициенты чувствительности меньше допустимого значения. Воспользуемся направленной токовой защитой и уменьшим коэффициент броска до значения  $k_{бр} = 1,0$ :

$$I_{сз.1} = k_{бр} \cdot k_n \cdot I_{c1} = 1,0 \cdot 1,2 \cdot 0,0568 = 0,0682 \text{ A};$$

$$k_{ч.1} = \frac{I_{с\Sigma} - I_{л.собст.1}}{I_{сз.1}} = \frac{0,1853 - 0,0568}{0,0682} = 1,9 > 1,5;$$

$$I_{сз.2} = k_{бр} \cdot k_n \cdot I_{c2} = 1,0 \cdot 1,2 \cdot 0,0514 = 0,0617 \text{ A};$$

$$k_{ч.2} = \frac{I_{с\Sigma} - I_{л.собст.2}}{I_{сз.2}} = \frac{0,1853 - 0,0514}{0,0617} = 2,2 > 1,5;$$

$$I_{сз.3} = k_{бр} \cdot k_n \cdot I_{c3} = 1,0 \cdot 1,2 \cdot 0,0771 = 0,0925 \text{ A};$$

$$k_{ч.3} = \frac{I_{с\Sigma} - I_{л.собст.3}}{I_{сз.3}} = \frac{0,1853 - 0,0771}{0,0925} = 1,2 < 1,5.$$

На участке 3 защита может действовать не селективно.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение 1. Справочные данные

Таблица П1.1

Сопротивление понижающих трансформаторов с вторичным напряжением  
0,4 кВ

Номинальная мощность, кВ·А	Схема соединения	Значение сопротивлений, мОм				
		прямой последовательности		нулевой последовательности		току однофазного КЗ
		$r_{1r}$	$x_{1r}$	$r_{0r}$	$x_{0r}$	$Z_T^{(1)}$
Масляные трансформаторы						
25	Y/Y <sub>H</sub>	154	244	1650	1930	3110
	Y/Z <sub>H</sub>	177	243	73	35,4	906
40	Y/Y <sub>H</sub>	88	157	952	1269	1944
	Y/Z <sub>H</sub>	100	159	44	13,4	562
63	Y/Y <sub>H</sub>	52	102	504	873	1237
	Y/Z <sub>H</sub>	59	105	28	12	360
100	Y/Y <sub>H</sub>	31,5	65	254	582	779
	Y/Z <sub>H</sub>	36,3	65,7	15,6	10,6	226
160	Y/Y <sub>H</sub>	16,6	41,7	151	367	486
	Δ/Y <sub>H</sub>	16,6	41,7	16,6	41,7	135
250	Y/Y <sub>H</sub>	9,4	27,2	96,5	235	311
	Δ/Y <sub>H</sub>	9,4	27,2	9,4	27,2	86,3
400	Y/Y <sub>H</sub>	5,5	17,1	55,6	149	195
	Δ/Y <sub>H</sub>	5,9	17	5,9	17	54
630	Y/Y <sub>H</sub>	3,1	13,6	30,2	95,8	128
	Δ/Y <sub>H</sub>	3,4	13,5	3,4	13,5	42
1000	Y/Y <sub>H</sub>	1,7	8,6	19,6	60,6	81
	Δ/Y <sub>H</sub>	1,9	8,6	1,9	8,6	26,4
1600	Y/Y <sub>H</sub>	1	5,4	16,3	50	63,5
	Δ/Y <sub>H</sub>	1,1	5,4	1,1	5,4	16,5
2500	Δ/Y <sub>H</sub>	0,64	3,46	0,64	3,46	10,56

Таблица П1.1 (продолжение)

Номинальная мощность, кВ·А	Схема соединения	Значение сопротивлений, мОм				
		прямой последовательности		нулевой последовательности		току однофазного КЗ $Z_T^{(1)}$
		$r_{1г}$	$x_{1г}$	$r_{0г}$	$x_{0г}$	
Сухие трансформаторы						
160	$\Delta/Y_H$	16,9	52,4	16,9	52,4	165
180	$Y/Y_H$	14,8	46,6	134	326	450
250	$\Delta/Y_H$	9,7	33,8	9,7	33,8	105
320	$Y/Y_H$	7,7	26,4	69,4	186	253
400	$\Delta/Y_H$	5,4	21,3	5,4	21,3	66
560	$Y/Y_H$	3,8	15,3	34	108	145
630	$\Delta/Y_H$	2,9	13,7	2,9	13,7	42
750	$Y/Y_H$	2,5	11,4	25,4	80,7	108
1000	$\Delta/Y_H$	1,8	8,6	1,8	8,6	26
1000	$Y/Y_H$	2,1	8,6	19,1	60,6	81
1600	$\Delta/Y_H$	1	5,5	1	5,5	17

Примечания: для трансформаторов со вторичным напряжением 0,23 кВ значения сопротивлений следует уменьшить в 3 раза, а для трансформаторов со вторичным напряжением 0,69 кВ – увеличить в 3 раза.

Таблица П1.2

## Сопротивление автоматических выключателей

Номинальный ток расцепителя, А	$r_a$ , мОм	$x_a$ , мОм	Номинальный ток расцепителя, А	$r_a$ , мОм	$x_a$ , мОм
2	493,5	987	140	1,3	0,7
6	32,1	65,34	200	1,1	0,5
10	21,0	29,7	400	0,65	0,17
16	9,3	13,5	600	0,41	0,13
40	7,5	5,0	1000	0,25	0,1
50	7,0	4,5	1600	0,14	0,08
70	3,5	2	2500	0,13	0,07
100	2,15	1,2	4000	0,1	0,05

Примечание: сопротивления включают в себя сопротивления токовых катушек и переходное сопротивление подвижных контактов.

Таблица П1.3

**Сопротивление разъемных контактов рубильников и разъединителей**

$I_{ном}, А$	80	100	145	200	400	600	1000	2000	3000
$r, мОм$	0,55	0,5	0,45	0,4	0,2	0,15	0,08	0,03	0,02

Таблица П1.4

**Сопротивления комплектных шинопроводов**

Тип шинопровода	Номинальный ток, А	Значение сопротивлений, мОм/м				
		прямой последовательности		нулевой последовательности		петли фаз-нуль
		$r_1$	$x_1$	$r_0$	$x_0$	
ШМА68П	4000	0,013	0,015	0,23	0,15	0,102
	2500	0,02	0,02	0,23	0,16	0,111
ШМА4	3200	0,01	0,005	0,2	0,12	0,084
	2500	0,017	0,008	0,23	0,16	0,082
	1600	0,03	0,014	0,14	0,13	0,087
	1250	0,034	0,016	0,19	0,18	0,112
ШМА73	1600	0,031	0,022	0,29	0,25	0,16
ШЗМ16	1600	0,014	0,006	0,29	0,25	0,07
ШРА73	630	0,1	0,13	0,59	0,62	0,394
	400	0,15	0,17	0,64	0,67	0,457
	250	0,21	0,21	0,84	0,84	0,6
ШРА4	630	0,1	0,13	0,59	0,62	
	400	0,15	0,17	0,64	0,67	
	250	0,21	0,21	0,84	0,84	

Таблица П1.5

## Переходное сопротивление неподвижных контактных соединений

<b>S, мм<sup>2</sup></b>	10	16	25	35	50	70	95	120	150	240
<b>Кабель алюминиевый</b>										
<b>r, МОм</b>	0,1	0,085	0,064	0,056	0,043	0,029	0,027	0,024	0,021	0,012
<b>Кабель медный</b>										
<b>r, МОм</b>	0,06	0,051	0,039	0,034	0,026	0,018	0,016	0,014	0,013	0,007
<b>Шинопроводы типа ШРА-73, ШРА-4</b>										
<b>I<sub>ном</sub>, А</b>	250	400	630	1600	2500	3200	4000			
<b>r, МОм</b>	0,009	0,006	0,0037	0,0034	0,0024	0,0012	0,0012			

Таблица П1.6

## Активное сопротивление электрической дуги при КЗ за трансформаторами разной мощности

<b>Мощность трансформатора, кВ·А</b>	250	400	630	1000	1600	2500
Расчетные условия КЗ	<b>r<sub>д</sub>, МОм</b>					
У выводов трансформатора:						
• в разделке кабелей	15	10	7	5	4	3
• в шинопроводе типа ШМА	–	–	–	6	4	3
• в шинопроводе типа ШРА	–	18	15	10	7	5
В конце шинопровода длиной 100 ÷ 150 м:						
• типа ШМА	–	–	–	6÷8	5÷7	4÷6
• типа ШРА	–	30÷45	25÷45	20÷40	15÷30	20÷40
В кабелях длиной более 100 м, сечением 25÷240 мм <sup>2</sup>	–	45÷16	45÷15	45÷12	45÷11	40÷10

Примечание: сопротивление дуги увеличивается с увеличением длины линии и уменьшением сечения кабеля.

Таблица П1.7

## Сопrotивление первичных обмоток катушечных трансформаторов тока

Коэффициент трансформации	Класс точности			
	1		2	
	$r_{гг}, \text{МОм}$	$x_{гг}, \text{МОм}$	$r_{гг}, \text{МОм}$	$x_{гг}, \text{МОм}$
20/5	42	67	19	17
30/5	20	30	8,2	8
40/5	11	17	4,8	4,2
50/5	7	11	3	2,8
75/5	3	4,8	1,3	1,2
100/5	1,7	2,7	0,75	0,7
150/5	0,75	1,2	0,33	0,3
200/5	0,42	0,67	0,19	0,17
300/5	0,2	0,3	0,09	0,08
400/5	0,11	0,17	0,05	0,04
500/5	0,05	0,07	0,02	0,02

Таблица П1.8

## Параметры кабеля с алюминиевыми жилами в непроводящей оболочке

Сечение кабеля, мм <sup>2</sup>	Сопrotивление четырехжильного кабеля в непроводящей оболочке, мОм/м, при температуре жилы 65°C			
	$r_1 = r_2$	$x_1 = x_2$	$r_0$	$x_0$
3x4+1x2,5	9,61	0,098	11,71	2,11
3x6+1x4	6,41	0,094	8,71	1,968
3x10+1x6	3,84	0,088	5,9	1,811
3x16+1x10	2,4	0,084	4,39	1,558
3x25+1x16	1,54	0,072	3,42	1,258
3x35+1+16	1,1	0,068	2,97	1,241
3x50+1x25	0,769	0,066	2,449	0,949
3x70+1x35	0,549	0,065	2,039	0,741
3x95+1x50	0,405	0,064	1,665	0,559
3x120+1x50	0,32	0,064	1,54	0,545
3x150+1x70	0,256	0,063	1,276	0,43

Таблица П1.9

**Параметры кабеля с медными жилами в непроводящей оболочке**

Сечение кабеля, мм <sup>2</sup>	Сопrotивление четырехжильного кабеля в непроводящей оболочке, мОм/м, при температуре жилы 65°C			
	$r_1 = r_2$	$x_1 = x_2$	$r_0$	$x_0$
3x6+1x4	3,54	0,1	4,19	1,55
3x10+1x6	2,13	0,095	2,82	1,46
3x16+1x10	1,33	0,09	2,07	1,31
3x25+1x16	0,85	0,089	1,63	1,11
3x35+1+16	0,61	0,086	1,37	1,09
3x50+1x25	0,43	0,086	1,18	0,88
3x70+1x35	0,3	0,074	1,01	0,654
3x95+1x50	0,22	0,072	0,84	0,54
3x120+1x50	0,18	0,07	0,7	0,47
3x150+1x70	0,14	0,07	0,66	0,42
3x185+1x95	0,115	0,069	0,54	0,34

Таблица П1.10

**Параметры кабеля с медными жилами в непроводящей оболочке**

Сечение кабеля, мм <sup>2</sup>	Сопrotивление четырехжильного кабеля в непроводящей оболочке, мОм/м, при температуре жилы 65°C			
	$r_1 = r_2$	$x_1 = x_2$	$r_0$	$x_0$
4x6	3,54	0,1	4,24	1,49
4x10	2,13	0,095	2,88	1,34
4x16	1,33	0,09	2,12	1,14
4x25	0,85	0,089	1,63	0,91
4x35	0,61	0,086	1,33	0,74
4x50	0,43	0,086	1,05	0,58
4x70	0,3	0,073	0,85	0,42
4x95	0,22	0,072	0,66	0,35
4x120	0,18	0,07	0,54	0,31
4x150	0,14	0,07	0,45	0,28
4x185	0,115	0,069	0,37	0,27

Таблица П1.11

## Значение емкостного тока кабельной линии с бумажной изоляцией

Сечение жил кабеля, мм <sup>2</sup>	Удельное значение емкостного тока $I_c$ , А/км при напряжении сети	
	6 кВ	10 кВ
16	0,40	0,55
25	0,50	0,65
35	0,58	0,72
50	0,68	0,80
70	0,80	0,92
95	0,90	1,04
120	1,00	1,16
150	1,18	1,30
185	1,25	1,47
240	1,45	1,70

## Приложение 2. Расчетные работы

### Задание №1

Определить точки на схеме электроснабжения, в которых знание тока однофазного короткого замыкания необходимо. Найти значение тока однофазного короткого замыкания в этих точках. При расчете необходимо учесть параметры системы  $U_c = 6$  кВ, понижающих трансформаторов Т1 и Т2, кабелей W до СТП Ш5 (на схеме они не показаны). Их параметры приведены в табл. П2.1. Параметры коммутационных аппаратов и кабельных линий приведены в приложении 1. Длины кабельных линий, не указанных в табл. П2.1., принять равными 10 м.

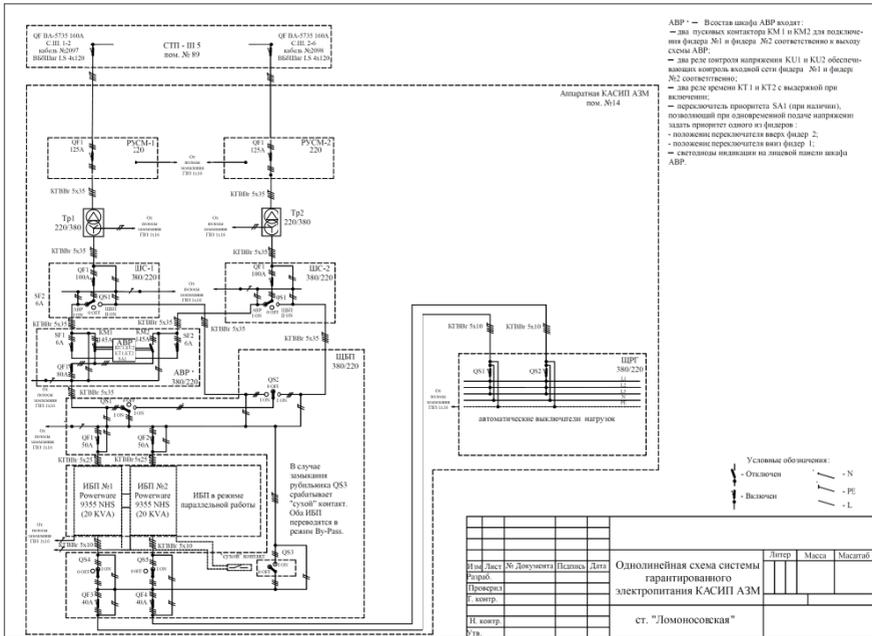


Рис. П.2.1. Расчетная схема

Таблица П2.1

Исходные данные к заданию №1

№ варианта	Ток КЗ системы $I_{кЗ}$ , кА	Т1, Т2		W		L от ЩРП до ЦРГ, м	$S_{ном}$ , кВ·А	Тр1, Тр2	
		тип	группа	тип	$L$ , м			$u_{кЗ}$ , %	$P_{кЗ}$ , Вт
1	7,0	ТМ-160	Y/Y <sub>n</sub>	АСБГ2х(3х150+1х70)	40	80	25	4,5	600
2	7,5	ТМ-160	$\Delta$ Y <sub>n</sub>	ВБ6Шнг-LS 3х(4х185)	45	85	40	4,5	880
3	6,0	ТМ-250	Y/Y <sub>n</sub>	СБГ3х(3х150+1х70)	50	90	63	4,5	1280
4	6,5	ТМ-250	$\Delta$ Y <sub>n</sub>	АСБГ3х(3х150+1х70)	55	95	25	4,5	600
5	6,0	ТМ-400	Y/Y <sub>n</sub>	ВБ6Шнг-LS 3х(4х150)	60	100	40	4,5	880
6	6,5	ТМ-400	$\Delta$ Y <sub>n</sub>	ВБ6Шнг-LS 3х(4х150)	65	105	63	4,5	1280
7	5,0	ТМ-630	Y/Y <sub>n</sub>	ААБГ2х(3х120+1х50)	70	110	25	4,5	600
8	5,5	ТМ-630	$\Delta$ Y <sub>n</sub>	ВБ6Шнг-LS 3х(4х150)	75	80	40	4,5	880
9	4,5	ТМ-1000	Y/Y <sub>n</sub>	ВБ6Шнг-LS 2х(4х185)	80	85	63	4,5	1280
10	4,6	ТМ-1000	$\Delta$ Y <sub>n</sub>	ВБ6Шнг-LS 3х(4х150)	85	90	25	4,5	600
11	6,2	ТМ-1600	Y/Y <sub>n</sub>	АСБГ3х(3х95+1х50)	90	95	40	4,5	880
12	4,9	ТМ-1600	$\Delta$ Y <sub>n</sub>	ВБ6Шнг-LS 3х(4х150)	40	100	63	4,5	1280
13	3,9	ТМ-2500	$\Delta$ Y <sub>n</sub>	АСБГ3х(3х150+1х70)	45	105	25	4,5	600

Таблица П2.1 (продолжение)

№ варианта	Ток КЗ системы $I_{к3}$ , кА		Т1, Т2		W	L, м	L от ЩБП до ЩРГ, м		$S_{ном}$ , кВ·А	Тр1, Тр2	
	тип	группа	тип	группа			$u_{кз}$ , %	$P_{кз}$ , Вт			
14	ТС3-160	$\Delta Y_n$	ВБ6Шнг-LS 3х(4х185)	$\Delta Y_n$	50	110	40	4,5	880		
15	ТС3-180	$Y/Y_n$	ВБ6Шнг-LS 3х(4х150)	$Y/Y_n$	55	80	63	4,5	1280		
16	ТС3-250	$\Delta Y_n$	АСБГ 3х(3х150+1х70)	$\Delta Y_n$	60	85	25	4,5	600		
17	ТС3-320	$Y/Y_n$	ВБ6Шнг-LS 3х(4х150)	$Y/Y_n$	65	90	40	4,5	880		
18	ТС3-400	$\Delta Y_n$	ВБ6Шнг-LS 3х(4х185)	$\Delta Y_n$	70	95	63	4,5	1280		
19	ТС3-560	$Y/Y_n$	ВБ6Шнг-LS 3х(4х150)	$Y/Y_n$	75	100	25	4,5	600		
20	ТС3-630	$\Delta Y_n$	АСБГ 2х(3х150+1х70)	$\Delta Y_n$	80	105	40	4,5	880		
21	ТС3-750	$Y/Y_n$	ВБ6Шнг-LS 3х(4х150)	$Y/Y_n$	85	110	63	4,5	1280		
22	ТС3-1000	$\Delta Y_n$	СБГ 2х(3х150+1х70)	$\Delta Y_n$	90	80	25	4,5	600		
23	ТС3-1000	$Y/Y_n$	ВБ6Шнг-LS 3х(4х150)	$Y/Y_n$	40	85	40	4,5	880		
24	ТС3-1600	$\Delta Y_n$	АСБГ 3х(3х150+1х70)	$\Delta Y_n$	45	90	63	4,5	1280		
25	ТМ-400	$Y/Y_n$	ВБ6Шнг-LS 3х(4х150)	$Y/Y_n$	50	95	25	4,5	600		
26	ТМ-400	$\Delta Y_n$	СБГ 2х(3х150+1х70)	$\Delta Y_n$	55	100	40	4,5	880		
27	ТМ-630	$Y/Y_n$	ВБ6Шнг-LS 3х(4х150)	$Y/Y_n$	60	105	63	4,5	1280		

Таблица П2.1 (продолжение)

№ варианта	Ток КЗ системы $I_{к3}$ , кА	Т1, Т2		W	L от ЩБП до ЩРГ, м		$S_{ном}$ , кВ·А	$u_{кз}$ , %	Тр1, Тр2	$P_{кз}$ , Вт
		тип	группа		тип	$L_1$ , м				
28	4,9	ТМ-630	$\Delta Y_n$	АСБГ3х(3х150+1х70)	65	110	25	4,5		600
29	4,5	ТМ-1000	$Y/Y_n$	ВБ6Шнг-LS 3х(4х150)	70	80	40	4,5		880
30	7,0	ТС3-400	$\Delta Y_n$	СБГ2х(3х150+1х70)	75	85	63	4,5		1280
31	4,3	ТС3-560	$Y/Y_n$	ВБ6Шнг-LS 3х(4х150)	80	90	25	4,5		600
32	5,1	ТС3-630	$\Delta Y_n$	АСБГ2х(3х150+1х70)	85	95	40	4,5		880
33	4,1	ТС3-750	$Y/Y_n$	СБГ2х(3х150+1х70)	90	100	63	4,5		1280
34	4,5	ТС3-750	$Y/Y_n$	ВБ6Шнг-LS 3х(4х150)	40	105	25	4,5		600
35	5,2	ТС3-1000	$\Delta Y_n$	ААБГ2х(3х120+1х50)	45	110	40	4,5		880
36	5,5	ТС3-1000	$Y/Y_n$	СБГ2х(3х150+1х70)	50	80	63	4,5		1280
37	4,9	ТС3-1600	$\Delta Y_n$	ААБГ2х(3х120+1х50)	55	85	25	4,5		600
38	5,3	ТМ-400	$Y/Y_n$	ВБ6Шнг-LS 3х(4х185)	60	90	40	4,5		880
39	6,1	ТМ-400	$\Delta Y_n$	ААБГ2х(3х120+1х50)	65	95	63	4,5		1280
40	4,9	ТМ-630	$Y/Y_n$	ВБ6Шнг-LS 3х(4х150)	70	100	40	4,5		880
41	5,5	ТМ-630	$\Delta Y_n$	СБГ2х(3х150+1х70)	75	105	63	4,5		1280

## Задание №2

Определить уставки срабатывания защиты от однофазных замыканий на землю для схемы на рис. П2.2.

Принять для двигателей  $\cos\varphi = 0,9$ ;  $\eta = 0,95$ .

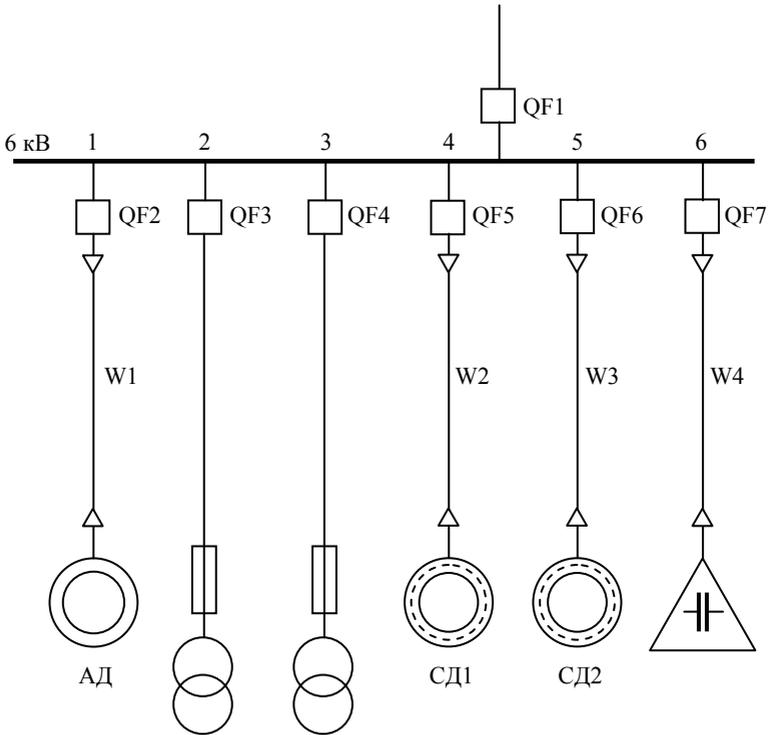


Рис. П2.2. Расчетная схема

Таблица П2.2

## Исходные данные к заданию №2

№ варианта	АД	СД1		СД2		
	Р, кВт	тип	Р, кВт	тип СДН	Р, кВт	п, об/мин
1	500	СТД	630	15-39-6	1250	1000
2	530	СТД	800	15-49-6	1600	1000
3	560	СТД	1000	15-64-6	2000	1000
4	600	СТД	1250	15-76-6	2500	1000
5	630	СТД	1600	16-69-6	3200	1000
6	670	СТД	2000	16-84-6	4000	1000
7	710	СТД	2500	16-104-6	5000	1000
8	750	СТД	3200	16-39-8	1250	750
9	800	СТД	4000	16-44-8	1600	750
10	850	СТД	5000	16-54-8	2000	750
11	900	СТД	6300	16-71-8	2500	750
12	950	СТД	8000	17-49-8	3200	750
13	1000	СТД	10000	17-59-8	4000	750
14	1120	СТД	12500	17-76-8	5000	750
15	1400	СТД	630	17-94-8	6300	750
16	1600	СТД	800	16-44-10	1250	600
17	1800	СТД	1000	16-54-10	1600	600
18	2000	СТД	1250	16-71-10	2000	600
19	2250	СТД	1600	17-49-10	2500	600
20	2500	СТД	2000	17-59-10	3200	600
21	2800	СТД	2500	17-76-10	4000	600
22	3150	СТД	3200	17-94-10	5000	600
23	3550	СТД	4000	18-71-10	6300	600
24	4000	СТД	5000	17-34-12	1250	500
25	4500	СТД	6300	17-41-12	1600	500
26	5000	СТД	8000	17-49-12	2000	500
27	5600	СТД	10000	17-59-12	2500	500
28	6300	СТД	12500	17-76-12	3200	500
29	7100	СТД	630	18-59-12	4000	500
30	8000	СТД	800	18-71-12	5000	500
31	9000	СТД	1000	18-91-12	6300	500
32	3550	СТД	1250	18-111-12	8000	500
33	900	СТД	1600	17-41-16	1250	375
34	950	СТД	2000	17-49-16	1600	375
35	1000	СТД	2500	17-59-16	2000	375
36	1120	СТД	3200	18-49-16	2500	375
37	1400	СТД	4000	18-61-16	3200	375

Таблица П2.2 (продолжение)

№ варианта	АД	СД1		СД2		
	Р, кВт	тип	Р, кВт	Тип СДН	Р, кВт	п, об/мин
38	1600	СТД	5000	18-74-16	4000	375
39	1800	СТД	6300	18-31-20	1250	300
40	2000	СТД	8000	18-39-20	1600	300
41	2250	СТД	10000	18-49-20	2000	300
42	2500	СТД	12500	18-61-20	2500	300
43	2800	СТД	630	18-74-20	3200	300
44	3150	СТД	800	18-39-21	1250	250
45	3550	СТД	1000	18-49-24	1600	250
46	4000	СТД	1250	18-61-24	2000	250
47	4500	СТД	1600	19-46-24	2500	250
48	5000	СТД	2000	19-54-24	3200	250

**Примечание.** Синхронные двигатели типа СДН являются явнополюсными, типа СТД – неявнополюсными.

Таблица П2.3

№ варианта	№ ячейки											
	1		2		3		4		5		6	
	КЛ		ВЛ		ВЛ		КЛ		КЛ		КЛ	
	L, м	S, мм <sup>2</sup>	L, км	L, км	L, м	S, мм <sup>2</sup>						
1	50	25	3,0	4,8	100	35	50	50	100	50		
2	55	25	3,5	5,0	95	35	52	70	98	70		
3	60	25	4,0	5,2	90	35	54	70	96	95		
4	65	25	4,5	5,4	85	50	56	95	94	120		
5	70	25	5,0	5,6	80	70	58	120	92	150		
6	75	25	5,5	5,8	75	70	60	185	90	50		
7	80	25	6,0	6,0	70	95	62	2x95	88	70		
8	85	25	6,5	6,2	65	120	64	50	86	95		
9	90	35	3,2	6,4	60	185	66	70	84	120		
10	95	35	3,4	3,0	55	2x95	68	70	82	150		
11	100	35	3,6	3,5	50	2x185	70	95	80	50		
12	50	35	3,8	4,0	100	2x240	72	120	78	70		
13	55	35	4,0	4,5	95	3x150	74	185	76	95		
14	60	50	4,2	5,0	90	3x240	76	2x95	74	120		
15	65	50	4,4	5,5	85	35	78	2x185	72	150		
16	70	50	4,6	6,0	80	35	80	50	70	50		

Таблица П2.3 (продолжение)

№ варианта	№ ячейки									
	1		2	3	4		5		6	
	КЛ		ВЛ	ВЛ	КЛ		КЛ		КЛ	
	L, м	S, мм <sup>2</sup>	L, м	L, м	L, м	S, мм <sup>2</sup>	L, м	S, мм <sup>2</sup>	L, м	S, мм <sup>2</sup>
17	75	70	4,8	6,5	75	35	82	70	68	70
18	80	70	5,0	3,2	70	50	84	70	66	95
19	85	95	5,2	3,4	65	70	86	95	64	120
20	90	95	5,4	3,6	60	70	88	120	62	150
21	95	120	5,6	4,8	55	95	90	185	60	50
22	100	120	5,8	5,0	50	120	92	2x95	58	70
23	50	150	6,0	5,2	100	185	94	2x185	56	95
24	55	185	6,2	5,4	95	2x95	96	50	54	120
25	60	240	6,4	5,6	90	2x185	98	70	52	150
26	65	2x95	3,0	5,8	85	2x240	100	70	50	50
27	70	2x120	3,5	6,0	80	3x150	50	95	100	70
28	75	2x185	4,0	6,2	75	3x240	52	120	98	95
29	80	2x185	4,5	6,4	70	35	54	185	96	120
30	85	2x240	5,0	3,0	65	35	56	2x95	94	150
31	90	2x240	5,5	3,5	60	35	58	2x185	92	50
32	95	150	6,0	4,0	55	50	60	2x240	90	70
33	100	35	6,5	4,5	50	70	62	50	88	95
34	50	35	3,2	5,0	100	70	64	70	86	120
35	55	35	3,4	5,5	95	95	66	70	84	150
36	60	50	3,6	6,0	90	120	68	95	82	50
37	65	50	3,8	6,5	85	185	70	120	80	70
38	70	50	4,0	3,2	80	2x95	72	185	78	95
39	75	70	4,2	3,4	75	2x185	74	50	76	120
40	80	70	4,4	3,6	70	2x240	76	70	74	150
41	85	95	4,6	4,8	65	3x150	78	70	72	50
42	90	95	4,8	5,0	60	3x240	80	95	70	70
43	95	120	5,0	5,2	55	35	82	120	68	95
44	100	120	5,2	5,4	50	35	84	50	66	120
45	80	150	5,4	5,6	80	35	86	70	64	150
46	85	185	5,6	5,8	75	50	88	70	62	50
47	90	240	5,8	6,0	70	70	90	95	60	70
48	95	2x95	5,5	6,2	65	70	92	120	58	95

## РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

### Основная

1. *Анискин Б.Г.* Электрооборудование. Методическое пособие по дипломному проектированию / Н.В. Нефедова. СПГГИ (ТУ), 2008.
2. Электрификация горного производства. В 2-х томах. Под ред. Л.А. Пучкова, Г.Г. Пивняка. М.: МГУ, 2007.
3. *Цапенко У.Ф.* Электробезопасность на горных предприятиях /С.З. Шкундин. М.: Мир горной книги, 2006.
4. *Чеботаев Н.И.* Электрооборудование и электроснабжение открытых горных работ. М.: Мир горной книги, 2006.
5. *Чеботаев Н.И.* Электрификация горных предприятий / Л.А. Плащанский. Учебное пособие. М.: Мир горной книги, 2005.
6. *Чеботаев Н.И.* Электрификация горных предприятий. Ч. 1. «Безопасность при эксплуатации электротехнических устройств». Учебное пособие. М.: Мир горной книги, 2006.

### Дополнительная

7. *Анискин Б.Г.* Электроснабжение горных предприятий. Ч.1. Подземные горные работы. Методические указания. СПГГИ (ТУ), 2006.
8. *Анискин Б.Г.* Электроснабжение горных предприятий. Ч. 2. Открытые горные работы. Методические указания. СПГГИ (ТУ), 2006.
9. *Медведев Г.Д.* Электрооборудование и электроснабжение горных предприятий. М.: Недра, 1988.
10. *Цапенко Е.Ф.* Горная электротехника / М.И. Мирский, О.В. Сухарев. М.: Недра, 1986.
11. *Щуцкий В.И.* Электрификация подземных горных работ / Н.И. Волощенко, Л.А. Плащанский. М.: Недра, 1986.
12. Электрификация горных работ. Под ред. Г.Г. Пивняка, М.: Недра, 1992.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	3
1. Общие положения .....	4
2. Расчет тока однофазного короткого замыкания в сети с глухозаземленной нейтралью .....	5
2.1. Методы расчета .....	5
2.2. Пример расчета по методу симметричных составляющих .....	12
3. Расчет тока однофазного короткого замыкания в сети с изолированной нейтралью .....	18
3.1. Методы расчета .....	18
3.2. Пример расчета тока ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью .....	26
Приложения .....	30
Приложение 1. Справочные данные .....	30
Приложение 2. Расчетные работы .....	37
Задание №1 .....	37
Задание №2 .....	41
Рекомендательный библиографический список .....	45

**ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ  
ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

**РАСЧЕТ ТОКОВ  
ОДНОФАЗНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ**

*Методические указания к самостоятельным работам  
для студентов специальности 21.05.04*

Сост.: *Д.А. Устинов, А.В. Кривенко*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой  
электроэнергетики и электромеханики

Ответственный за выпуск *Д.А. Устинов*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 18.01.2021. Формат 60×84/16.  
Усл. печ. л. 2,7. Усл.кр.-отт. 2,7. Уч.-изд.л. 2,3. Тираж 75 экз. Заказ 10.

Санкт-Петербургский горный университет  
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета  
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2