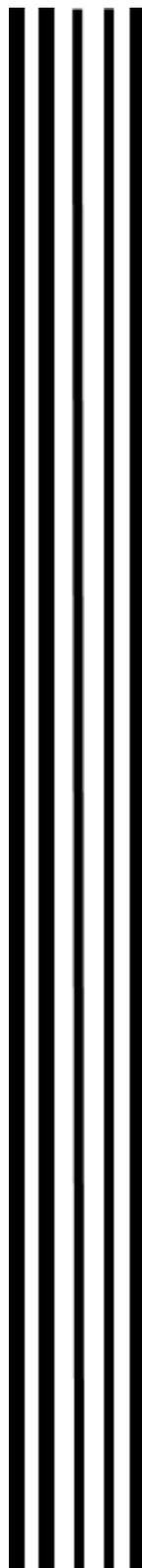


КГЭУ



Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Казанский государственный энергетический университет»

РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Учебно-методическое пособие

Казань
2022

УДК 621.311.064.1

ББК 31.27

Р24

Р24 Расчет токов короткого замыкания : учебно-методическое пособие / составители: Э. Ф. Хакимзянов, Ю. В. Писковацкий. – Казань : КГЭУ, 2022. – 67 с.

Приведены основные принципы и методики расчетов параметров схем замещения прямой, обратной, нулевой последовательности, токов аварийных режимов в электроэнергетических системах для последующего выбора уставок срабатывания устройств релейной защиты. Приведен пример расчета токов междуфазных коротких замыканий и коротких замыканий одной и двух фаз на землю.

Предназначено для обучающихся по образовательной программе направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника, направленность (профиль) «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем».

УДК 621.311.064.1

ББК 31.27

ВВЕДЕНИЕ

В энергетических системах на электрооборудовании электростанций, в электрических сетях и на электроустановках потребителей электроэнергии могут возникать короткие замыкания (КЗ). При этом токи в ветвях электроустановки, примыкающих к месту его возникновения, резко возрастают, превышая наибольший допустимый ток [1]. При протекании тока КЗ выделяется большое количество тепла, что вызывает опасный нагрев неповрежденных линий и оборудования и может привести к термическому или механическому повреждению. Горение дуги в месте возникновения КЗ является причиной значительных повреждений частей электрооборудования, может приводить к пожарам.

В инженерной практике расчеты токов КЗ в электрических системах выполняются с целью [2]:

- выбора уставок устройств релейной защиты и автоматики (РЗА), их наладки и проверки поведения в аварийных ситуациях, связанных с КЗ;
- проверки электрических аппаратов – выключателей, разъединителей, короткозамыкателей и т. д. – на термическую и динамическую стойкость при протекании токов КЗ;
- реализации алгоритмов определения места повреждения (ОМП) на воздушных линиях электропередачи (ЛЭП).

В последнее время практические расчеты токов КЗ выполняются в программных комплексах. Имеющиеся сегодня компьютерные программы позволяют не только выполнить расчеты токов КЗ, но и рассчитать параметры срабатывания (уставки) устройств РЗА, т. е. фактически выполнить все основные расчеты, связанные с проектированием и эксплуатацией устройств РЗА. Хотя широкое применение вычислительной техники и специализированных программ дает возможность повысить точность расчетов токов КЗ, позволяет значительно сократить время расчетов, обучающиеся должны уметь выполнять расчеты токов КЗ вручную.

Основной целью данного пособия является закрепление изучаемого теоретического материала и приобретение практического навыка расчёта токов для целей РЗА при симметричных и несимметричных КЗ. Пособие может быть использовано при выполнении курсового или дипломного проекта по РЗА.

ГЛАВА 1. ВЫБОР И СОСТАВЛЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ И СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ

1.1. Исходные положения и общие указания по выполнению расчетов

Методика расчета токов КЗ, приведенная ниже, позволяет определить значение периодической составляющей полного тока КЗ для начального момента времени, т. е. действующее значение сверхпереходного тока. Именно эта величина является расчетной для выбора параметров устройств РЗА.

Как известно, при разработке и эксплуатации устройств РЗА помимо начальных значений токов и напряжений требуется также знать изменение расчетных величин во времени на отдельных участках схемы.

Однако при учете действия установленных на генераторах автоматических регуляторов и форсировки возбуждения токи в ветви КЗ (как фазные, так и отдельных последовательностей) в большинстве случаев не очень заметно изменяются во времени, в особенности при несимметричных КЗ и больших удаленностях места КЗ от генерирующих источников.

Однако поскольку КЗ в электрической цепи представляет собой сложный режим, сопровождающийся переходным процессом, в целях упрощения практических расчетов принят ряд допущений, которые, как показывают анализ осциллограмм и опыт эксплуатации устройств РЗА, незначительно сказываются на точности результатов расчетов. К основным допущениям относятся [3, 4]:

- в электрической системе отсутствуют качания, т. е. не учитывают угол сдвига между электродвижущими силами (ЭДС) параллельно работающих генераторов;
- отсутствует насыщение магнитных систем генераторов, трансформаторов, двигателей;
- практически не учитывают емкостную проводимость ЛЭП, за исключением линий напряжением выше 330 кВ значительной протяженности (≥ 150 км);
- не учитывают токи намагничивания трансформаторов и автотрансформаторов;
- не учитывают активные сопротивления генераторов, трансформаторов, реакторов из-за их незначительной величины по сравнению с индуктивными сопротивлениями;
- не учитывают незначительную несимметрию трехфазных электрических систем (неравенство сопротивлений фаз);
- не учитывают активное сопротивление ЛЭП, если $R_{л} < 1/3 X_{л}$;

– как правило, не учитывают влияние нагрузки в процессе КЗ. Исключение составляют отдельные расчеты, в которых учет нагрузки ведется для начального момента КЗ, так как в этот момент электродвигатели являются дополнительными источниками и подпитывают точку КЗ. Это происходит в том случае, если узел нагрузки, в которой преобладает двигательная нагрузка, расположен вблизи места КЗ и КЗ сопровождается значительным снижением напряжения.

Расчеты токов КЗ для релейной защиты проводят, как правило, в именованных единицах приближенным методом, используя систему симметричных составляющих. Первоначально на электрической схеме защищаемой сети намечают расчетные точки КЗ. Обычно это сборные шины разных напряжений всех подстанций сети, начало, середина и конец каждой линии. Затем составляют схемы замещения прямой (обратной) и нулевой последовательностей, на которых также указывают места расчетных точек КЗ. В дальнейшем производят выбор расчетных режимов для защит, вычисляют полные токи в месте КЗ и находят распределение токов по ветвям схемы.

1.2. Составление расчётной схемы

Расчетная схема является изображением первичной схемы сети в однофазном исполнении, на которой указывают паспортные данные всех входящих в нее элементов, имеющих электрическое сопротивление, – генераторов, трансформаторов, ЛЭП, реакторов, электродвигателей. Если необходимо учесть питание места КЗ от энергосистемы, параллельно работающей с рассчитываемой сетью, в расчетную схему вводят эквивалентный генератор с сопротивлением, равным эквивалентному сопротивлению энергосистемы, и ее эквивалентная ЭДС [4, 5].

На основании расчетной схемы составляют схему замещения, в которой все перечисленные элементы заменяют своими электрическими сопротивлениями. Для источников питания обязательно указывают ЭДС.

Расчет токов КЗ сводится к определению токов и напряжений на основной ступени, а значения истинных токов и напряжений на других ступенях напряжения находят обратным пересчетом в соответствии с коэффициентом трансформации трансформаторов.

При расчете токов КЗ в именованных единицах выбирают среднее номинальное напряжение $U_{\text{ср.ном}}$, соответствующее основному напряжению сети, к которому приводят сопротивления всех элементов сети.

В табл. 1 приведены значения средних номинальных напряжений $U_{\text{ср.ном}}$, используемых в расчетах токов КЗ, а также номинальные и максимальные значения напряжений.

При приведении значений отдельных величин к одной ступени напряжения следует учитывать известные соотношения для приведения напряжений (ЭДС), токов и сопротивлений с одной стороны трансформатора на другую [4, 5].

Таким образом, приведение ЭДС E и сопротивлений Z , заданных в именованных единицах для элемента, отделенного от ступени, принятой за основную, несколькими каскадно включенными трансформаторами с коэффициентами трансформации K_1, K_2, \dots, K_n , производят по соотношениям:

$$E = E \cdot (K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n); \quad (1)$$

$$Z = Z \cdot (K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n)^2, \quad (2)$$

где звезда над величинами – знак приведения.

Если ЭДС и сопротивления элементов заданы в относительных единицах $\left(\begin{matrix} E, Z \\ * \quad * \end{matrix} \right)$ при номинальных условиях $U_{\text{н}}$, $I_{\text{н}}$ и $S_{\text{н}}$, то в формулах приведения (1) и (2) ЭДС и сопротивление равны:

$$E = E \cdot U_{\text{н}}; \quad (3)$$

$$Z = Z \cdot \frac{U_{\text{н}}^2}{S_{\text{н}}}; \quad (4)$$

$$Z = Z \cdot \frac{U_{\text{н}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{н}}}. \quad (5)$$

Подставив выражения (3) – (5) в (1) и (2), получим:

$$E = E \cdot U_{\text{н}} \cdot (K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n), \quad (6)$$

$$Z = Z \cdot \frac{U_{\text{н}}^2}{S_{\text{н}}} \cdot (K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n)^2, \quad (7)$$

$$Z = Z \cdot \frac{U_{\text{н}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{н}}} \cdot (K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n)^2. \quad (8)$$

Таблица 1

Значения средних номинальных напряжений [6]

Напряжение U , кВ			Режим заземления нейтрали в сети
Номинальное	Наибольшее	Среднее номинальное	
0,22/0,127 0,38/0,22 0,66/0,38	– 0,4/0,23 0,69/0,4	0,22/0,127 0,4/0,23 0,69/0,4	Работают с глухозаземленной нейтралью
3,0 6,0 10,0 20,0 35,0	3,6 7,2 12,0 24,0 40,5	3,15 6,3 10,5 20,0 37,0	Работают с изолированной, компенсированной или заземлёнными через резистор нейтралью
110 220 330 500 750	126 252 363 525 787	115 230 340 515 750	Работают с эффективно или глухозаземленной нейтралью

Расчет сопротивлений элементов схемы замещения производят, исходя из паспортных (номинальных) параметров элементов. Ниже приводятся схемы замещения элементов электрической сети и их паспортные данные, необходимые для расчетов токов КЗ.

1.2.1. Генераторы и синхронные компенсаторы

Схема замещения генератора представлена на рис. 1. В паспортных данных, как правило, указывают следующую информацию:

S_H – номинальная полная мощность, МВ·А;

P_H – номинальная активная мощность, МВт;

$\cos\varphi_H$ – номинальный коэффициент мощности;

U_H – номинальное междуфазное напряжение, кВ;

x''_{d*} – сверхпереходное сопротивление электрической машины по продольной оси, соответствующее ее сопротивлению в начальный момент КЗ, о. е. (значение принимают по табл. 2);

x''_d – сверхпереходное сопротивление, Ом, рассчитывают по формуле:

$$x''_d = x''_{d*} \cdot \frac{U_{\text{ср.ном}}^2}{S_H}; \quad (9)$$

E_{q*}'' – сверхпереходная ЭДС, о. е. (значение принимают по табл. 2);
 E_q'' – сверхпереходная ЭДС, кВ, определяют по выражению:

$$E_q'' = E_{q*}'' \cdot U_{\text{ср.ном.}} \quad (10)$$

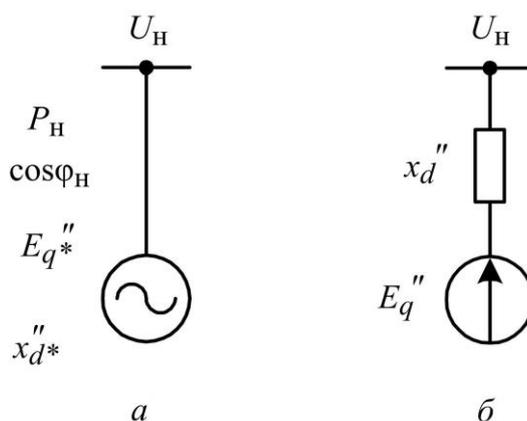


Рис. 1. Генератор, или синхронный компенсатор:
 а – условное обозначение; б – схема замещения

В табл. 2 приведены средние значения x_{d*}'' и E_{q*}'' в о. е. при номинальных условиях для отечественных электрических машин [3].

Таблица 2

Средние значения x_{d*}'' и E_{q*}''

Тип машины	x_{d*}'' , о.е.	E_{q*}'' , о.е.
Турбогенератор мощностью: – до 100 МВт – от 100 МВт до 500 МВт	0,125 0,2	1,08 1,13
Генератор с демпферными обмотками	0,2	1,13
Генератор без демпферных обмоток	0,27	1,18
Синхронный компенсатор	0,2	1,2
Синхронный двигатель	0,2	1,1
Асинхронный двигатель	0,2	0,9
Обобщенная нагрузка	0,35	0,85

Если в паспорте заданы P_H и $\cos\varphi_H$, то S_H определяется по выражению:

$$S_H = \frac{P_H}{\cos\varphi_H} \quad (11)$$

Значения x_{d*}'' и E_{q*}'' указывают на схеме замещения (рис. 1, б).

1.2.2. Электродвигатели напряжением выше 1000 В

Схема замещения электродвигателя представлена на рис. 2. В паспортных данных, как правило, указывают следующую информацию:

P_H – номинальная активная мощность, МВт;

$\cos\varphi_H$ – номинальный коэффициент мощности;

U_H – номинальное междуфазное напряжение, кВ;

K_{II} – кратность пускового тока по отношению к номинальному;

x_{d*}'' – сверхпереходное сопротивление электрической машины, о. е., определяется по кратности пускового тока:

$$x_{d*}'' = \frac{1}{K_{II}}; \quad (12)$$

x_d'' – сверхпереходное сопротивление, Ом, рассчитывается по формуле (9);

E_{q*}'' – сверхпереходная ЭДС, о. е. (принимается по табл. 2).

E_q'' – сверхпереходная ЭДС, кВ, определяется по выражению (10).

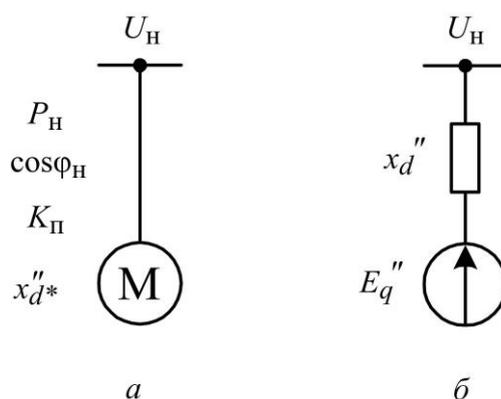


Рис. 2. Электродвигатель:

a – условное обозначение; b – схема замещения

Сверхпереходное сопротивление x_{d*}'' также может определяться по табл. 2, если неизвестно значение коэффициента K_{II} .

1.2.3. Трансформаторы

Силовые трансформаторы, установленные на электростанциях (повышающие) или подстанциях (понижающие), служат для преобразования электроэнергии одного напряжения в другое, связи между отдельными

элементами (участками) электрической сети, регулирования напряжения и перетоков мощности. По числу обмоток трансформаторы классифицируются на двухобмоточные, трехобмоточные и с расщепленными обмотками. Двухобмоточные трансформаторы имеют обмотки высшего напряжения (ВН) и низшего напряжения (НН); трехобмоточные – обмотки высшего напряжения, среднего напряжения (СН) и низшего напряжения.

1.2.4. Двухобмоточные трансформаторы

В схему замещения трансформатора входит общее сопротивление обеих его обмоток без учета сопротивления ветви намагничивания (рис. 3).

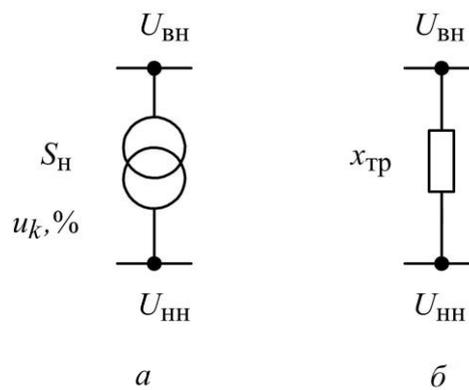


Рис. 3. Двухобмоточный трансформатор:
a – условное обозначение; *б* – схема замещения

В паспортных данных, как правило, указывают следующую информацию:

$S_{Н}$ – полная мощность трансформатора, МВ·А;

$U_{ВН}$ – номинальное междуфазное напряжение обмотки высшего напряжения, кВ;

$U_{НН}$ – номинальное междуфазное напряжение обмотки низшего напряжения, кВ;

u_k – напряжение короткого замыкания, %.

Для трансформаторов, имеющих устройство регулирования напряжения под нагрузкой (РПН), дополнительно необходимо иметь значения диапазона регулирования напряжения и напряжений u_k , %, соответствующие крайним положениям РПН.

Значение u_k , %, практически равно полному сопротивлению трансформатора в относительных единицах. У трансформаторов мощностью 1 МВ·А и более активное сопротивление значительно меньше индуктивного и им можно пренебречь, т. е. $x_{Тр} \approx Z_{Тр}$.

Сопротивление двухобмоточного трансформатора $x_{\text{тр}}$ определяется по следующей формуле [4, 5]:

$$x_{\text{тр}} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{\text{ср.ном}}^2}{S_{\text{T}}} \quad (13)$$

1.2.5. Трансформаторы трехобмоточные и автотрансформаторы

Схему замещения трансформаторов представляют в виде трехлучевой звезды (рис. 4).

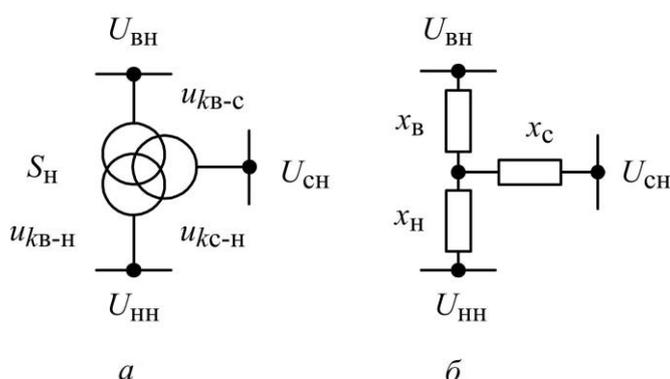


Рис. 4. Трёхобмоточный трансформатор:
 а – условное обозначение; б – схема замещения

В паспортных данных, как правило, указывают следующую информацию:

S_{H} – полная мощность трансформатора, МВ·А;

$U_{\text{ВН}}$, $U_{\text{СН}}$, $U_{\text{НН}}$ – номинальные напряжения обмоток, кВ;

$u_{\text{кв-с}}$, $u_{\text{кс-н}}$, $u_{\text{кв-н}}$ – напряжения короткого замыкания между обмотками, %.

Напряжения короткого замыкания для каждой обмотки определяются из уравнений:

$$\left. \begin{aligned} u_{\text{кВ}} &= 0,5 \cdot (u_{\text{кв-с}} + u_{\text{кв-н}} - u_{\text{кс-н}}), \\ u_{\text{кС}} &= 0,5 \cdot (u_{\text{кв-с}} + u_{\text{кс-н}} - u_{\text{кв-н}}), \\ u_{\text{кН}} &= 0,5 \cdot (u_{\text{кв-н}} + u_{\text{кс-н}} - u_{\text{кв-с}}). \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

По этим значениям u_k определяются значения $x_{\text{В}}$, $x_{\text{С}}$, x_{H} по формуле (13). У трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов сопротивление одного из лучей может быть близким к нулю или иметь небольшое отрицательное значение.

1.2.6. Двухобмоточные трансформаторы с расщепленной обмоткой НН

Схема замещения трансформатора с расщепленной обмоткой представлена на рис. 5.

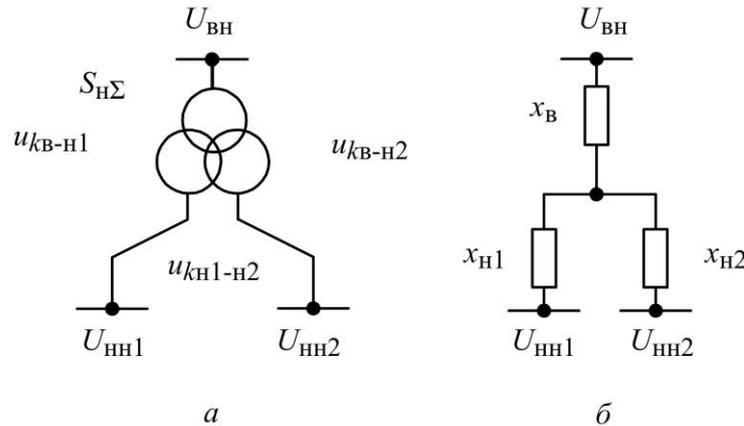


Рис. 5. Двухобмоточный трансформатор с расщепленной обмоткой НН:
а – условное обозначение; *б* – схема замещения

Паспортные данные:

$S_{НΣ}$ – полная номинальная мощность трансформатора (его первичной обмотки), МВ·А;

$U_{ВН}$, $U_{НН1}$, $U_{НН2}$ – номинальные напряжения обмоток, кВ;

$u_{кв-н1}$, $u_{кв-н2}$, $u_{кн1-н2}$ – напряжения короткого замыкания между обмотками, отнесенными к мощности обмотки низшего напряжения, %, т. е. $S_{Н} = 0,5S_{НΣ}$.

Сопротивления обмоток такого трансформатора рассчитываются как для трехобмоточного трансформатора по выражениям (13) и (14).

Если в паспорте задается только $u_{кв-н}$, то сопротивления обмоток схемы замещения можно для практических расчетов принять следующими:

– для трехфазных трансформаторов: $x_{В} = 0,125 \cdot x_{В-Н}$, $x_{НН1} = x_{НН2} = 1,75 \cdot x_{В-Н}$;

– для групп однофазных трансформаторов: $x_{В} = 0$, $x_{НН1} = x_{НН2} = 2,0 \cdot x_{В-Н}$.

При наличии в паспорте четырех значений u_k предпочтителен расчет по формулам для трехобмоточного трансформатора.

1.2.7. Особенности расчетов сопротивлений трансформаторов с учетом регулирования напряжения на стороне ВН

Практически все современные понижающие трансформаторы распределительных сетей напряжением 35 кВ и выше имеют РПН, цель которых

поддерживать на шинах НН трансформатора номинальное напряжение при эксплуатационных изменениях напряжения на стороне ВН.

Для таких трансформаторов дополнительно необходимо иметь значения диапазона регулирования напряжения и напряжений короткого замыкания u_k , соответствующие крайним положениям РПН.

При уменьшении коэффициента трансформации ($-\Delta U_{\text{РПН}}$) сопротивление $x_{\text{тр}}$ уменьшается по сравнению со средним его значением; при увеличении коэффициента трансформации ($+\Delta U_{\text{РПН}}$) – увеличивается.

Значения u_k при среднем положении регулятора РПН ($u_{k\text{ср}}$), а также крайних положений РПН $u_{k\text{max}}$ и $u_{k\text{min}}$ указываются в паспорте трансформатора или могут быть получены из табличных данных. Эти значения отнесены к номинальной мощности трансформатора и напряжениям среднего и крайних ответвлений регулируемой обмотки соответственно. Крайнему «минусовому» ответвлению ($-\Delta U_{\text{РПН}}$) соответствует $u_{k\text{min}}$, крайнему «плюсовому» ответвлению ($+\Delta U_{\text{РПН}}$) – $u_{k\text{max}}$.

Для перечисленных выше трансформаторов значения $x_{\text{тр}}$ определяются для всех трех положений РПН следующими выражениями [4, 5]:

$$x_{\text{тр.ср}} = \frac{u_{k\text{ср}}}{100} \cdot \frac{U_{\text{ср.ном ВН}}^2}{S_{\text{T}}}; \quad (15)$$

$$x_{\text{тр.min}} = \frac{u_{k\text{min}}}{100} \cdot \frac{U_{\text{min ВН}}^2}{S_{\text{T}}}; \quad (16)$$

$$x_{\text{тр.max}} = \frac{u_{k\text{max}}}{100} \cdot \frac{U_{\text{max ВН}}^2}{S_{\text{T}}}, \quad (17)$$

где $U_{\text{ср.ном ВН}}$, $U_{\text{max ВН}}$, $U_{\text{min ВН}}$ – напряжения, соответствующие среднему, максимальному и минимальному положениям РПН.

$U_{\text{max ВН}}$ и $U_{\text{min ВН}}$ определяют по выражениям:

$$U_{\text{max ВН}} = U_{\text{ср.номВН}} \cdot (1 + \Delta U'_{\text{РПН}}); \quad (18)$$

$$U_{\text{min ВН}} = U_{\text{ср.номВН}} \cdot (1 - \Delta U'_{\text{РПН}}), \quad (19)$$

где $\Delta U'_{\text{РПН}} = \frac{\Delta U_{\text{РПН}}}{100}$ – половина полного (суммарного) диапазона регулирования напряжения на стороне ВН трансформатора.

Если значение $U_{\max \text{ вн}}$, подсчитанное по (18), получается больше максимально допустимого для данной сети (табл. 1), то $U_{\max \text{ вн}}$ следует принимать по этой таблице.

1.2.8. Токоограничивающие реакторы – одиночные и сдвоенные

Схемы замещения реакторов приведены на рис. 6.

Паспортные данные:

I_{H} – номинальный ток реактора, А;

U_{H} – номинальное напряжение реактора, кВ;

x_{p^*} – реактивное сопротивление реактора, % или о. е.;

x_{p} – реактивное сопротивление реактора, Ом, определяется по выражению:

$$x_{\text{p}} = \frac{x_{\text{p}^*}}{100} \cdot \frac{U_{\text{ср.ном}}^2}{U_{\text{H}} \cdot I_{\text{H}}}. \quad (20)$$

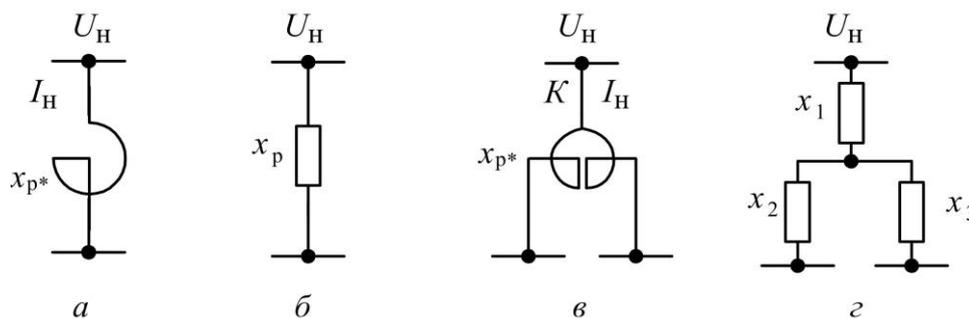


Рис. 6. Реакторы и их схемы замещения:
а, б – одиночный; в, г – сдвоенный

Для расщепленного (сдвоенного реактора) дополнительно задается коэффициент связи K , учитывающий магнитную связь между обмотками. Если значение коэффициента K не задано в паспорте, то для практических расчетов можно принять $K = 0,5$.

Сопротивления лучей сдвоенного реактора определяют по следующим формулам [4, 5]:

$$x_1 = -K \cdot x_{\text{p}}; \quad (21)$$

$$x_2 = x_3 = (1 + K) \cdot x_{\text{p}}. \quad (22)$$

1.2.9. Воздушные и кабельные линии электропередачи

Для расчета необходимо знать удельные параметры, т. е. $r_{уд}$ – удельное активное сопротивление 1 км линии, Ом/км; $x_{уд}$ – удельное реактивное сопротивление 1 км линии, Ом/км; l – длина линии, км.

В схему замещения линия входит полным сопротивлением $z_{л}$, Ом:

$$z_{л} = \sqrt{r_{л}^2 + x_{л}^2}, \text{ где } r_{л} = r_{уд} \cdot l; x_{л} = x_{уд} \cdot l. \quad (23)$$

Удельные сопротивления линий указаны в электротехнических справочниках в зависимости от типа опоры, марки провода и его сечения.

Для линий 110 кВ и выше активное сопротивление проводов не учитывают. При напряжении 330 кВ и выше обычно учитывают емкостную проводимость линий. Для линий 35 кВ и ниже учитывают и активное сопротивление проводов.

1.2.10. Обобщенная нагрузка

Если необходимо учесть подпитку места короткого замыкания в сети 6 (10) кВ от узла нагрузки, в которой преобладают асинхронные двигатели напряжением до 1000 В, вводится понятие «обобщенная нагрузка».

Обобщенную нагрузку принято представлять в практических расчетах индуктивным сопротивлением $x_{нагр}^* = 0,35$ (табл. 2). Это сопротивление включает в себя сопротивление короткого замыкания двигателей x_{d*}'' и сопротивление питающей их распределительной сети (трансформаторов 6 (10)/0,4 кВ и кабелей 0,4 кВ).

Сопротивление отнесено к суммарной мощности нагрузки $S_{H\Sigma}$ и номинальному напряжению U_H .

1.2.11. Эквивалентные источники питания

Если в расчетной схеме имеется связь с энергосистемой, ее частью или объединением, она задается эквивалентным источником питания, который можно рассматривать как некоторый эквивалентный генератор.

Эквивалентный генератор может задаваться либо мощностью короткого замыкания S_K , либо суммарным током короткого замыкания $I_{K\Sigma}$ и напряжением U_H , либо эквивалентным сопротивлением $x_{сЭ}$.

Мощность короткого замыкания S_K определяют по выражению:

$$S_K = \sqrt{3} \cdot I_{K\Sigma} \cdot U_{\text{ср.ном}}, \quad (24)$$

где S_K – мощность короткого замыкания на рассматриваемых шинах при питании от энергосистемы, МВ·А или кВ·А; $U_{\text{ср.ном}}$ – среднее номинальное напряжение, кВ; $I_{K\Sigma}$ – суммарный ток короткого замыкания от энергосистемы, кА или А.

Если эквивалентная система задана S_K , то

$$x_{\text{сэ}} = \frac{U_{\text{ср.ном}}^2}{S_K}. \quad (25)$$

Если эквивалентная система задана $I_{K\Sigma}$, то

$$x_{\text{сэ}} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} \cdot I_{K\Sigma}}. \quad (26)$$

Если эквивалентная система задана сопротивлением, равным нулю, такая система называется системой бесконечной мощности, что свидетельствует о том, что эквивалентная система по своим параметрам несоизмеримо мощнее остальной расчетной схемы и, следовательно, короткие замыкания в этой схеме практически не влияют на работу эквивалентной системы, сохраняя неизменным напряжение, равное $U_{\text{ср.ном}}$, на шинах, к которым она подключена.

Контрольные вопросы

1. Какие основные допущения принимают при расчётах токов КЗ в сетях напряжением выше 1 кВ?
2. Как определить ток КЗ от системы бесконечной мощности?
3. Каковы пределы изменения ударного коэффициента в индуктивно-активной цепи?
4. Объясните понятие «эквивалентная постоянная времени».
5. Как учитываются прилегающие энергосистемы при расчетах токов КЗ?
6. От чего зависит сопротивление нулевой последовательности линии электропередачи?
7. От чего зависит сопротивление нулевой последовательности трансформатора?

ГЛАВА 2. РАСЧЁТ НЕСИММЕТРИЧНЫХ И СИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

2.1. Выбор вида короткого замыкания

Вид короткого замыкания определяется назначением расчета. Для выбора уставок РЗА выполняются расчеты следующих видов КЗ [7]:

– для дистанционных защит и максимальных токовых защит – трехфазные $K^{(3)}$ и двухфазные $K^{(2)}$ КЗ;

– для блокировок при качаниях – двухфазные $K^{(2)}$, двухфазные на землю $K^{(1,1)}$ и однофазные $K^{(1)}$ КЗ;

– для блокировок при качаниях – двухфазные $K^{(2)}$, двухфазные на землю $K^{(1,1)}$ и однофазные $K^{(1)}$ КЗ;

– для ступенчатых защит от КЗ на землю в сетях с глухозаземленными нейтральями – трехфазные $K^{(3)}$, двухфазные на землю $K^{(1,1)}$ и однофазные $K^{(1)}$ КЗ;

– для токовых защит в сетях 0,4–0,23 кВ – трехфазные $K^{(3)}$ и однофазные $K^{(1)}$ КЗ.

2.2. Выбор расчётных режимов работы схемы

При выборе расчетных режимов, кроме общих максимального и минимального, для каждой защиты и каждого вида КЗ рассматривается ряд своих максимальных и минимальных режимов: по максимальным выбирают уставки срабатывания защит, по минимальным оценивают чувствительность защиты. При выборе таких частных режимов допускают возможность одновременного отключения только двух-трех элементов энергосистемы (ремонтное и аварийное отключение). Не рассматриваются случаи одновременного возникновения двух КЗ как нереальные. Так, для получения максимального тока КЗ по линии стремятся отключить параллельные ветви, питающие место КЗ от общего источника, а для получения минимального режима производят отключения, ухудшающие связь точки КЗ и источника по данной линии. В ряде случаев защита может иметь недостаточную чувствительность в отдельных минимальных режимах, тогда проверяют чувствительность защиты в каскаде в этих режимах и обязательно определяют коэффициенты чувствительности для общих максимального и минимального режимов, как наиболее вероятных. При каскадном (поочередном) отключении линии через защиту, действующую в последнюю очередь, протекает полный ток повреждения (а не доля), в результате чего чувствительность защиты резко увеличивается [7].

2.3. Преобразование схемы замещения относительно заданной точки короткого замыкания

После составления схемы замещения необходимо произвести приведение всех ее сопротивлений к одной ступени трансформации, т. е. к единому $U_{\text{ср.ном}}$. Сопротивление, приведенное к расчетной ступени напряжения, пропорционально квадрату коэффициента трансформации между приведенной и приводимой ступенью напряжения [8]. Докажем это утверждение для схемы, изображенной на рис. 7.

Коэффициент трансформации определяют по следующей формуле:

$$k_{\text{ТР}} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2}. \quad (27)$$

Из (27) можно получить равенство:

$$U_1 I_1 = U_2 I_2. \quad (28)$$

Ток, протекающий по обмоткам трансформатора, равен отношению напряжения к сопротивлению:

$$I_1 = \frac{U_1}{Z_1}; \quad (29)$$

$$I_2 = \frac{U_2}{Z_2}. \quad (30)$$

Подставив (29) и (30) в (28), получим:

$$\frac{U_1^2}{Z_1} = \frac{U_2^2}{Z_2}. \quad (31)$$

Из (31) следует:

$$Z_2 = Z_1 \cdot \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 = Z_1 \cdot k_{\text{ТР}}^2. \quad (32)$$

Затем схема замещения преобразовывается относительно точки КЗ к одной ветви, сопротивление которой равно x_{Σ} – суммарному сопротивлению, а ЭДС равна $E_{\text{ЭКВ}}$. Если расчет ведется с учетом активных сопротивлений, то определяется $z_{\Sigma} = \sqrt{r_{\Sigma}^2 + x_{\Sigma}^2}$.

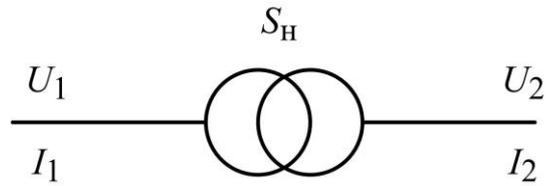


Рис. 7. Однолинейная схема замещения трансформатора

Преобразование ветвей схемы замещения производится путем последовательного и параллельного сложения, преобразования треугольников в эквивалентные звезды и т. д.

Последовательное сложение ветвей:

$$x_{\Sigma} = x_1 + x_2 + x_3. \quad (33)$$

Параллельное сложение ветвей:

$$x_{\text{экв}} = \frac{1}{\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} + \frac{1}{x_3}}. \quad (34)$$

Преобразование треугольника в эквивалентную звезду и наоборот (рис. 8):

– сопротивления сторон треугольника – x_{12}, x_{23}, x_{13} ;

– сопротивления лучей звезды – x_1, x_2, x_3 .

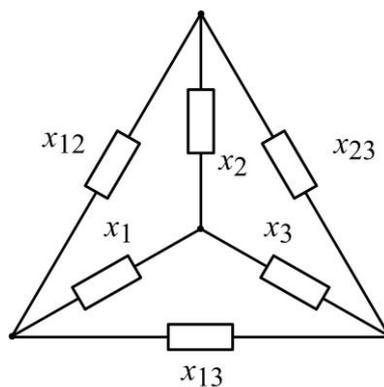


Рис. 8. Схема преобразования треугольника в эквивалентную звезду и наоборот

Преобразование треугольника в эквивалентную звезду и наоборот осуществляется по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned}
 x_1 &= \frac{x_{12} \cdot x_{13}}{x_{12} + x_{23} + x_{13}}, \\
 x_2 &= \frac{x_{12} \cdot x_{23}}{x_{12} + x_{23} + x_{13}}, \\
 x_3 &= \frac{x_{13} \cdot x_{23}}{x_{12} + x_{23} + x_{13}}, \\
 x_{12} &= x_1 + x_2 + \frac{x_1 \cdot x_2}{x_3}, \\
 x_{23} &= x_2 + x_3 + \frac{x_2 \cdot x_3}{x_1}, \\
 x_{13} &= x_1 + x_3 + \frac{x_1 \cdot x_3}{x_2}.
 \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

Если в расчетной схеме имеется несколько источников питания, ЭДС которых равны между собой, то $E_{\text{ЭКВ}}$ – результирующая ЭДС – равна ЭДС источников питания, т. е. $E_{\text{ЭКВ}} = E_1 = E_2 = E_3$ и т. д.

Если ЭДС не равны между собой, то эквивалентная ЭДС определяется по формуле:

$$E_{\text{ЭКВ}} = \frac{E_1 \cdot Y_1 + E_2 \cdot Y_2 + \dots + E_n \cdot Y_n}{Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n}, \quad (36)$$

где Y_1, Y_2, \dots, Y_n – проводимости ветвей, каждая из которых равна величине, обратной сопротивлению ветви, т. е. $Y_n = \frac{1}{x_n}$.

2.4. Распределение токов КЗ по ветвям

Распределение токов по ветвям и вычисление остаточных напряжений в узлах схемы замещения при равных ЭДС производится с помощью коэффициентов токораспределения путем обратного преобразования схемы замещения к ее первоначальному виду.

На рис. 9 представлена расчетная схема с двумя ЭДС. При равных E_1 и E_2 , если принять суммарный ток КЗ за единицу, можно найти доли тока КЗ, которые протекают в параллельных ветвях с помощью так называемых коэффициентов токораспределения C_1 и C_2 .

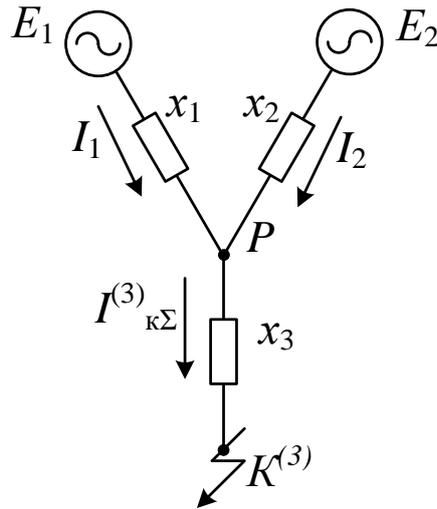


Рис. 9. Схема замещения сети с двумя источниками питания

Для рассматриваемого примера $C_1 = \frac{x_{1-2}}{x_1}$, $C_2 = \frac{x_{1-2}}{x_2}$, где $x_{1-2} = \frac{x_1 \cdot x_2}{x_1 + x_2}$.

Понятно, что $C_1 + C_2 = 1$. Иначе говоря, коэффициенты токораспределения указывают долю участия каждого генератора схемы замещения в подпитке точки КЗ.

Для схемы на рис. 9 токи в ветвях I_1 и I_2 определяются с помощью коэффициентов токораспределения:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= C_1 \cdot I_{\text{к}\Sigma}^{(3)}, \\ I_2 &= C_2 \cdot I_{\text{к}\Sigma}^{(3)}. \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

Определение остаточных напряжений в узлах схемы замещения производится по падениям напряжения в рассматриваемых ветвях от протекающих в них токов КЗ.

Для схемы на рис. 9 напряжение в узле P определяется как падение напряжения от тока $I_{\text{к}\Sigma}^{(3)}$ на сопротивлении x_3 , так как напряжение в месте трехфазного КЗ равно нулю:

$$U_P = I_{\text{к}\Sigma}^{(3)} \cdot x_3 \text{ или } U_P = E_1 - I_1 \cdot x_1 \text{ и т. д.}$$

Если ЭДС схемы замещения не равны между собой, то суммарный ток КЗ также определяется аналогичными способами преобразования. Распределение токов в ветвях схемы можно выполнять, зная напряжения в отдельных узлах.

Например, для схемы на рис. 9 значения токов в ветвях определяются, используя напряжение в узле P :

$$I_1 = \frac{E_1 - U_P}{x_1}; I_2 = \frac{E_2 - U_P}{x_2}. \quad (38)$$

Следует отметить, что расчеты токов КЗ в сложных электрических сетях должны выполняться при помощи специализированных компьютерных программ.

Контрольные вопросы

1. Объясните понятие «источник бесконечной мощности».
2. Перечислите отличия в приближенном и точном приведении.
3. Как определить остаточное напряжение в произвольной точке системы при симметричном КЗ?
4. Как определить остаточное напряжение в произвольной точке системы при несимметричном КЗ?
5. Объясните понятие «коэффициент токораспределения».

ГЛАВА 3. НЕСИММЕТРИЧНЫЕ КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ

3.1. Метод симметричных составляющих

Несимметричные КЗ – двухфазные, однофазные и двухфазные на землю, в отличие от трехфазных КЗ, характеризуются нарушением симметрии токов и напряжений, т. е. фазные токи, напряжения и углы между ними становятся неодинаковыми, нарушается симметрия трехфазной электрической сети. При трехфазных КЗ симметрия токов и напряжений не нарушается, поэтому расчеты трехфазных КЗ выполняются для одной фазы. Несимметричные КЗ таким методом рассчитывать нельзя. Для расчета несимметричных КЗ используется, как правило, метод симметричных составляющих [3, 8].

Суть метода симметричных составляющих: любую несимметричную систему трех векторов можно однозначно разложить на три симметричные системы векторов – прямую, обратную и нулевую.

Это можно выразить следующими уравнениями.

$$\left. \begin{aligned} F_A &= F_{A1} + F_{A2} + F_{A0} \\ F_B &= F_{B1} + F_{B2} + F_{B0} \\ F_C &= F_{C1} + F_{C2} + F_{C0} \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

Векторы системы *прямой последовательности* равны между собой, сдвинуты друг относительно друга на угол 120° , имеют прямое чередование фаз (A, B, C). Геометрическая сумма векторов равна нулю (рис. 10, а).

Векторы системы *обратной последовательности* также имеют одинаковые значения, угол сдвига по фазе, равный 120° , но имеют обратное чередование фаз (A, C, B). Геометрическая сумма векторов равна нулю (рис. 10, б).

Векторы системы *нулевой последовательности* также равны между собой, но совпадают по фазе и в сумме представляют утроенный вектор, т. е. $F_{A0} + F_{B0} + F_{C0} = 3F_0$ (рис. 10, в).

Используя уравнения (39), можно геометрически сложить одноименные векторы всех трех систем и получить исходную несимметричную систему векторов: F_A, F_B, F_C .

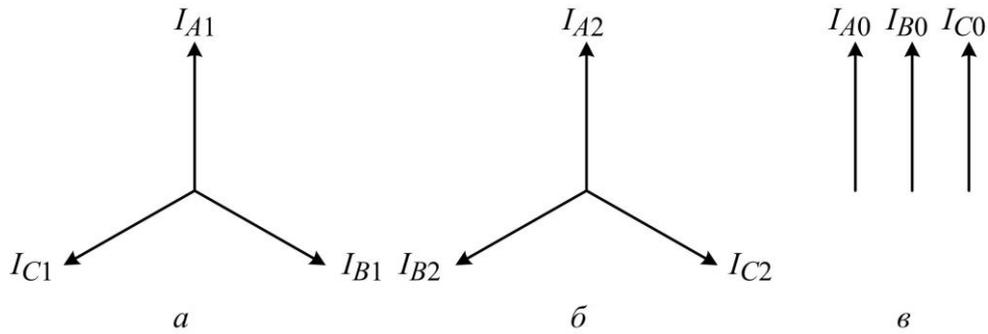


Рис. 10. Векторные диаграммы:
a – прямой; *б* – обратной; *в* – нулевой последовательностей

Переходя к векторному изображению любых величин, в том числе токов и напряжений, используется метод комплексных чисел, в котором любое комплексное число можно записать как некоторый модуль F , умноженный на фазный множитель $e^{j\varphi}$, который определяет угол поворота вектора относительно оси действительных величин.

Значит, если принять фазу A за основную, можно вектора двух других фаз выразить через вектор фазы A и соответствующий фазный множитель. Этот фазный множитель принято называть оператором a , т. е. можно записать, что $a = e^{j120^\circ}$.

Умножить вектор на оператор a – значит повернуть данный вектор на 120° против часовой стрелки (положительное вращение векторов), умножить на a^2 – повернуть на 240° против часовой стрелки или на 120° по часовой.

Используя вектор фазы A и оператор a , можно систему уравнений (39) записать в следующем виде.

$$\left. \begin{aligned} F_A &= F_{A1} + F_{A2} + F_{A0} \\ F_B &= a^2 \cdot F_{A1} + a \cdot F_{A2} + F_{A0} \\ F_C &= a \cdot F_{A1} + a^2 \cdot F_{A2} + F_{A0} \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

Совместно решая систему уравнений (39) и (40), получаем значения векторов отдельных последовательностей для основной фазы A :

$$\left. \begin{aligned} F_{A1} &= \frac{1}{3} (F_A + a \cdot F_B + a^2 \cdot F_C) \\ F_{A2} &= \frac{1}{3} (F_A + a^2 \cdot F_B + a \cdot F_C) \\ F_{A0} &= \frac{1}{3} (F_A + F_B + F_C) \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

Система уравнений (41) выражает симметричные составляющие основной или особой фазы A через фазные величины. Данная система уравнений справедлива как для токов, так и для напряжений в сети трехфазного переменного тока.

Система (41) используется для вывода формул всех несимметричных КЗ. Она применяется для выражения токов или напряжений в месте КЗ, причем уравнения упрощаются с помощью очевидных соотношений фазных электрических величин, характерных для каждого вида КЗ.

Например, при двухфазном КЗ на землю фаз B и C напряжения этих фаз в месте КЗ равны нулю, что приведет к исчезновению второго и третьего слагаемого в каждом уравнении системы (41), написанной для напряжений в месте КЗ.

При двухфазном металлическом КЗ без земли напряжения короткозамкнутых фаз равны между собой в месте КЗ, это также приведет к упрощению системы (41).

Любое несимметричное КЗ можно, так же как и трехфазное, рассчитывать для одной фазы, но составляя три схемы замещения – прямой, обратной и нулевой последовательностей, преобразовывая их относительно места КЗ известными методами. При этом, независимо от вида КЗ, в генераторах существует только ЭДС прямой последовательности, ЭДС обратной и нулевой последовательности равны нулю.

Для анализа изложенного материала рассмотрим несимметричное КЗ. Напряжения в месте КЗ не равны нулю, как при трехфазном КЗ, они неодинаковы по значениям и несимметричны по фазе. Используя метод симметричных составляющих, напряжения в месте КЗ можно представить как геометрическую сумму напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей и записать следующими уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} U_{к1} &= E_{\Sigma} - I_{к1} \cdot jx_{1\Sigma} \\ U_{к2} &= 0 - I_{к2} \cdot jx_{2\Sigma} \\ U_{к0} &= 0 - I_{к0} \cdot jx_{0\Sigma} \end{aligned} \right\}, \quad (42)$$

где E_{Σ} – результирующая ЭДС прямой последовательности относительно точки КЗ; $I_{к1}$, $I_{к2}$, $I_{к0}$ – симметричные составляющие токов прямой, обратной и нулевой последовательности в месте КЗ; $x_{1\Sigma}$, $x_{2\Sigma}$, $x_{0\Sigma}$ – результирующие реактивности отдельных последовательностей относительно точки КЗ.

Схема замещения прямой последовательности составляется аналогично схеме замещения для трехфазного КЗ. Фазные токи при трехфазном КЗ можно рассматривать как токи прямой последовательности, поскольку они одинаковы по значению, симметричны по фазам, имеют прямое чередование фаз.

Значения сопротивлений элементов схемы прямой последовательности те же, что и при трехфазных КЗ. Нужно помнить, что началом схемы прямой последовательности является точка, в которой приложена ЭДС эквивалентного генератора, концом – точка КЗ, в которой при несимметричном КЗ напряжение не равно нулю, а имеет значение $U_{к1}$.

Схема замещения обратной последовательности составляется из тех же элементов, что и схема замещения прямой последовательности, так как токи обратной последовательности протекают по тем же элементам электрической сети, что и токи прямой последовательности, но ЭДС обратной последовательности равна нулю.

Для генераторов и синхронных двигателей реактивное сопротивление x_2 точно определить достаточно сложно, так как оно зависит не только от конструкции машины, но и от внешних параметров электрической сети, суммарного сопротивления внешней сети, вида несимметрии и т. п.

Приближенно считают x_2 синхронных машин следующимим [8]:

– $x_2 \approx 1,45 \cdot x'_d$ – для машин без демпферных обмоток;

– $x_2 \approx 1,22 \cdot x''_d$ – для турбогенераторов и машин с демпферными обмотками в обеих осях ротора, где x'_d – переходное реактивное сопротивление электрической машины, x''_d – сверхпереходное реактивное сопротивление электрической машины.

Для практических расчетов токов КЗ в электрических сетях обычно принимают значение сопротивления обратной последовательности x_2 равным сопротивлению x''_d , т. е. сопротивлению прямой последовательности.

Значения сопротивлений остальных элементов схемы замещения для практических расчетов такие же, как и для схемы прямой последовательности. ЭДС обратной последовательности равна нулю, и можно считать, что началом схемы обратной последовательности является объединенная точка за сопротивлениями обратной последовательности всех генерирующих ветвей, концом схемы – точка КЗ, в которой приложено напряжение $U_{к2}$.

Схема замещения нулевой последовательности принципиально отличается от схем прямой и обратной последовательностей, так как геометрическая сумма векторов токов и напряжений нулевой последовательности не равна нулю, а представляет утроенный вектор тока или напряжения.

Поэтому для протекания токов нулевой последовательности необходим контур, который создается через землю, место КЗ и заземленные нейтрали трансформаторов. Следовательно, нулевая последовательность имеет место при КЗ на землю – однофазных и двухфазных КЗ – только в сетях, работающих с глухозаземленными нейтральными трансформаторов и автотрансформаторов. Токи нулевой последовательности можно рассматривать как три однофазных тока, протекающих по фазам и возвращающихся как ток $3I_0$ через землю, заземленные тросы ЛЭП, если таковые имеются, заземленные нейтрали трансформаторов.

Для протекания токов через землю необходимо, чтобы в схеме электрической сети, следовательно и в схеме нулевой последовательности, присутствовала хотя бы одна заземленная нейтраль трансформатора.

В схему замещения нулевой последовательности входят элементы электрической сети своими сопротивлениями нулевой последовательности. Причем началом схемы нулевой последовательности считается точка, в которой объединяются заземленные нейтрали трансформаторов, имеющие потенциал земли, а концом – точка КЗ, в которой приложено напряжение $U_{к0}$.

3.2. Расчет параметров нулевой последовательности элементов сети

Для протекания токов нулевой последовательности необходимо создание замкнутого контура. Этот контур включает в себя те элементы, по которым протекают токи нулевой последовательности, т. е. трансформаторы с заземленными нейтральными, ЛЭП, реакторы и т. п.

Рассмотрим сопротивления нулевой последовательности для характерных элементов энергосистем.

Реакторы. Сопротивление реакторов определяют собственной индуктивностью катушки каждой фазы, поэтому можно считать, что $x_0 \approx x_1$.

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

В схему для протекания токов нулевой последовательности должны входить только трансформаторы, работающие с глухозаземленными нейтральными или нейтральными, заземленными через токоограничивающие реакторы.

Сопротивление для токов нулевой последовательности трансформатора, не имеющего заземленной нейтрали, равно бесконечности, $x_{0T} \approx \infty$. Токи нулевой последовательности не будут протекать по обмоткам такого трансформатора, ибо не создается контура для их протекания через землю.

КЗ на землю возможны в сетях, работающих с глухозаземленными или эффективно заземленными нейтральными. К таким сетям относятся сети напряжением 110 кВ и выше, а также сети 0,4 кВ. Поэтому рассматриваться будут трансформаторы со стороны обмоток, соединенных в звезду, к которым прикладывается напряжение нулевой последовательности U_0 .

В табл. 3 даны схемы замещения нулевой последовательности трансформаторов нескольких наиболее часто встречающихся типов.

При соединении обмоток Y_0/Δ (табл. 3, п. 1) токи нулевой последовательности протекают в обмотке звезды и наводятся в обмотке треугольника, но не выходят за его пределы. Поэтому в схему замещения нулевой последовательности входят сопротивления обеих обмоток, причем точка нулевого потенциала выносится за сопротивление обмотки треугольника. Это указывает на то, что в обмотке треугольника заканчивается путь циркуляции токов нулевой последовательности.

Сопротивление ветви намагничивания $x_{\mu 0}$ в схему замещения не входит, так как это сопротивление значительно больше сопротивления обмотки треугольника. Таким образом, сопротивление нулевой последовательности трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда с нулем – треугольник» Y_0/Δ равно его сопротивлению прямой последовательности:

$$x_{0T} = x_I + x_{II} = x_1, \quad (43)$$

где x_1 – сопротивление прямой последовательности трансформатора, а x_I и x_{II} – сопротивления первичной и вторичной обмоток трансформатора.

При отсутствии необходимых данных можно с некоторым приближением принять для трехфазных трансформаторов $x_{0T} = (0,85 - 0,9) \cdot x_1$.

При соединении обмоток трансформатора Y_0/Y (табл. 3, п. 2) во вторичной обмотке нет пути для тока нулевой последовательности. Следовательно, сопротивление нулевой последовательности такого трансформатора $x_{0T} = x_{\mu 0}$. Сопротивление ветви намагничивания $x_{\mu 0}$ для трансформаторов любого типа зависит от конструкции данного трансформатора, от пути, по которому замыкается поток нулевой последовательности. Для большинства типов трансформаторов можно считать $x_{\mu 0} \approx \infty$. Следовательно, сопротивление нулевой последовательности трансформаторов со схемой соединения обмоток Y_0/Y $x_0 \approx \infty$. В схему замещения нулевой последовательности такой трансформатор не входит [8].

Трехобмоточный трансформатор $Y_0/Y/\Delta$ (табл. 3, п. 3) в схему замещения входит сопротивлениями обмоток I и III , так как в обмотке II путь для протекания токов нулевой последовательности отсутствует. Для таких трансформаторов $x_{0T} = (0,85 - 0,9) \cdot (x_I + x_{III})$, т. е. учитывается только переход Y_0/Δ .

Если трехобмоточный трансформатор имеет схему соединения обмоток $Y_0/\Delta/Y$, то его сопротивление нулевой последовательности $x_{0T} = (0,85 \div 0,9) \cdot (x_I + x_{II})$, т. е. учитывается переход Y_0/Δ .

Автотрансформатор $Y_0/Y/\Delta$ (табл. 3, п. 4) в схему замещения нулевой последовательности вводится сопротивлениями всех трех обмоток. При этом предполагается, что путь для протекания токов нулевой последовательности в обмотке II создается наличием хотя бы еще одной заземленной нейтрали в цепи обмотки II : $x_{0I} = x_{1I}$, $x_{0II} = x_{1II}$, $x_{0III} = x_{1III}$.

Трансформатор $Y_0/\Delta-\Delta$ (табл. 3, п. 5) в схему замещения входит сопротивлениями всех трех обмоток, причем сопротивления обмоток, соединенных в треугольник, включаются параллельно. Схема замещения аналогична схеме замещения трансформатора Y_0/Δ , $x_{0T} = (0,85 - 0,9) \cdot x_I$.

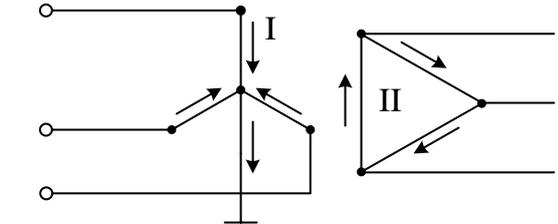
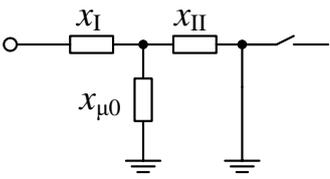
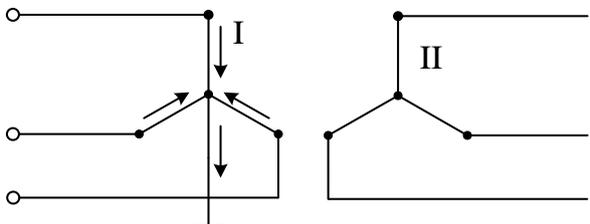
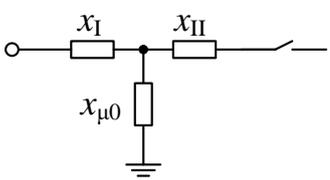
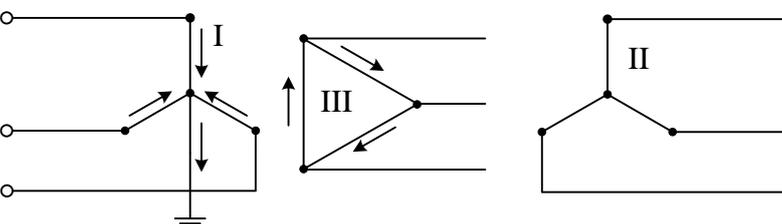
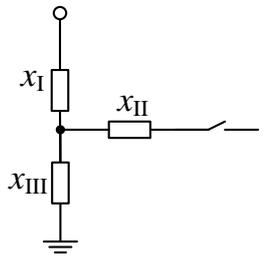
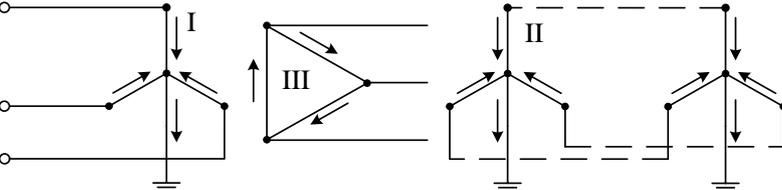
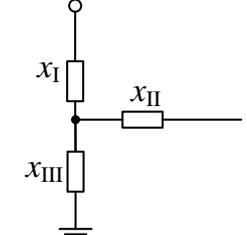
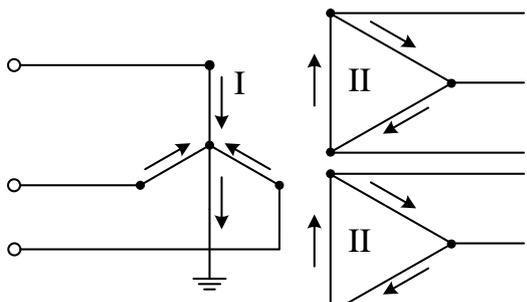
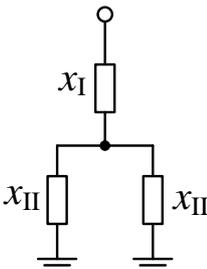
Одиночные воздушные ЛЭП. Токи нулевой последовательности, протекая по фазам ЛЭП, возвращаются через землю и заземленный трос в нейтраль трансформатора, образуя замкнутый контур, сопротивление которого определяет значение сопротивления воздушной ЛЭП токам нулевой последовательности.

Сопротивление каждой фазы складывается из сопротивления самоиндукции x_L и сопротивления взаимоиндукции с двумя соседними фазами x_M . Поскольку направления токов нулевой последовательности по фазам ЛЭП одинаковые, то можно записать, что сопротивление нулевой последовательности одной фазы воздушной ЛЭП $x_0 = x_L + 2 \cdot x_M$.

Применение на линиях заземленных грозозащитных тросов, наоборот, уменьшает значения x_0 , так как токи, протекающие в тросе, направлены противоположно токам нулевой последовательности, протекающим в фазах.

Однако использование на ЛЭП заземленных стальных тросов, обладающих большими активными сопротивлениями, мало сказывается на уменьшении x_0 линии. Поэтому практически их можно рассматривать как линии без тросов. Если для заземленных тросов используются хорошо проводящие материалы (алюминий, сталь-алюминий), это значительно снижает сопротивление нулевой последовательности.

Схема замещения трансформаторов различных типов
для токов нулевой последовательности

№ п/п	Схема протекания токов нулевой последовательности в обмотках трансформаторов	Схема замещения
1	<p>Двухобмоточный трансформатор Y_0/Δ</p> 	
2	<p>Двухобмоточный трансформатор Y_0/Y</p> 	
3	<p>Трехобмоточный трансформатор</p> 	
4	<p>Автотрансформатор</p> 	
5	<p>Трансформатор с расщепленной обмоткой низшего напряжения</p> 	

Для приближенных расчетов можно принимать сопротивления нулевой последовательности одиночных ЛЭП следующими:

- одноцепная линия без тросов – $x_0 \approx 3,5 \cdot x_1$;
- одноцепная линия с хорошо проводящими тросами – $x_0 \approx 2 \cdot x_1$;
- одноцепная линия со стальными тросами – $x_0 \approx 3 \cdot x_1$,

где x_1 – сопротивление прямой последовательности воздушной ЛЭП [8].

Двухцепные воздушные ЛЭП. Схемы замещения воздушной ЛЭП при наличии параллельных цепей, их сопротивления с учетом взаимного влияния рассмотрим на примере двухцепной ЛЭП (рис. 11).

Токи нулевой последовательности в обеих цепях при сквозном КЗ направлены в одну сторону, наличие взаимной индукции между цепями увеличивает сопротивление линии по сравнению с одиночной линией, так как суммарный магнитный поток, охватывающий фазы обеих цепей, возрастает.

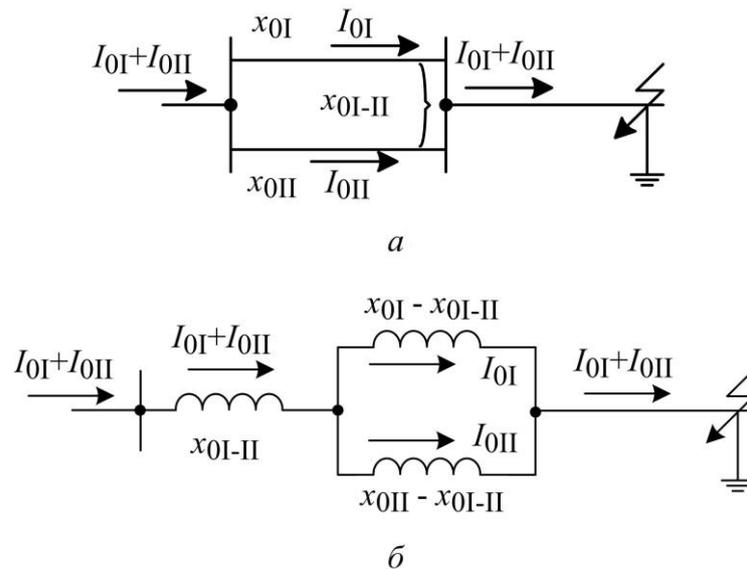


Рис. 11. Двухцепная ЛЭП:
a – распределение токов при сквозном КЗ; *б* – схема замещения

Условные обозначения:

- x_{0I} и x_{0II} – собственные сопротивления нулевой последовательности каждой цепи без учета взаимной индукции;
- I_{0I} и I_{0II} – токи нулевой последовательности каждой цепи;
- x_{0I-II} – сопротивление взаимной индукции между линиями (можно принять $1,7 \cdot x_1$ для одной цепи, $x_{0I} - x_{0I-II} = 1,3 \cdot x_1$ для одной цепи).

Ориентировочно значения сопротивлений нулевой последовательности для двухцепных ЛЭП можно принять следующими:

- для линий без тросов – $x_0 \approx 5,5 \cdot x_1$;
- для линий со стальными тросами – $x_0 \approx 4,7 \cdot x_1$,

где x_1 – сопротивление прямой последовательности одной цепи.

На рис. 12 представлены схемы замещения двух параллельных линий в зависимости от расположения точки КЗ и режима работы параллельной линии.

Кабельные линии. Сопротивление нулевой последовательности кабельных линий зависит от способа заземления его оболочки, которая так же, как заземленный трос воздушной линии, образует дополнительный контур для протекания токов нулевой последовательности, параллельный контуру, образуемому через землю.

Таким образом, при протекании токов нулевой последовательности по жилам кабеля часть этого тока возвращается через землю, часть через его оболочку.

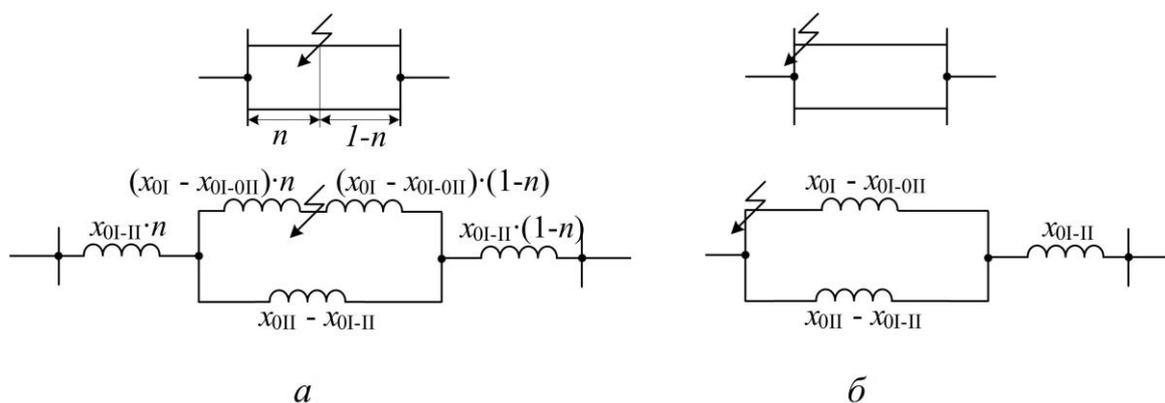


Рис. 12. Схемы замещения для двух параллельных ВЛ:

а – КЗ на одной из ВЛ вдоль линии; б – КЗ в начале или в конце одной из ВЛ

Точное вычисление параметров нулевой последовательности кабеля достаточно сложно. Для практических расчетов можно принимать для трехжильных кабелей $x_0 = (3,5 - 4,6) \cdot x_1$.

3.3. Токи и напряжения в месте несимметричного короткого замыкания, векторные диаграммы токов и напряжений

Рассмотрим три основных вида несимметричных КЗ – двухфазное, однофазное и двухфазное КЗ на землю на некотором ответвлении, сопротивления фаз которого равны нулю. Токи в фазах этого ответвления

являются токами в месте КЗ. Считаем, что схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей преобразованы относительно точки КЗ, т. е. известны суммарные реактивные сопротивления до места КЗ отдельных последовательностей $x_{1\Sigma}$, $x_{2\Sigma}$, $x_{0\Sigma}$, также известна эквивалентная ЭДС E_{Σ} .

При составлении граничных условий будем полагать, что фаза A при всех несимметричных КЗ находится в условиях, отличных от условий двух других фаз, ее принято называть «особой фазой». В дальнейшем при составлении уравнений принимается, что токи направлены к месту КЗ. При построении векторных диаграмм не рассматриваются переходные сопротивления в месте КЗ, полагая, что все рассматриваемые ниже несимметричные КЗ являются металлическими.

Двухфазное КЗ между фазами B и C (рис. 13). Двухфазное КЗ между фазами B и C характеризуется следующими граничными условиями (44) [3]:

$$\left. \begin{aligned} I_{кА}^{(2)} &= 0, \\ I_{кВ}^{(2)} &= -I_{кС}^{(2)}, \\ U_{кВ}^{(2)} - U_{кС}^{(2)} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (44)$$

Из граничных условий видно, что геометрическая сумма фазных токов в месте КЗ равна нулю, т. е. $I_{кА}^{(2)} + I_{кВ}^{(2)} + I_{кС}^{(2)} = 0$; следовательно, система токов является уравновешенной, в ней отсутствуют составляющие токов нулевой последовательности, т. е. $I_{к0}^{(2)} = 0$.

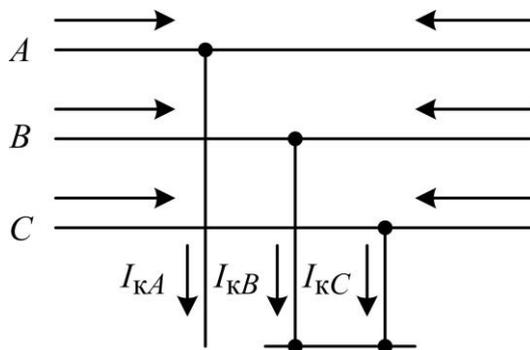


Рис. 13. Двухфазное КЗ между фазами B и C , принципиальная схема

Используя уравнения метода симметричных составляющих и уравнения граничных условий, получаем для данного вида КЗ следующие соотношения:

– для токов:

$$I_{кА} = I_{кА1} + I_{кА2} = 0 \Rightarrow I_{кА1} = -I_{кА2}; \quad (45)$$

– для напряжений:

$$\begin{aligned} U_{кА1} &= \frac{1}{3} (U_{кА} + a \cdot U_{кВ} + a^2 \cdot U_{кС}) = \frac{1}{3} [U_{кА} + (a + a^2) U_{кВ}]; \\ U_{кА2} &= \frac{1}{3} (U_{кА} + a \cdot U_{кВ} + a^2 \cdot U_{кС}) = \frac{1}{3} [U_{кА} + (a + a^2) U_{кВ}]; \\ U_{кА1} &= U_{кА2}. \end{aligned} \quad (46)$$

Из уравнений (42), (45) и (46) получаем:

$$\begin{aligned} E_{А\Sigma} - I_{кА1} \cdot jx_{1\Sigma} &= -I_{кА2} \cdot jx_{2\Sigma}; \\ I_{кА1}^{(2)} &= \frac{E_{А\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma})}, \end{aligned} \quad (47)$$

при $x_{1\Sigma} = x_{2\Sigma}$:

$$I_{кА1}^{(2)} = \frac{E_{А\Sigma}}{2jx_{1\Sigma}}. \quad (48)$$

Определим напряжения $U_{кА1}$ и $U_{кА2}$:

$$\begin{aligned} U_{кА1} &= E_{А\Sigma} - I_{кА1} \cdot jx_{1\Sigma}; \\ U_{кА2} &= -I_{кА2} \cdot jx_{2\Sigma}, \end{aligned}$$

так как $U_{кА1}^{(2)} = U_{кА2}^{(2)}$, $I_{кА1}^{(2)} = -I_{кА2}^{(2)}$, а $x_{1\Sigma} = x_{2\Sigma}$, получим:

$$U_{кА1} = U_{кА2} = I_{кА1} \cdot jx_{2\Sigma}. \quad (49)$$

На рис. 14 представлены векторные диаграммы токов и напряжений в месте двухфазного КЗ. При построении векторных диаграмм будем считать, что электрическая сеть практически состоит из чисто индуктивных сопротивлений и, следовательно, в такой сети ток отстает от напряжения одноименной фазы на угол, равный 90° .

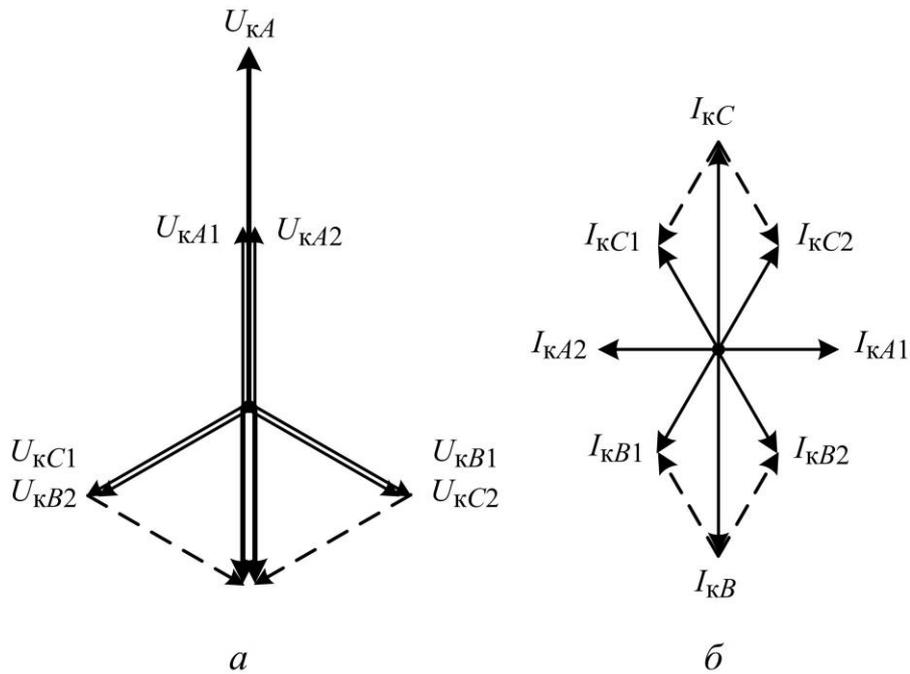


Рис. 14. Векторные диаграммы в месте двухфазного КЗ:
a – напряжений; *б* – токов

Из векторных диаграмм и аналитических выражений (45), (46) находим значения фазных токов и напряжений:

$$U_{кА}^{(2)} = 2 \cdot U_{кА1}; \quad (50)$$

$$U_{кВ}^{(2)} = U_{кС}^{(2)} = -\frac{1}{2} U_{кА}^{(2)}. \quad (51)$$

Напряжение неповрежденной фазы *A* практически не изменилось и осталось равным доаварийному номинальному (фазному) напряжению. Напряжения поврежденных фаз *B* и *C* равны половине напряжения неповрежденной фазы *A* и направлены в противоположную сторону.

Из векторной диаграммы напряжений также видно, что напряжение между поврежденными фазами U_{BC} равно нулю, а междуфазные напряжения U_{AB} и U_{CA} составляют $1,5 \cdot U_{\Phi}$ в отличие от трехфазного КЗ, при котором в месте КЗ все напряжения равны нулю. Отсюда получается, что:

$$I_{кВ}^{(2)} = I_{кС}^{(2)} = \frac{E_{\Sigma} \cdot \sqrt{3}}{2 \cdot x_{1\Sigma}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{к}^{(3)}. \quad (52)$$

Однофазное КЗ на фазе А (рис. 15). Однофазное КЗ характеризуется условиями (53) [3, 4]:

$$\left. \begin{aligned} U_{кА}^{(1)} &= 0, \\ I_{кВ}^{(1)} &= 0, \\ I_{кС}^{(1)} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (53)$$

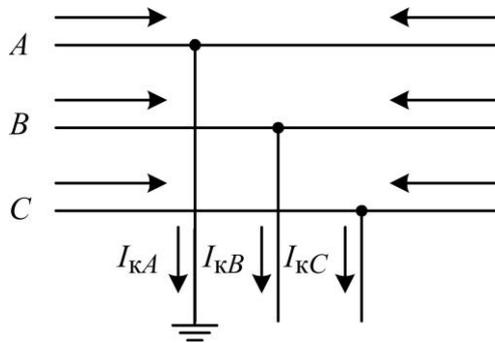


Рис. 15. Однофазное КЗ на фазе А, принципиальная схема

Из граничных условий видно, что геометрическая сумма фазных токов в месте КЗ не равна нулю, т. е. $I_{кА} + I_{кВ} + I_{кС} \neq 0$; следовательно, такая система является неуравновешенной, в ней появляются составляющие токов нулевой последовательности. Используя уравнения метода симметричных составляющих и граничных условий, получим следующие выражения:

– для токов:

$$I_{кА1} = \frac{1}{3} (I_{кА} + a \cdot I_{кВ} + a^2 \cdot I_{кС});$$

$$I_{кА2} = \frac{1}{3} (I_{кА} + a^2 \cdot I_{кВ} + a \cdot I_{кС});$$

$$I_{кА0} = \frac{1}{3} (I_{кА} + I_{кВ} + I_{кС});$$

при $I_{кВ} = I_{кС} = 0$:

$$I_{кА1} = I_{кА2} = I_{кА0} = \frac{1}{3} I_{кА}. \quad (54)$$

– для напряжений:

$$U_{кА} = U_{кА1} + U_{кА2} + U_{кА0} = 0;$$

$$U_{кА1} = -(U_{кА2} + U_{кА0}). \quad (55)$$

Используя уравнения (42) и (55), запишем:

$$U_{кА} = E_{A\Sigma} - I_{кА1} \cdot jx_{1\Sigma} - I_{кА2} \cdot jx_{2\Sigma} - I_{кА0} \cdot jx_{0\Sigma} = 0,$$

тогда

$$I_{кА1} = I_{кА2} = I_{кА0} = \frac{E_{A\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})}. \quad (56)$$

Ток поврежденной фазы $I_{кА}^{(1)}$ в соответствии с выражением (54) равен утроенному значению тока одной из последовательностей:

$$I_{кА}^{(1)} = 3I_{кА1}^{(1)} = 3I_{кА2}^{(1)} = 3I_{кА0}^{(1)}. \quad (57)$$

Абсолютное значение тока поврежденной фазы определяется из выражений (54) и (56):

$$I_{кА}^{(1)} = \frac{3E_{A\Sigma}}{x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}. \quad (58)$$

Векторные диаграммы токов и напряжений в месте однофазного КЗ показаны на рис. 16.

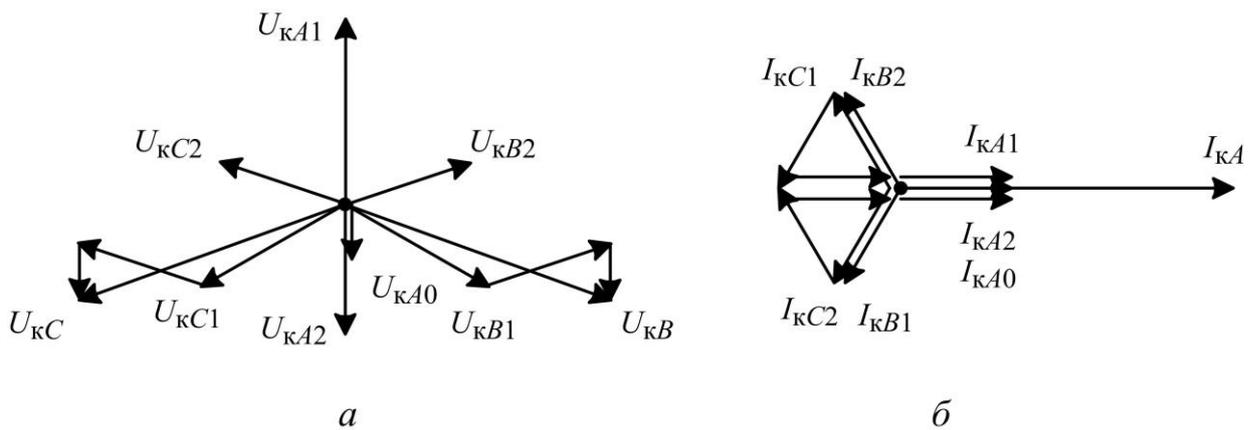


Рис. 16. Векторные диаграммы при однофазном КЗ:
а – напряжений; б – токов

Для симметричных составляющих напряжений в месте КЗ на основании выражений (42), (54), (55) можно записать:

$$\left. \begin{aligned} U_{\kappa A1} &= E_{A\Sigma} - I_{\kappa A1} \cdot jx_{1\Sigma} = -I_{\kappa A1} \cdot j(x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}), \\ U_{\kappa A2} &= -I_{\kappa A2} \cdot jx_{2\Sigma} = -I_{\kappa A1} \cdot jx_{2\Sigma}, \\ U_{\kappa A0} &= -I_{\kappa A0} \cdot jx_{0\Sigma} = -I_{\kappa A1} \cdot jx_{0\Sigma}. \end{aligned} \right\} \quad (59)$$

Следовательно, при равенстве токов всех последовательностей значения напряжений обратной и нулевой последовательностей зависят от значений сопротивлений $x_{2\Sigma}$ и $x_{0\Sigma}$.

Двухфазное КЗ на землю в фазах В и С (рис. 17). Двухфазное КЗ на землю на фазах В и С характеризуется следующими граничными условиями:

$$\left. \begin{aligned} I_{\kappa A}^{(1,1)} &= 0, \\ U_{\kappa B}^{(1,1)} &= 0, \\ U_{\kappa C}^{(1,1)} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (60)$$

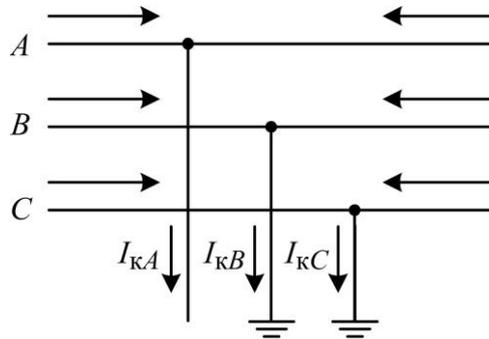


Рис. 17. Двухфазное КЗ на землю на фазах В и С, принципиальная схема

Используя уравнения метода симметричных составляющих и граничных условий, получим:

– для токов:

$$I_{\kappa A} = I_{\kappa A1} + I_{\kappa A2} + I_{\kappa A0} = 0; \quad (61)$$

$$I_{\kappa A1} = -(I_{\kappa A2} + I_{\kappa A0});$$

– для напряжений:

$$U_{\kappa A1} = \frac{1}{3}(U_{\kappa A} + a \cdot U_{\kappa B} + a^2 \cdot U_{\kappa C});$$

$$U_{\kappa A2} = \frac{1}{3}(U_{\kappa A} + a^2 \cdot U_{\kappa B} + a \cdot U_{\kappa C});$$

$$U_{кA0} = \frac{1}{3}(U_{кA} + U_{кB} + U_{кC});$$

при $U_{кB} = U_{кC} = 0$:

$$U_{кA1} = U_{кA2} = U_{кA0} = \frac{1}{3}U_{кA}. \quad (62)$$

Из выражений (42), (61), (62) можно найти значения токов всех последовательностей:

$$\left. \begin{aligned} I_{кA1} &= \frac{E_{A\Sigma} - U_{кA1}}{jx_{1\Sigma}}, \\ I_{кA2} &= -\frac{U_{кA2}}{jx_{2\Sigma}}, \\ I_{кA0} &= -\frac{U_{кA0}}{jx_{0\Sigma}}. \end{aligned} \right\} \quad (63)$$

Ток в фазе A равен нулю, $I_{кA} = 0$.

Следовательно, при $U_{кA1} = U_{кA2} = U_{кA0}$ можно записать:

$$\frac{E_{A\Sigma} - U_{кA1}}{jx_{1\Sigma}} - \frac{U_{кA2}}{jx_{2\Sigma}} - \frac{U_{кA0}}{jx_{0\Sigma}} = 0. \quad (64)$$

Из этого уравнения находим:

$$U_{кA1} = \frac{E_{A\Sigma}}{j \left(x_{1\Sigma} + \frac{x_{2\Sigma} \cdot x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} \right)} \cdot \frac{x_{2\Sigma} \cdot x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}. \quad (65)$$

Решая совместно уравнения (63 – 65), получим следующие значения токов отдельных последовательностей:

$$\left. \begin{aligned} I_{кA1}^{(1,1)} &= \frac{E_{A\Sigma}}{j \left(x_{1\Sigma} + \frac{x_{2\Sigma} \cdot x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} \right)}, \\ I_{кA2}^{(1,1)} &= -I_{кA1} \cdot \frac{x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}, \\ I_{кA0}^{(1,1)} &= -I_{кA1} \cdot \frac{x_{2\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}. \end{aligned} \right\} \quad (66)$$

Абсолютное значение тока прямой последовательности $I_{кА1}$ определяют по следующему выражению:

$$I_{кА}^{(1,1)} = \frac{E_{\Sigma}}{x_{1\Sigma} + \frac{x_{2\Sigma} \cdot x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}}. \quad (67)$$

Для тока $3I_0^{(1,1)}$, преобразуя уравнения (66), (67), получим следующее выражение:

$$3I_0^{(1,1)} = 3I_{кА0}^{(1,1)} = \frac{3 \cdot E_{\Sigma}}{2x_{0\Sigma} + x_{1\Sigma}}. \quad (68)$$

Векторные диаграммы токов и напряжений в месте двухфазного КЗ показаны на рис. 18.

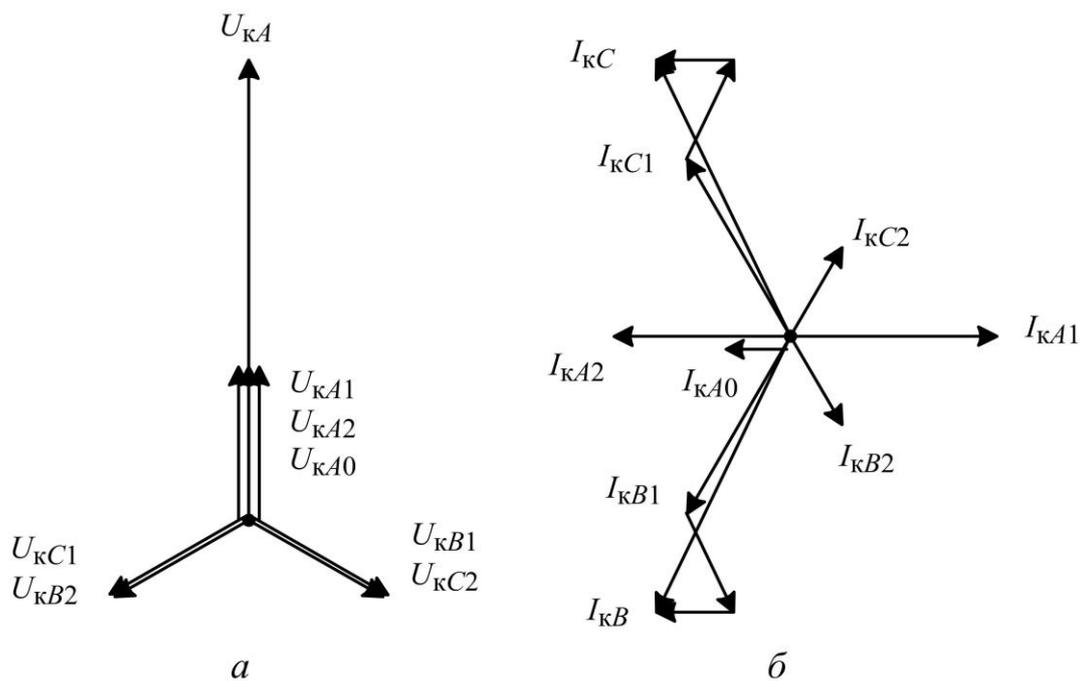


Рис. 18. Векторные диаграммы в месте двухфазного КЗ на землю:
а – напряжений; б – токов

Векторная диаграмма токов при двухфазном КЗ на землю по своему виду аналогична диаграмме напряжений однофазного КЗ, а диаграмма напряжений – диаграмме токов однофазного КЗ.

Контрольные вопросы

1. Перечислите особенности расчета несимметричных КЗ практическими методами расчета.
2. Изменится ли напряжение прямой последовательности в месте КЗ при несимметричных КЗ на землю при разземлении нейтралей части трансформаторов?
3. В каких случаях ток установившегося КЗ может превышать величину тока в начальный момент?
4. Может ли ток несимметричного КЗ в начальный момент превышать ток трехфазного КЗ?
5. Может ли ток несимметричного КЗ в установившемся режиме превышать ток трехфазного КЗ?
6. Как влияют тросы на индуктивное сопротивление нулевой последовательности?

Пример расчета токов КЗ для целей релейной защиты

На указанной схеме электроснабжения промышленного предприятия (рис. 19) необходимо рассчитать токи КЗ всех видов ($K^{(3)}$, $K^{(2)}$, $K^{(1)}$, $K^{(1,1)}$) в указанных точках К1-К9. В примере произведен расчет токов КЗ для точек К1 и К2 в максимальном и минимальном режиме работы энергосистемы.

Исходные данные:

1. ТЭЦ (электростанция А):

– генераторы ТВФ-120 ($S_{\text{НОМ}} = 125$ МВА, $P_{\text{Г}} = 100$ МВт, $U_{\text{НОМ}} = 10,5$ кВ, $\cos\varphi = 0,8$, $I_{\text{НОМ}} = 6,9$ кА, $x''_d = 0,192$, $x'_d = 0,278$, $x_d = 1,907$);

– трансформаторы ТДЦ-125000/220 ($S_{\text{НОМ}} = 125$ МВА, $U_{\text{ВН}} = 242$ кВ, $U_{\text{НН}} = 10,5$ кВ, $u_{\text{кв-н}} = 11$ %).

2. Подстанция Б:

– автотрансформаторы АТ-1, АТ-2 АТДЦТН-125000/220/110 ($S_{\text{НОМ}} = 125$ МВА, $U_{\text{ВН}} = 230$ кВ, $U_{\text{СН}} = 121$ кВ, $U_{\text{НН}} = 11$ кВ, $u_{\text{кв-с}} = 11$ %, $u_{\text{кв-н}} = 31$ %, $u_{\text{кс-н}} = 19$ %).

3. Подстанция Г:

– трансформаторы ТДН-25000/110/10 ($S_{\text{НОМ}} = 25$ МВА, $U_{\text{ВН}} = 110$ кВ, $U_{\text{НН1}} = U_{\text{НН2}} = 11$ кВ, $u_{\text{кв-н}} = 12$ %).

4. Линии электропередачи:

– линия 1, линия 2 – марка провода АС-400/51 ($l = 120$ км, $x_{\text{уд}} = 0,42$ Ом/км, $r_{\text{уд}} = 0,075$ Ом/км);

– линия 3, линия 4 – марка провода АС-240/32 ($l = 60$ км, $x_{\text{уд}} = 0,405$ Ом/км, $r_{\text{уд}} = 0,12$ Ом/км);

– линия 5, линия 6 – марка провода АС-400/51 ($l = 100$ км, $x_{\text{уд}} = 0,42$ Ом/км, $r_{\text{уд}} = 0,075$ Ом/км).

5. Параметры систем С1 и С2 одинаковы: $X_{\text{сmax}} = 8$ Ом, $X_{\text{сmin}} = 12$ Ом, $X_{\text{с0max}} = 11$ Ом, $X_{\text{с0min}} = 18$ Ом.

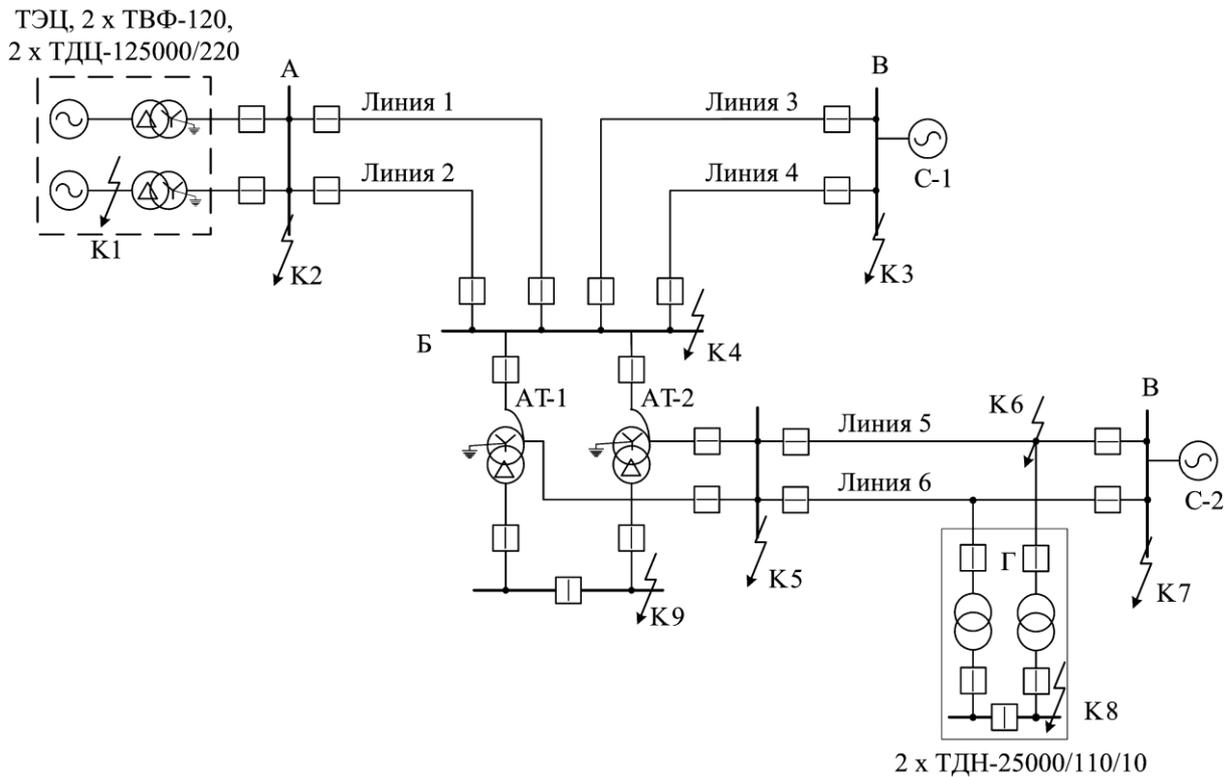


Рис. 19. Расчетная схема энергосистемы

Изначально необходимо определить сопротивления элементов схемы.

Расчет сопротивлений электрической схемы

1. Сопротивление генераторов ТЭЦ:

$$X_1 = X_2 = x_d'' \cdot \frac{U_{\text{ср.ном}}^2}{S_{\text{ном}}} = 0,192 \frac{10,5^2}{125} = 0,17 \text{ Ом.}$$

2. Сопротивление трансформаторов ТЭЦ:

$$X_3 = X_4 = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{\text{ср.ном}}^2}{S_{\text{ном}}} = \frac{11}{100} \frac{230^2}{125} = 46,6 \text{ Ом.}$$

3. Сопротивление линий Л1, Л2:

$$X_5 = X_6 = l \sqrt{x_{\text{уд}}^2 + r_{\text{уд}}^2} = 120 \sqrt{0,42^2 + 0,075^2} = 51,2 \text{ Ом.}$$

4. Сопротивление линий Л3, Л4:

$$X_7 = X_8 = l \sqrt{x_{\text{уд}}^2 + r_{\text{уд}}^2} = 60 \sqrt{0,405^2 + 0,12^2} = 25,3 \text{ Ом.}$$

5. Сопротивление линий Л5, Л6:

$$X_9 = X_{10} = l \sqrt{x_{\text{уд}}^2 + r_{\text{уд}}^2} = 100 \sqrt{0,42^2 + 0,075^2} = 43 \text{ Ом.}$$

6. Сопротивление автотрансформаторов АТ1, АТ2:

$$u_{KB} = 0,5 \cdot (u_{KB-C} + u_{KB-H} - u_{KC-H}) = 0,5(11 + 31 - 19) = 11,5 \%,$$

$$u_{KC} = 0,5 \cdot (u_{KB-C} + u_{KC-H} - u_{KB-H}) = 0,5(11 + 19 - 31) \approx 0,$$

$$u_{KH} = 0,5 \cdot (u_{KB-H} + u_{KC-H} - u_{KB-C}) = 0,5(19 + 31 - 11) = 19,5 \%,$$

$$X_{11} = X_{12} = X_B = \frac{u_{KB}}{100} \cdot \frac{U_{\text{ср.ном}}^2}{S_{\text{ном}}} = \frac{11,5}{100} \frac{230^2}{125} = 48,7 \text{ Ом};$$

$$X_{13} = X_{14} = X_C = \frac{u_{KC}}{100} \cdot \frac{U_{\text{ср.ном}}^2}{S_{\text{ном}}} = \frac{0}{100} \frac{230^2}{125} = 0 \text{ Ом};$$

$$X_{15} = X_{16} = X_H = \frac{u_{KH}}{100} \cdot \frac{U_{\text{ср.ном}}^2}{S_{\text{ном}}} = \frac{19,5}{100} \frac{230^2}{125} = 82,5 \text{ Ом}.$$

7. Сопротивление трансформаторов подстанции Г:

$$X_{17} = X_{18} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{\text{ср.ном}}^2}{S_{\text{ном}}} = \frac{12}{100} \frac{115^2}{25} = 63,5 \text{ Ом}.$$

Схема замещения для расчета токов КЗ в точках К1–К9 представлена на рис. 20.

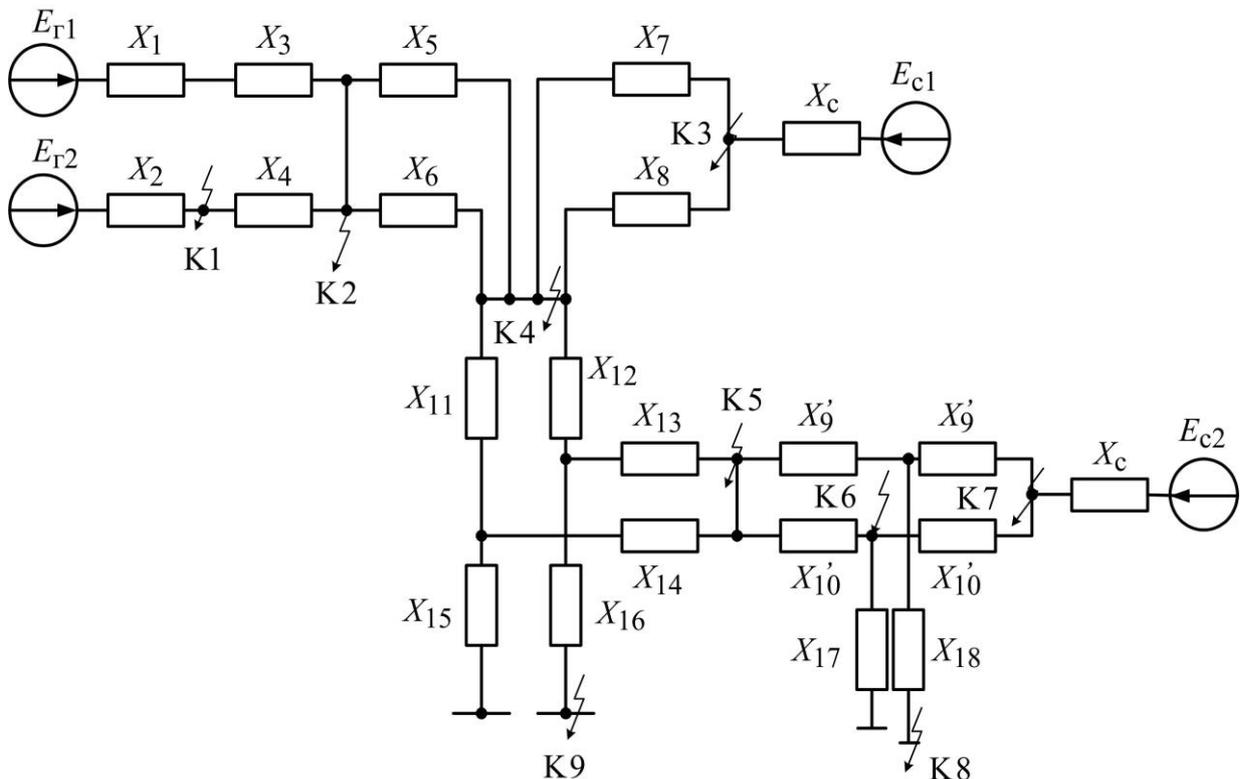


Рис. 20. Схема замещения для расчета токов КЗ

Токи КЗ направлены от источников питания к точкам замыкания, поэтому при определении величины тока КЗ необходимо определить эквивалентные сопротивления и ЭДС источников питания по отношению к расчетной аварийной точке. Произведём расчёт токов КЗ в точке К1 в максимальном режиме работы энергосистемы.

Расчет токов КЗ в точке К1 (максимальный режим)

Двухлучевая схема замещения для расчета токов КЗ в точке К1 представлена на рис. 21.

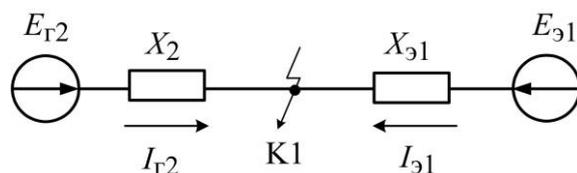


Рис. 21. Двухлучевая схема замещения для расчета токов КЗ в точке К1 (максимальный режим)

Определим эквивалентное сопротивление $X_{Э1}$ в максимальном режиме. Для этого необходимо произвести преобразования схемы замещения (рис. 20) относительно точки К1. При этом сопротивления элементов схемы замещения должны быть приведены к одной ступени напряжения. В данном случае точка К1 расположена на выводах генератора, поэтому целесообразно приводить все сопротивления к генераторному напряжению 10,5 кВ.

Приведенные значения сопротивлений схемы замещения определяют следующим образом:

$$X'_3 = X'_4 = X_3 \cdot k_{тр}^2 = X_3 \cdot \left(\frac{U_{НН}}{U_{ВН}} \right)^2 = 46,6 \cdot \left(\frac{10,5}{242} \right)^2 = 0,087 \text{ Ом};$$

$$X'_5 = X'_6 = X_5 \cdot k_{тр}^2 = X_5 \cdot \left(\frac{U_{НН}}{U_{ВН}} \right)^2 = 51,2 \cdot \left(\frac{10,5}{242} \right)^2 = 0,096 \text{ Ом};$$

$$X'_7 = X'_8 = X_7 \cdot k_{тр}^2 = X_7 \cdot \left(\frac{U_{НН}}{U_{ВН}} \right)^2 = 25,3 \cdot \left(\frac{10,5}{242} \right)^2 = 0,047 \text{ Ом};$$

$$X'_9 = X'_{10} = X_9 \cdot k_{тр1}^2 \cdot k_{тр2}^2 = X_9 \cdot \left(\frac{U_{ВН}}{U_{СН}} \right)^2 \cdot \left(\frac{U_{НН}}{U_{ВН}} \right)^2 = 43 \cdot \left(\frac{230}{121} \right)^2 \cdot \left(\frac{10,5}{242} \right)^2 = 0,3 \text{ Ом};$$

$$X'_{11} = X'_{12} = X'_B = X_{11} \cdot k_{\text{TP}}^2 = X_{11} \cdot \left(\frac{U_{\text{HH}}}{U_{\text{BH}}} \right)^2 = 48,7 \cdot \left(\frac{10,5}{242} \right)^2 = 0,1 \text{ Ом};$$

$$X'_{13} = X'_{14} = X'_C = X_{13} \cdot k_{\text{TP}}^2 = X_{13} \cdot \left(\frac{U_{\text{HH}}}{U_{\text{BH}}} \right)^2 = 0 \cdot \left(\frac{10,5}{242} \right)^2 = 0 \text{ Ом};$$

$$X'_{15} = X'_{16} = X'_H = X_{15} \cdot k_{\text{TP}}^2 = X_{15} \cdot \left(\frac{U_{\text{HH}}}{U_{\text{BH}}} \right)^2 = 82,5 \cdot \left(\frac{10,5}{242} \right)^2 = 0,16 \text{ Ом};$$

$$X'_{17} = X'_{18} = X_{17} \cdot k_{\text{TP1}}^2 \cdot k_{\text{TP2}}^2 = X_{17} \cdot \left(\frac{U_{\text{BH}}}{U_{\text{CH}}} \right)^2 \cdot \left(\frac{U_{\text{HH}}}{U_{\text{BH}}} \right)^2 = 63,5 \cdot \left(\frac{230}{121} \right)^2 \cdot \left(\frac{10,5}{242} \right)^2 = 0,43 \text{ Ом};$$

$$X'_{\text{cmax}} = X_c \cdot k_{\text{TP2}}^2 = X_c \cdot \left(\frac{U_{\text{HH}}}{U_{\text{BH}}} \right)^2 = 8 \cdot \left(\frac{10,5}{242} \right)^2 = 0,015 \text{ Ом};$$

$$X'_{\text{cmin}} = X_c \cdot k_{\text{TP2}}^2 = X_c \cdot \left(\frac{U_{\text{HH}}}{U_{\text{BH}}} \right)^2 = 12 \cdot \left(\frac{10,5}{242} \right)^2 = 0,022 \text{ Ом};$$

$$X''_{\text{cmax}} = X_c \cdot k_{\text{TP1}}^2 \cdot k_{\text{TP2}}^2 = X_c \cdot \left(\frac{U_{\text{BH}}}{U_{\text{CH}}} \right)^2 \cdot \left(\frac{U_{\text{HH}}}{U_{\text{BH}}} \right)^2 = 8 \cdot \left(\frac{230}{121} \right)^2 \cdot \left(\frac{10,5}{242} \right)^2 = 0,05 \text{ Ом};$$

$$X''_{\text{cmin}} = X_c \cdot k_{\text{TP1}}^2 \cdot k_{\text{TP2}}^2 = X_c \cdot \left(\frac{U_{\text{BH}}}{U_{\text{CH}}} \right)^2 \cdot \left(\frac{U_{\text{HH}}}{U_{\text{BH}}} \right)^2 = 12 \cdot \left(\frac{230}{121} \right)^2 \cdot \left(\frac{10,5}{242} \right)^2 = 0,075 \text{ Ом}.$$

При расчете эквивалентного сопротивления учитывают элементы схемы замещения, через которые проходит ток КЗ, т. е. определяют сопротивление петли КЗ. Поэтому при расчёте токов КЗ в точке К1 исключаем ветви с сопротивлениями X_{15} , X_{16} , X_{17} , X_{18} . Сопротивления АТ со стороны СН (X'_{13} и X'_{14}) равны нулю, поэтому их также не учитываем.

Проведём преобразование схемы замещения поэтапно (для удобства начнем сворачивать схему с правой стороны относительно точки К1). Сопротивления X'_9 и X'_{10} складываем параллельно:

$$X_{19} = X'_9 \parallel X'_{10} = \frac{X'_9 \cdot X'_{10}}{X'_9 + X'_{10}} = \frac{X'_9}{2} = \frac{0,3}{2} = 0,15 \text{ Ом}.$$

Сопровитвления X'_{11} и X'_{12} складываем параллельно:

$$X_{20} = X'_{11} \parallel X'_{12} = \frac{X'_{11} \cdot X'_{12}}{X'_{11} + X'_{12}} = \frac{X'_B}{2} = \frac{0,1}{2} = 0,05 \text{ Ом.}$$

Далее последовательно складываем сопротивления X_{19} , X_{20} и $X''_{\text{сmax}}$:

$$X_{21} = X_{19} + X_{20} + X''_{\text{сmax}} = 0,15 + 0,05 + 0,05 = 0,25 \text{ Ом.}$$

Складываем параллельно сопротивления X'_7 и X'_8 , затем полученное сопротивление складываем последовательно с сопротивлением $X'_{\text{сmax}}$:

$$X_{22} = X'_7 \parallel X'_8 + X'_{\text{сmax}} = \frac{X'_7 \cdot X'_8}{X'_7 + X'_8} + X'_{\text{сmax}} = \frac{0,047}{2} + 0,015 = 0,038 \text{ Ом.}$$

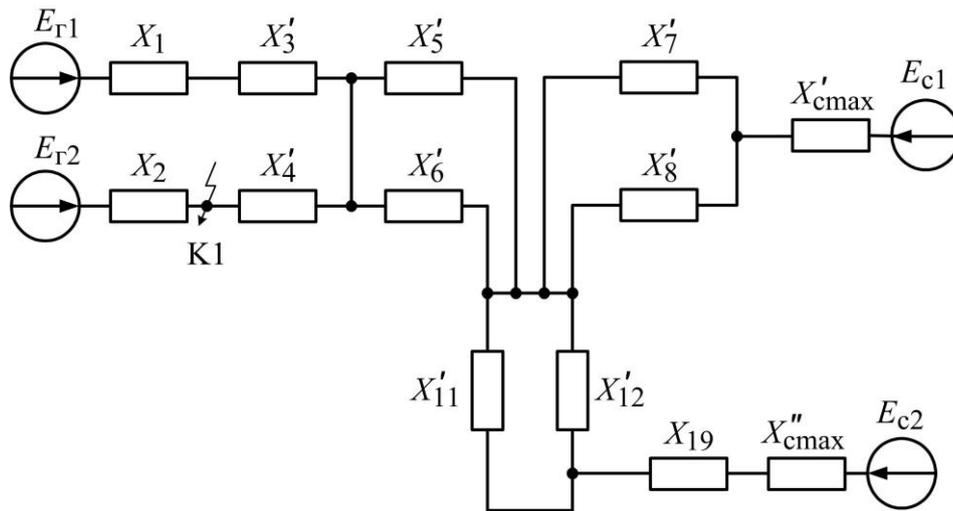


Рис. 22. Схема замещения для расчета токов КЗ в точке К1 после первого этапа преобразования (максимальный режим)

Сопровитвления X'_5 и X'_6 складываем параллельно:

$$X_{23} = X'_5 \parallel X'_6 = \frac{X'_5 \cdot X'_6}{X'_5 + X'_6} = \frac{0,096}{2} = 0,048 \text{ Ом.}$$

После выполнения преобразований схема, изображенная на рис. 22, упрощается до схемы, изображенной на рис. 23.

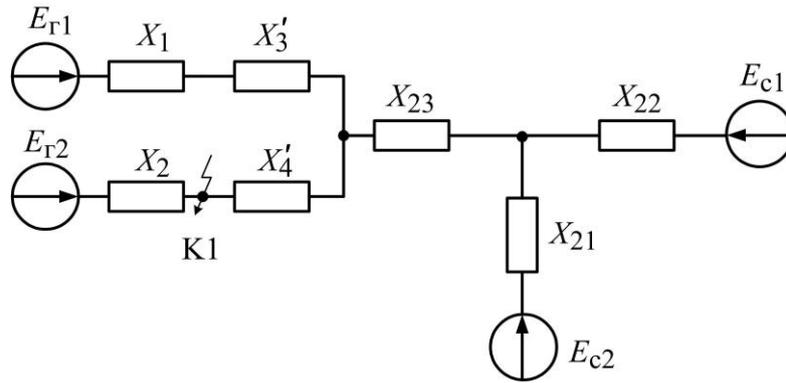


Рис. 23. Схема замещения для расчета токов КЗ в точке К1 на промежуточном этапе преобразования (максимальный режим)

Далее складываем параллельно сопротивления X_{21} и X_{22} , затем полученное сопротивление складываем последовательно с сопротивлением X_{23} :

$$X_{24} = X_{21} \parallel X_{22} + X_{23} = \frac{X_{21} \cdot X_{22}}{X_{21} + X_{22}} + X_{23} = \frac{0,25 \cdot 0,038}{0,25 + 0,038} + 0,048 = 0,078 \text{ Ом.}$$

Складываем последовательно сопротивления X_1 и X_3' , затем полученное сопротивление складываем параллельно с сопротивлением X_{24} :

$$X_{25} = (X_1 + X_3') \parallel X_{24} = \frac{(X_1 + X_3') \cdot X_{24}}{X_1 + X_3' + X_{24}} = \frac{0,257 \cdot 0,078}{0,257 + 0,078} = 0,06 \text{ Ом.}$$

Последним этапом преобразования определим эквивалентное сопротивление $X_{\text{Г1}}$ в максимальном режиме:

$$X_{\text{Г1}} = X_{25} + X_4' = 0,06 + 0,087 = 0,147 \text{ Ом.}$$

Таким образом, рассчитаны все величины, необходимые для расчета токов КЗ как со стороны генератора $I_{\text{Г2}}$, так и со стороны энергосистемы $I_{\text{Г1}}$ в максимальном режиме работы энергосистемы.

Определим токи трёхфазного и двухфазного КЗ со стороны генератора:

$$I_{\text{КГ2}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ср.ном.Г}}}{\sqrt{3} \cdot X_2} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 0,17} = 35,7 \text{ кА;}$$

$$I_{\text{КГ2}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\text{КГ2}}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} 35,7 = 30,9 \text{ кА.}$$

Токи трёхфазного и двухфазного КЗ со стороны системы:

$$I_{\text{э1}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} \cdot X_{\text{э1}}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 0,147} = 41,3 \text{ кА};$$

$$I_{\text{э1}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\text{э1}}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} 41,3 = 35,7 \text{ кА}.$$

Произведем перерасчет значения тока короткого замыкания $I_{\text{э1}}$ на другую ступень напряжения (с 10,5 кВ на 230 кВ):

$$I_{\text{э1}}^{\prime(3)} = I_{\text{э1}}^{(3)} \cdot \frac{U_{\text{НН}}}{U_{\text{ВН}}} = 41,3 \cdot \frac{10,5}{230} = 1,9 \text{ кА};$$

$$I_{\text{э1}}^{\prime(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\text{э1}}^{\prime(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} 1,9 = 1,63 \text{ кА}.$$

Расчет токов КЗ в точке К1 (минимальный режим)

Как правило, составляют схемы замещения для максимального и минимального режима работы энергосистемы. В минимальном режиме работы энергосистемы произведём отключение одного блока на ТЭЦ, линии 1 и автотрансформатора. Определение токов КЗ в минимальном режиме аналогично его определению в максимальном режиме. На рис. 24 представлена схема замещения для минимального режима работы энергосистемы.

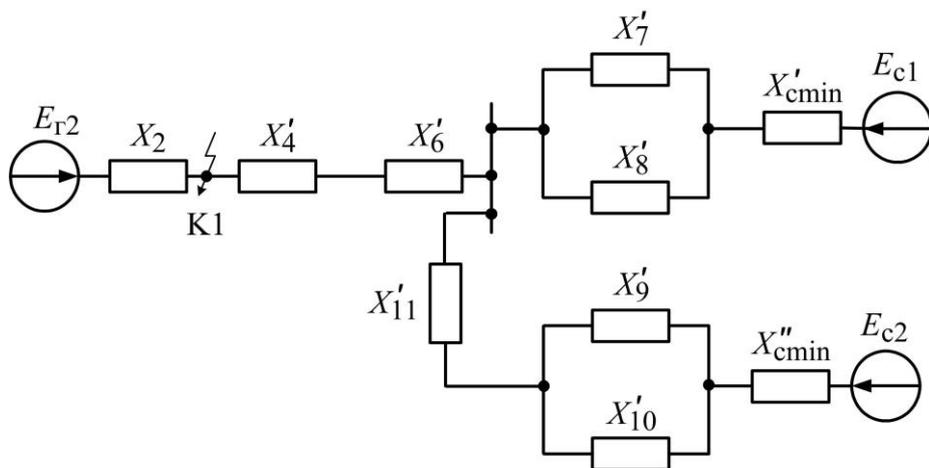


Рис. 24. Схема замещения энергосистемы в минимальном режиме для расчета токов КЗ в точке К1

Проведём преобразование схемы замещения поэтапно (для удобства начнем сворачивать схему с правой стороны относительно точки К1). Сопротивления X'_9 и X'_{10} складываем параллельно:

$$X_{26} = X'_9 \parallel X'_{10} = \frac{X'_9 \cdot X'_{10}}{X'_9 + X'_{10}} = \frac{X'_9}{2} = \frac{0,3}{2} = 0,15 \text{ Ом.}$$

Складываем последовательно сопротивления X'_{11} , X_{26} и $X''_{\text{сmin}}$:

$$X_{27} = X'_{11} + X_{26} + X''_{\text{сmin}} = 0,1 + 0,15 + 0,075 = 0,325 \text{ Ом.}$$

Далее складываем параллельно сопротивления X'_7 и X'_8 , затем полученное сопротивление складываем последовательно с сопротивлением $X'_{\text{сmin}}$:

$$X_{28} = X'_7 \parallel X'_8 + X'_{\text{сmin}} = \frac{X'_7 \cdot X'_8}{X'_7 + X'_8} + X'_{\text{сmin}} = \frac{0,047 \cdot 0,047}{0,047 + 0,047} + 0,022 = 0,046 \text{ Ом.}$$

Складываем последовательно сопротивления X'_4 и X'_6 :

$$X_{29} = X'_4 + X'_6 = 0,087 + 0,096 = 0,183 \text{ Ом.}$$

Далее складываем параллельно сопротивления X_{27} и X_{28} , затем полученное сопротивление складываем последовательно с сопротивлением X_{29} :

$$X_{\text{э1}} = X_{27} \parallel X_{28} + X_{29} = \frac{X_{27} \cdot X_{28}}{X_{27} + X_{28}} + X_{29} = \frac{0,325 \cdot 0,046}{0,325 + 0,046} + 0,183 = 0,223 \text{ Ом.}$$

Таким образом, рассчитаны все сопротивления, необходимые для расчета токов КЗ как со стороны генератора $I_{Г2}$, так и со стороны энергосистемы $I_{\text{э1}}$.

$$I_{\text{кг2}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ср.ном.Г}}}{\sqrt{3} \cdot X_2} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 0,17} = 35,7 \text{ кА;}$$

$$I_{\text{кг2}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\text{кг2}}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} 35,7 = 30,9 \text{ кА;}$$

$$I_{\text{э1}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} \cdot X_{\text{э1}}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 0,223} = 27,2 \text{ кА;}$$

$$I_{\text{э1}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\text{э1}}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} 27,2 = 23,6 \text{ кА.}$$

Произведем перерасчет значения тока короткого замыкания $I_{\text{э1}}$ на другую ступень напряжения (с 10,5 кВ на 230 кВ):

$$I_{\text{э1}}^{\prime(3)} = I_{\text{э1}}^{(3)} \cdot \frac{U_{\text{НН}}}{U_{\text{ВН}}} = 25 \cdot \frac{10,5}{230} = 1,24 \text{ кА;}$$

$$I_{\text{э1}}^{\prime(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\text{э1}}^{\prime(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} 1,24 = 1,07 \text{ кА.}$$

Поскольку точка К1 расположена в сети с изолированной нейтралью, расчет тока однофазного короткого замыкания не производится. В случае необходимости расчета параметров срабатывания защит от однофазных замыканий на землю следует воспользоваться специализированной литературой.

Расчет токов КЗ в точке К2 (максимальный режим)

Двухлучевая схема замещения для расчета токов КЗ в точке К2 представлена на рис. 25:

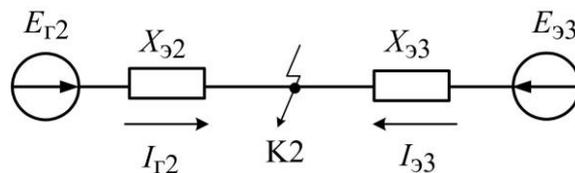


Рис. 25. Двухлучевая схема замещения для расчета токов КЗ в точке К2 (максимальный режим)

Определим эквивалентное сопротивление $X_{\text{э2}}$ и $X_{\text{э3}}$. Для этого необходимо произвести преобразования схемы замещения (рис. 20) относительно заданной точки К2 (рис. 26–27). При этом сопротивления элементов схемы замещения должны быть приведены к одной ступени напряжения. В данном случае точка К2 расположена на вводе силового трансформатора с номинальным напряжением 230 кВ.

Приведенные значения сопротивлений схемы замещения определяют следующим образом:

$$X'_{19} = X'_{20} = X_2 \cdot k_{\text{TP}}^2 = X_2 \cdot \left(\frac{U_{\text{BH}}}{U_{\text{HH}}} \right)^2 = 0,17 \cdot \left(\frac{242}{10,5} \right)^2 = 90,3 \text{ Ом};$$

$$X'_{21} = X'_{22} = X_9 \cdot k_{\text{TP1}}^2 = X_9 \cdot \left(\frac{U_{\text{BH}}}{U_{\text{CH}}} \right)^2 = 43 \cdot \left(\frac{230}{121} \right)^2 = 155,4 \text{ Ом};$$

$$X'_{23} = X'_{24} = X_{17} \cdot k_{\text{TP1}}^2 = X_{17} \cdot \left(\frac{U_{\text{BH}}}{U_{\text{CH}}} \right)^2 = 63,5 \cdot \left(\frac{230}{121} \right)^2 = 229,4 \text{ Ом};$$

$$X''_{\text{cmax}} = X_c \cdot k_{\text{TP1}}^2 = x_c \cdot \left(\frac{U_{\text{BH}}}{U_{\text{CH}}} \right)^2 = 8 \cdot \left(\frac{230}{121} \right)^2 = 28,9 \text{ Ом};$$

$$X''_{\text{cmin}} = X_c \cdot k_{\text{TP1}}^2 = X_c \cdot \left(\frac{U_{\text{BH}}}{U_{\text{CH}}} \right)^2 = 12 \cdot \left(\frac{230}{121} \right)^2 = 43,4 \text{ Ом}.$$

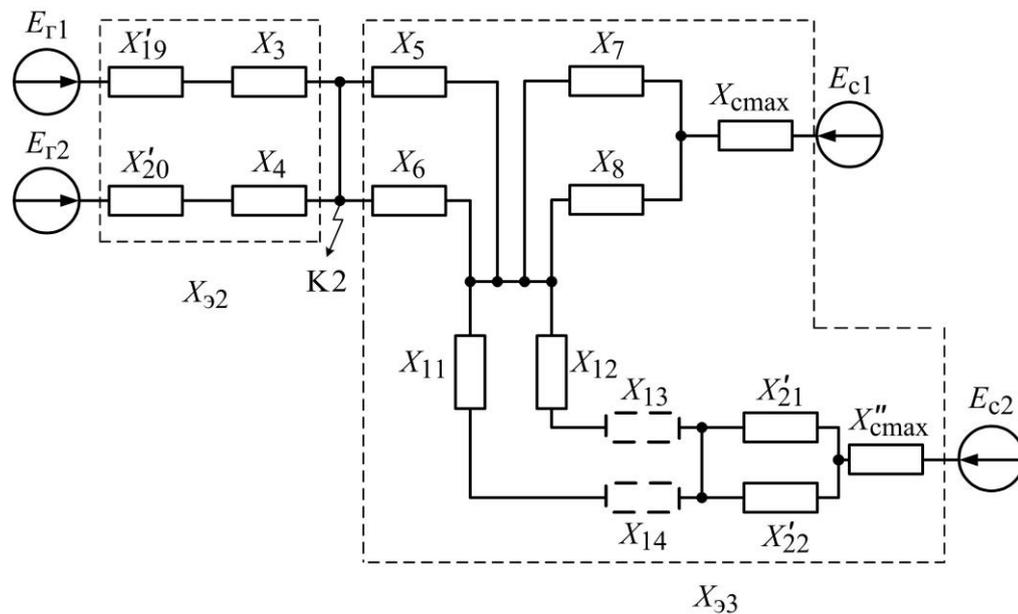


Рис. 26. Схема замещения для расчета токов КЗ в точке К2 (максимальный режим)

Проведём преобразование схемы замещения поэтапно (для удобства начнем сворачивать схему с правой стороны относительно точки К2). Складываем параллельно сопротивления X'_{21} и X'_{22} , затем полученное сопротивление складываем последовательно с сопротивлением X''_c :

$$X_{30} = X'_{21} \parallel X'_{22} + X''_c = \frac{X'_{21} \cdot X'_{22}}{X'_{21} + X'_{22}} + X''_c = \frac{155,4}{2} + 28,9 = 106,6 \text{ Ом}.$$

Сопротивления АТ со стороны СН (X_{13} и X_{14}) равны нулю, поэтому их не учитываем. Складываем параллельно сопротивления X_{11} и X_{12} :

$$X_{31} = X_{11} \parallel X_{12} = \frac{X_{11} \cdot X_{12}}{X_{11} + X_{12}} = \frac{X_{\text{в}}}{2} = \frac{48,7}{2} = 24,4 \text{ Ом.}$$

Затем складываем последовательно сопротивления X_{30} и X_{31} :

$$X_{32} = X_{30} + X_{31} = 106,6 + 24,4 = 131 \text{ Ом.}$$

Далее складываем параллельно сопротивления X_7 и X_8 , затем полученное сопротивление складываем последовательно с сопротивлением X_c :

$$X_{33} = X_7 \parallel X_8 + X_c = \frac{X_7 \cdot X_8}{X_7 + X_8} + X_c = \frac{25,3}{2} + 8 = 20,7 \text{ Ом.}$$

Складываем последовательно сопротивления X_5 и X_6 :

$$X_{34} = X_5 \parallel X_6 = \frac{X_5 \cdot X_6}{X_5 + X_6} = \frac{51,2}{2} = 25,6 \text{ Ом.}$$

Складываем параллельно сопротивления X_{32} и X_{33} , затем полученное сопротивление складываем последовательно с сопротивлением X_{34} :

$$X_{33} = X_{32} \parallel X_{33} + X_{34} = \frac{X_{32} \cdot X_{33}}{X_{32} + X_{33}} + X_{34} = \frac{131 \cdot 20,7}{131 + 20,7} + 25,6 = 43,5 \text{ Ом.}$$

Складываем последовательно сопротивления X'_{19} и X_3 (X'_{20} и X_4):

$$X_{35} = X'_{19} + X_3 = X'_{20} + X_4 = 90,3 + 46,6 = 136,9 \text{ Ом.}$$

Эквивалентное сопротивление ТЭЦ равно:

$$X_{32} = X_{35} \parallel X_{33} = \frac{X_{35}}{2} = 68,4 \text{ Ом.}$$

Таким образом, рассчитаны все сопротивления, необходимые для расчета токов КЗ как со стороны станции $I_{Г2}$, так и со стороны энергосистемы I_{33} .

$$I_{\text{кГ2}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ср.ном.Г}}}{\sqrt{3} \cdot X_{\text{э2}}} = \frac{230}{\sqrt{3} \cdot 68,4} = 1,94 \text{ кА};$$

$$I_{\text{кГ2}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\text{кГ2}}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} 1,94 = 1,68 \text{ кА};$$

$$I_{\text{э3}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} \cdot X_{\text{э3}}} = \frac{230}{\sqrt{3} \cdot 43,5} = 3,0 \text{ кА};$$

$$I_{\text{э3}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\text{э3}}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} 3,6 = 2,64 \text{ кА}.$$

Произведем перерасчет значения токов короткого замыкания $I_{\text{Г2}}$ на другую ступень напряжения (с 230 кВ на 10,5 кВ):

$$I'_{\text{кГ2}}^{(3)} = I_{\text{кГ2}}^{(3)} \cdot \frac{U_{\text{ВН}}}{U_{\text{НН}}} = 1,94 \cdot \frac{230}{10,5} = 42,4 \text{ кА};$$

$$I'_{\text{кГ2}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I'_{\text{кГ2}}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} 42,4 = 36,7 \text{ кА}.$$

Расчет токов КЗ в точке К2 (минимальный режим)

В минимальном режиме работы энергосистемы произведём отключение одного блока на ТЭЦ, линии 1 и автотрансформатора. Схема замещения для расчёта токов КЗ в точке К2 в минимальном режиме представлена на рис. 27. Проведём преобразование схемы замещения поэтапно (начнем сворачивать схему с правой стороны относительно точки К2).

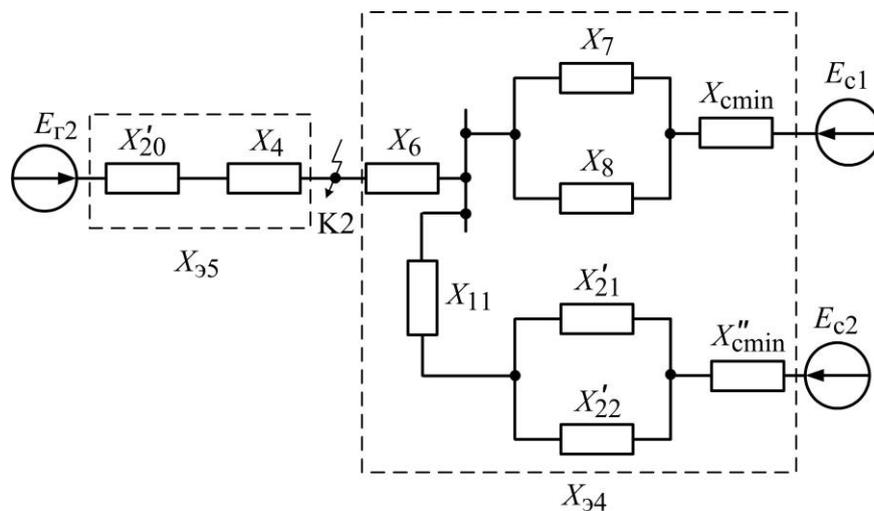


Рис. 27. Схема замещения энергосистемы в минимальном режиме для расчета токов КЗ в точке К2

Складываем параллельно сопротивления X_7 и X_8 , затем полученное сопротивление складываем последовательно с сопротивлением $X_{\text{сmin}}$:

$$X_{36} = X_7 \parallel X_8 + X_{\text{сmin}} = \frac{X_7 \cdot X_8}{X_7 + X_8} + X_{\text{сmin}} = \frac{25,3}{2} + 12 = 24,7 \text{ Ом.}$$

Далее складываем параллельно сопротивления X'_{21} и X'_{22} , затем полученное сопротивление складываем последовательно с сопротивлением $X''_{\text{сmin}}$:

$$X_{37} = X'_{21} \parallel X'_{22} + X''_{\text{сmin}} = \frac{X'_{21} \cdot X'_{22}}{X'_{21} + X'_{22}} + X''_{\text{сmin}} = \frac{155,4}{2} + 43,4 = 121,1 \text{ Ом.}$$

Складываем последовательно сопротивления X_{11} и X_{37} :

$$X_{38} = X_{11} + X_{37} = 67,7 + 121,1 = 188,8 \text{ Ом.}$$

Складываем параллельно сопротивления X_{36} и X_{38} , затем полученное сопротивление складываем последовательно с сопротивлением X_6 :

$$X_{\text{э4}} = X_{36} \parallel X_{38} + X_6 = \frac{X_{36} \cdot X_{38}}{X_{36} + X_{38}} + X_6 = \frac{24,7 \cdot 188,8}{24,7 + 188,8} + 51,2 = 73 \text{ Ом.}$$

Складываем последовательно сопротивления X'_{20} и X_4 :

$$X_{\text{э5}} = X_4 + X'_{20} = 46,6 + 90,3 = 136,9 \text{ Ом.}$$

Таким образом, рассчитаны все величины, необходимые для расчета токов КЗ как со стороны станции, так и со стороны энергосистемы.

$$I_{\text{кэ5}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ср.ном.г}}}{\sqrt{3} \cdot X_{\text{э5}}} = \frac{230}{\sqrt{3} \cdot 136,9} = 0,97 \text{ кА;}$$

$$I_{\text{кэ5}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\text{кэ5}}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} 0,97 = 0,84 \text{ кА;}$$

$$I_{\text{э4}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} \cdot X_{\text{э4}}} = \frac{230}{\sqrt{3} \cdot 73} = 1,82 \text{ кА;}$$

$$I_{\text{э}4}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\text{э}4}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} 1,82 = 1,58 \text{ кА.}$$

Произведем перерасчет значения тока короткого замыкания $I_{\text{э}5}$ на другую ступень напряжения (с 230 кВ на 10,5 кВ):

$$I_{\text{э}5}^{\prime(3)} = I_{\text{э}5}^{(3)} \cdot \frac{U_{\text{ВН}}}{U_{\text{НН}}} = 0,97 \cdot \frac{230}{10,5} = 21,2 \text{ кА;}$$

$$I_{\text{кэ}5}^{\prime(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\text{кэ}5}^{\prime(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} 21,2 = 18,4 \text{ кА.}$$

Расчет токов КЗ на землю в точке К2 (максимальный режим)

Расчет токов однофазного и двухфазного КЗ ведется с учетом схемы замещения нулевой последовательности сети. Так, для заданной сети схема замещения нулевой последовательности в максимальном режиме представлена на рис. 28.

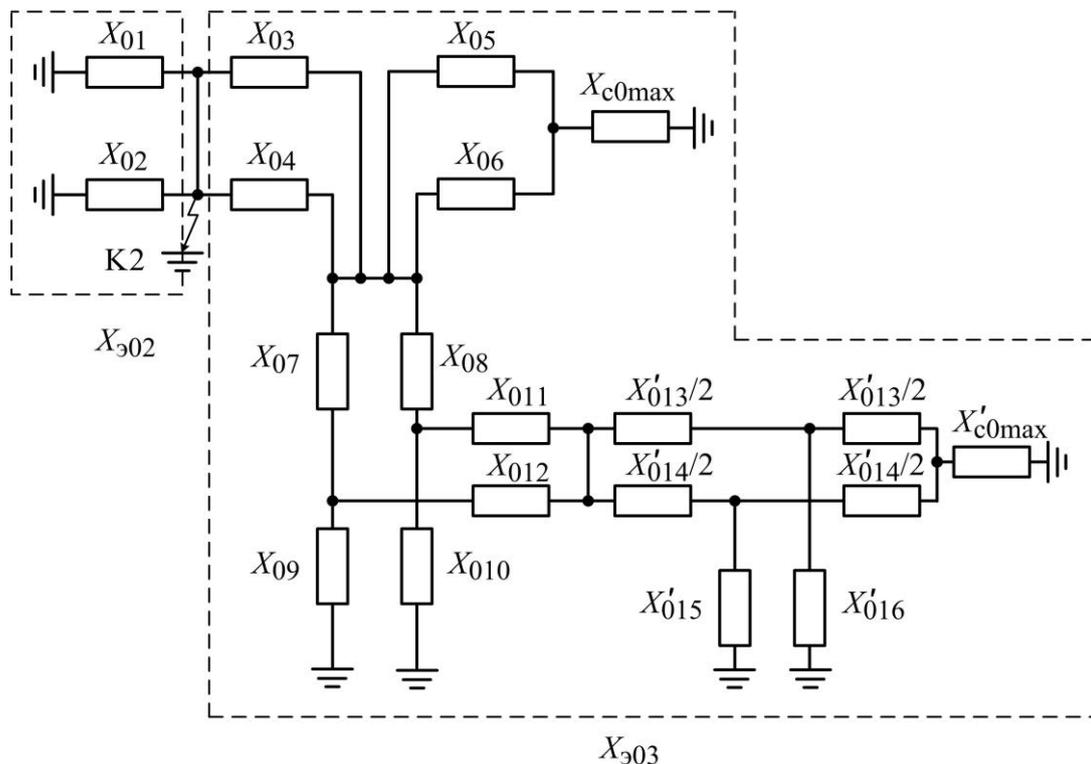


Рис. 28. Схема замещения нулевой последовательности сети в максимальном режиме

Определим эквивалентное сопротивление $X_{\text{э}02}$ и $X_{\text{э}03}$. Для этого необходимо произвести преобразования схемы замещения относительно заданной

точки К2. При этом сопротивления элементов схемы замещения должны быть приведены к одной ступени напряжения. В данном случае точка К2 расположена на вводе силового трансформатора с номинальным напряжением 230 кВ.

Определим сопротивления нулевой последовательности элементов энергосистемы (ступень напряжения 230 кВ):

$$\begin{aligned} X_{01} &= X_{02} = X_3 = X_4 = 46,6 \text{ Ом}; \\ X_{03} &= X_{04} = 4,7 \cdot X_5 = 240,6 \text{ Ом}; \\ X_{05} &= X_{06} = 4,7 \cdot X_7 = 118,9 \text{ Ом}; \\ X_{07} &= X_{08} = X_{11} = X_{12} = 48,7 \text{ Ом}; \\ X_{09} &= X_{010} = X_{15} = X_{16} = 82,5 \text{ Ом}; \\ X_{011} &= X_{012} = X_{13} = X_{14} = 0 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Приведём значения сопротивлений схемы замещения со стороны 110 кВ на сторону 220 кВ:

$$\begin{aligned} X'_{013} &= X'_{014} = 4,7 \cdot X_9 \cdot k_{\text{тр}}^2 = 4,7 \cdot X_9 \cdot \left(\frac{U_{\text{ВН}}}{U_{\text{СН}}} \right)^2 = 4,7 \cdot 43 \cdot \left(\frac{230}{121} \right)^2 = 730,2 \text{ Ом}; \\ X'_{015} &= X'_{016} = X_{17} \cdot k_{\text{тр}1}^2 = X_{17} \cdot \left(\frac{U_{\text{ВН}}}{U_{\text{СН}}} \right)^2 = 63,5 \cdot \left(\frac{230}{121} \right)^2 = 229,4 \text{ Ом}; \\ X'_{\text{с}0\text{max}} &= X_{\text{с}0\text{max}} \cdot k_{\text{тр}1}^2 = X_{\text{с}0\text{max}} \cdot \left(\frac{U_{\text{ВН}}}{U_{\text{СН}}} \right)^2 = 11 \cdot \left(\frac{230}{121} \right)^2 = 39,7 \text{ Ом}. \\ X'_{\text{с}0\text{min}} &= X_{\text{с}0\text{min}} \cdot k_{\text{тр}1}^2 = X_{\text{с}0\text{min}} \cdot \left(\frac{U_{\text{ВН}}}{U_{\text{СН}}} \right)^2 = 18 \cdot \left(\frac{230}{121} \right)^2 = 65 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Произведем преобразование схемы замещения относительно расчетной точки К2.

Для начала преобразуем участок сети с отпаечными трансформаторами на подстанции Г, подключенной к энергосистеме на середине линий Л5, Л6. Одна цепь линии с отпаечным трансформатором представляет собой схему сопротивлений – «звезда» (рис. 29), которую необходимо преобразовать в «треугольник» сопротивлений $X_{013(1)}$, $X_{013(2)}$, $X_{013(3)}$ (рис. 30). Аналогично представляется и вторая цепь линии в виде второго «треугольника» сопротивлений.

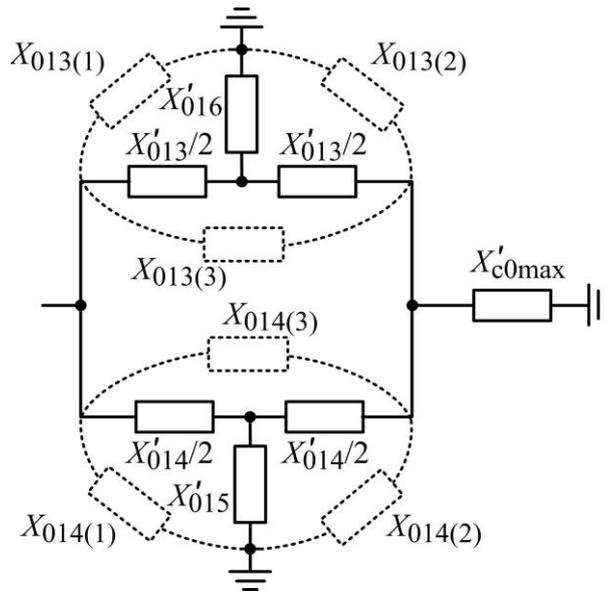


Рис. 29. Схема замещения нулевой последовательности участка сети, включающего в себя линии Л5, Л6, трансформаторы на подстанции Г и систему С2 (максимальный режим)

Очевидно, что сопротивления, входящие во второй «треугольник», равны сопротивлениям первого «треугольника»: $X_{013(1)} = X_{014(1)}$, $X_{013(2)} = X_{014(2)}$, $X_{013(3)} = X_{014(3)}$.

$$X_{013(1)} = \frac{X'_{013}}{2} + X'_{016} + \frac{\frac{X'_{013}}{2} \cdot X'_{016}}{\frac{X'_{013}}{2}} = 365,1 + 229,4 + \frac{365,1 \cdot 229,4}{365,1} = 823,9 \text{ Ом};$$

$$X_{013(2)} = \frac{X'_{013}}{2} + X'_{016} + \frac{\frac{X'_{013}}{2} \cdot X'_{016}}{\frac{X'_{013}}{2}} = 365,1 + 229,4 + \frac{365,1 \cdot 229,4}{365,1} = 823,9 \text{ Ом};$$

$$X_{013(3)} = \frac{X'_{013}}{2} + \frac{X'_{013}}{2} + \frac{\frac{X'_{013}}{2} \cdot \frac{X'_{013}}{2}}{X'_{016}} = 365,1 + 365,1 + \frac{365,1 \cdot 365,1}{229,4} = 1311,3 \text{ Ом}.$$

Далее схему можно рассматривать как совокупность параллельных сопротивлений. Складываем параллельно сопротивления X'_{c0max} , $X_{013(2)}$ и $X_{014(2)}$:

$$X_{017} = X'_{c0max} \parallel X_{014(2)} \parallel X_{013(2)} = \frac{X'_{c0max} \cdot X_{014(2)} \cdot X_{013(2)}}{X_{014(2)} \cdot X_{013(2)} + X'_{c0max} \cdot (X_{013(2)} + X_{014(2)})} =$$

$$= \frac{39,7 \cdot 823,9 \cdot 823,9}{823,9 \cdot 823,9 + 39,7 \cdot (823,9 + 823,9)} = 36,2 \text{ Ом}.$$

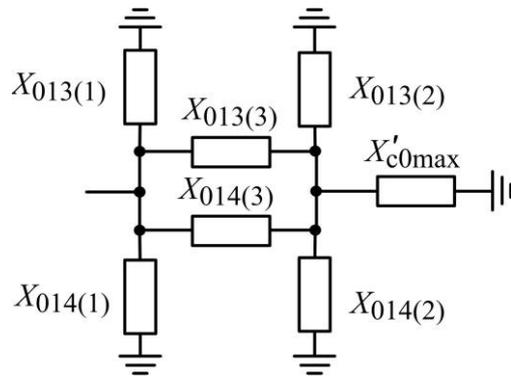


Рис. 30. Преобразованная схема замещения нулевой последовательности участка сети, включающего в себя линии Л5, Л6, трансформаторы на подстанции Г и систему С2 (максимальный режим)

Далее складываем параллельно сопротивления $X_{013(3)}$ и $X_{014(3)}$, затем полученное сопротивление складываем последовательно с сопротивлением X_{017} :

$$X_{018} = X_{013(3)} \parallel X_{014(3)} + X_{017} = \frac{X_{013(3)} \cdot X_{014(3)}}{X_{013(3)} + X_{014(3)}} + X_{017} =$$

$$= \frac{1311,3}{2} + 36,2 = 691,9 \text{ Ом.}$$

Складываем параллельно сопротивления X_{018} , $X_{013(1)}$ и $X_{014(1)}$:

$$X_{019} = X_{018} \parallel X_{014(1)} \parallel X_{013(1)} = \frac{X_{018} \cdot X_{014(1)} \cdot X_{013(1)}}{X_{014(1)} \cdot X_{013(1)} + X_{018} \cdot X_{013(1)} + X_{018} \cdot X_{014(1)}} =$$

$$= \frac{691,9 \cdot 823,9 \cdot 823,9}{823,9 \cdot 823,9 + 691,9 \cdot 823,9 + 691,9 \cdot 823,9} = 258,2 \text{ Ом.}$$

Далее складываем параллельно сопротивления X_{09} , X_{010} и X_{019} :

$$X_{020} = X_{09} \parallel X_{010} \parallel X_{019} = \frac{X_{09} \cdot X_{010} \cdot X_{019}}{X_{09} \cdot X_{010} + X_{09} \cdot X_{019} + X_{010} \cdot X_{019}} =$$

$$= \frac{82,5 \cdot 82,5 \cdot 258,2}{82,5 \cdot 82,5 + 82,5 \cdot 258,2 + 82,5 \cdot 258,2} = 35,6 \text{ Ом.}$$

Складываем параллельно сопротивления X_{07} и X_{08} , затем полученное сопротивление складываем последовательно с сопротивлением X_{020} :

$$X_{021} = X_{07} \parallel X_{08} + X_{020} = \frac{X_{07} \cdot X_{08}}{X_{07} + X_{08}} + X_{020} = \frac{48,7}{2} + 35,6 = 60 \text{ Ом.}$$

Складываем параллельно сопротивления X_{05} и X_{06} , затем полученное сопротивление складываем последовательно с сопротивлением $X_{c0\max}$:

$$X_{022} = X_{05} \parallel X_{06} + X_{c0} = \frac{X_{05} \cdot X_{06}}{X_{05} + X_{06}} + X_{c0\max} = \frac{118,9}{2} + 11 = 70,5 \text{ Ом.}$$

Складываем параллельно сопротивления X_{03} и X_{04} :

$$X_{023} = X_{03} \parallel X_{04} = \frac{X_{03} \cdot X_{04}}{X_{03} + X_{04}} = \frac{240,6}{2} = 120,3 \text{ Ом.}$$

Складываем параллельно сопротивления X_{021} и X_{022} , затем полученное сопротивление складываем последовательно с сопротивлением X_{023} :

$$X_{\varepsilon 03} = X_{021} \parallel X_{022} + X_{023} = \frac{X_{021} \cdot X_{022}}{X_{021} + X_{022}} + X_{023} = \frac{60 \cdot 70,5}{60 + 70,5} + 120,3 = 152,7 \text{ Ом.}$$

Далее складываем параллельно сопротивления X_{01} и X_{02} :

$$X_{\varepsilon 02} = X_{01} \parallel X_{02} = \frac{X_{01} \cdot X_{02}}{X_{01} + X_{02}} = \frac{46,6}{2} = 23,3 \text{ Ом.}$$

Таким образом, рассчитаны все величины, необходимые для расчета токов КЗ на землю как со стороны электростанции, так и со стороны энергосистемы в максимальном режиме:

$$I_{\text{кз}2}^{(1)} = \frac{\sqrt{3}U_{\text{ср.ном}}}{2X_{\varepsilon 2} + X_{\varepsilon 02}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 230}{2 \cdot 68,4 + 23,3} = 2,48 \text{ кА;}$$

$$I_{\text{кз}2}^{(1,1)} = \frac{\sqrt{3}U_{\text{ср.ном}}}{X_{\varepsilon 2} + 2X_{\varepsilon 02}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 230}{68,4 + 2 \cdot 23,3} = 3,46 \text{ кА;}$$

$$I_{\text{кз}3}^{(1)} = \frac{\sqrt{3}U_{\text{ср.ном}}}{2X_{\varepsilon 3} + X_{\varepsilon 03}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 230}{2 \cdot 43,5 + 152,7} = 1,66 \text{ кА;}$$

$$I_{\text{кз3}}^{(1,1)} = \frac{\sqrt{3}U_{\text{ср.ном}}}{X_{\text{э3}} + 2X_{\text{э03}}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 230}{43,5 + 2 \cdot 153,8} = 1,13 \text{ кА.}$$

Расчет токов КЗ на землю в точке К2 (минимальный режим)

Схема замещения нулевой последовательности для расчёта токов КЗ на землю в точке К2 в минимальном режиме представлена на рис. 31.

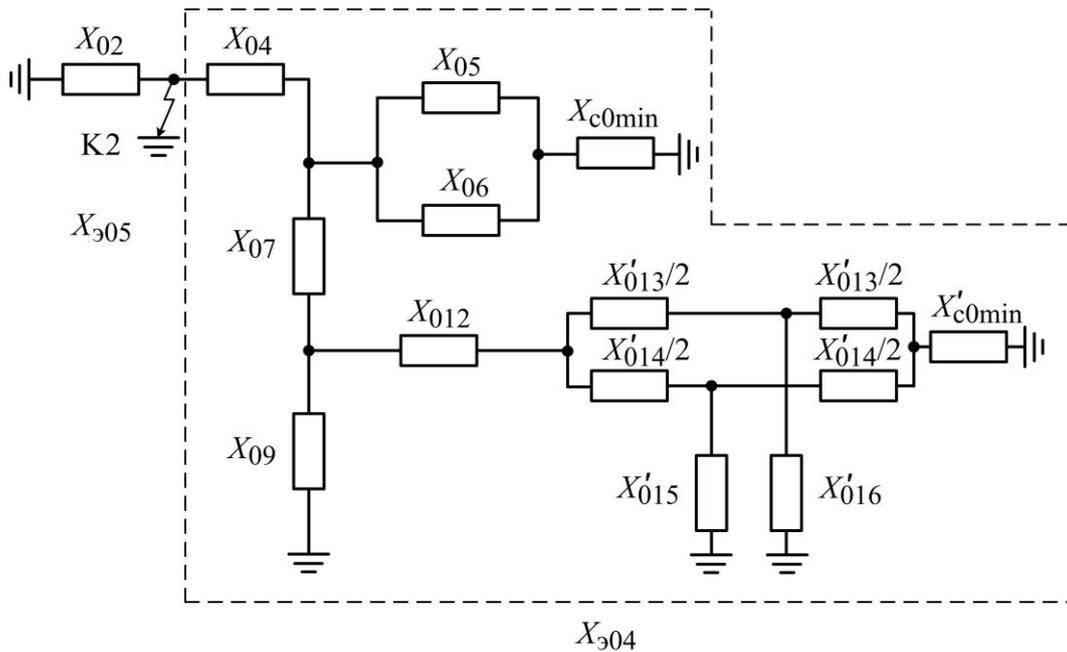


Рис. 31. Схема замещения нулевой последовательности сети в минимальном режиме

Схема замещения нулевой последовательности в минимальном режиме не содержит сопротивления: трансформатора блока ТЭЦ, линии 1 и автотрансформатора.

Складываем параллельно сопротивления X'_{c0min} , $X_{013(2)}$ и $X_{014(2)}$:

$$\begin{aligned} X_{024} &= X'_{\text{c0min}} \parallel X_{014(2)} \parallel X_{013(2)} = \frac{X'_{\text{c0min}} \cdot X_{014(2)} \cdot X_{013(2)}}{X_{014(2)} \cdot X_{013(2)} + X'_{\text{c0min}} \cdot (X_{013(2)} + X_{014(2)})} = \\ &= \frac{65 \cdot 823,9 \cdot 823,9}{823,9 \cdot 823,9 + 65 \cdot (823,9 + 823,9)} = 56,1 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Далее складываем параллельно сопротивления $X_{013(3)}$ и $X_{014(3)}$, затем полученное сопротивление складываем последовательно с сопротивлением X_{024} :

$$X_{025} = X_{013(3)} \parallel X_{014(3)} + X_{024} = \frac{X_{013(3)} \cdot X_{014(3)}}{X_{013(3)} + X_{014(3)}} + X_{024} = \\ = \frac{1311,3}{2} + 56,1 = 711,8 \text{ Ом.}$$

Складываем параллельно сопротивления $X_{013(1)}$ и $X_{014(1)}$:

$$X_{026} = X_{013(1)} \parallel X_{014(1)} = \frac{X_{013(1)} \cdot X_{014(1)}}{X_{013(1)} + X_{014(1)}} = \frac{823,9 \cdot 823,9}{823,9 + 823,9} = 412 \text{ Ом.}$$

Складываем параллельно сопротивления X_{025} и X_{026} :

$$X_{027} = X_{025} \parallel X_{026} = \frac{X_{025} \cdot X_{026}}{X_{025} + X_{026}} = \frac{711,8 \cdot 412}{711,8 + 412} = 261 \text{ Ом.}$$

Складываем параллельно сопротивления X_{09} и X_{027} , затем полученное сопротивление складываем последовательно с сопротивлением X_{07} :

$$X_{028} = X_{09} \parallel X_{027} + X_{07} = \frac{X_{09} \cdot X_{027}}{X_{09} + X_{027}} + X_{07} = \frac{82,5 \cdot 261}{82,5 + 261} + 48,7 = 111,4 \text{ Ом.}$$

Складываем параллельно сопротивления X_{05} и X_{06} , затем полученное сопротивление складываем последовательно с сопротивлением X_{c0min} :

$$X_{029} = X_{05} \parallel X_{06} + X_{c0min} = \frac{X_{05} \cdot X_{06}}{X_{05} + X_{06}} + X_{c0min} = \frac{118,9}{2} + 18 = 77,5 \text{ Ом.}$$

Далее складываем параллельно сопротивления X_{028} и X_{029} , затем полученное сопротивление складываем последовательно с сопротивлением X_{04} :

$$X_{\rightarrow 04} = X_{028} \parallel X_{029} + X_{04} = \frac{X_{028} \cdot X_{029}}{X_{028} + X_{029}} + X_{04} = \\ = \frac{111,4 \cdot 77,5}{111,4 + 77,5} + 240,6 = 286,3 \text{ Ом.}$$

Таким образом, рассчитаны все величины, необходимые для расчета токов КЗ на землю как со стороны электростанции, так и со стороны

энергосистемы в минимальном режиме:

$$I_{кз4}^{(1)} = \frac{\sqrt{3}U_{\text{ср.ном}}}{2X_{\text{э}4} + X_{\text{э}04}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 230}{2 \cdot 73 + 286,3} = 0,92 \text{ кА};$$

$$I_{кз4}^{(1,1)} = \frac{\sqrt{3}U_{\text{ср.ном}}}{X_{\text{э}4} + 2X_{\text{э}04}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 230}{73 + 2 \cdot 286,3} = 0,62 \text{ кА};$$

$$I_{кз5}^{(1)} = \frac{\sqrt{3}U_{\text{ср.ном}}}{2X_{\text{э}5} + X_{\text{э}05}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 230}{2 \cdot 136,9 + 46,6} = 1,24 \text{ кА};$$

$$I_{кз5}^{(1,1)} = \frac{\sqrt{3}U_{\text{ср.ном}}}{X_{\text{э}5} + 2X_{\text{э}05}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 230}{136,9 + 2 \cdot 46,6} = 1,73 \text{ кА}.$$

Результаты расчетов сведены в табл. 4.

Таблица 4

Таблица токов КЗ, кА

Точка КЗ		Максимальный режим				Минимальный режим			
		$K^{(3)}$	$K^{(2)}$	$K^{(1)}$	$K^{(1,1)}$	$K^{(3)}$	$K^{(2)}$	$K^{(1)}$	$K^{(1,1)}$
К1 (10,5 кВ)	от Г	35,7	30,9	–	–	35,7	30,9	–	–
	от С	41,3	35,7	–	–	27,2	23,6	–	–
К2 (230 кВ)	от Г	1,94	1,68	2,48	3,46	0,97	0,84	1,24	1,73
	от С	3,0	2,64	1,66	1,13	1,82	1,58	0,92	0,62

Типовая пояснительная записка по расчетам токов КЗ включает в себя несколько пунктов [9].

1. Общие положения. Характеристика расчетных условий. В данном разделе необходимо представить перечень вводимого/выводимого генерирующего оборудования или элементов электрической сети для каждого этапа расчета, а также учтенные эквивалентные реактансы связей с соседними энергосистемами.

2. Расчет токов КЗ на каждый этап. В качестве результатов расчетов необходимо представить таблицы проверки коммутационного оборудования, карты токов КЗ. Карта токов КЗ представляет собой схему электрической сети с нанесенными значениями суммарных трехфазных и однофазных токов КЗ на шинах подстанций и токи подпитки по каждой из подходящих линий.

3. Выводы по каждому расчетному периоду. В данном разделе необходимо сделать вывод о соответствии коммутационной способности выключателей расчетным токам КЗ. Также необходимо привести рекомендации по замене силовых выключателей или предложить способ ограничения токов КЗ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р 52735–2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12 июля 2007 г. № 173-ст : введен впервые : дата введения 2008–07–01 / разработан Филиалом ОАО «НТЦ электроэнергетики» – ВНИИЭ, Московским энергетическим институтом (Техническим университетом). – Москва : Стандартинформ, 2008. – 39 с.
2. Крючков, И. П. Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования : учебное пособие / И. П. Крючков, Б. Н. Неклепаев, В. А. Старшинов [и др.]; под ред. И. П. Крючкова, В. А. Старшинова. – 2-е изд., стер. – Москва : Издательский центр «Академия», 2006. – 416 с.
3. Беляева, Е. Н. Как рассчитать ток короткого замыкания / Е. Н. Беляева. – 2-е изд. перераб. и доп. – Москва : Энергоатомиздат, 1983. – 136 с.
4. Небрат, И. Л. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты : учебное пособие. В 2 частях. Часть 1 / И. Л. Небрат, Т. П. Полесицкая. – Санкт-Петербург : ПЭИПК, 2008. – 56 с.
5. Небрат, И. Л. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты : учебное пособие. В 2 частях. Часть 2 / И. Л. Небрат, Т. П. Полесицкая. – Санкт-Петербург : ПЭИПК, 2008. – 48 с.
6. Правила устройства электроустановок : все действующие разделы и главы шестого и седьмого изданий. – Москва : ЭНАС, 2019. – 672 с.
7. Копьев, В. Н. Релейная защита основного электрооборудования электростанций и подстанций. Вопросы проектирования : учебное пособие / В. Н. Копьев – 2-е изд., испр. и доп. – Томск : Издательство ЭЛТИ ТПУ, 2005. – 107 с.
8. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования / Под ред. Б. Н. Неклепаева. – Москва : Издательство НЦ ЭНАС, 2001. – 152 с.
9. Ерошенко, С. А. Расчёт токов коротких замыканий в энергосистемах : учебное пособие / С. А. Ерошенко, А. О. Егоров, М. Д. Сенюк [и др.]. – Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2019. – 104 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1. Выбор и составление расчетной схемы электрической сети и схемы замещения	4
1.1. Исходные положения и общие указания по выполнению расчетов	4
1.2. Составление расчётной схемы	5
1.2.1. Генераторы и синхронные компенсаторы	7
1.2.2. Электродвигатели напряжением выше 1000 В	9
1.2.3. Трансформаторы	9
1.2.4. Двухобмоточные трансформаторы	10
1.2.5. Трансформаторы трехобмоточные и автотрансформаторы	11
1.2.6. Двухобмоточные трансформаторы с расщепленной обмоткой НН	12
1.2.7. Особенности расчетов сопротивлений трансформаторов с учетом регулирования напряжения на стороне ВН	12
1.2.8. Токоограничивающие реакторы – одиночные и сдвоенные	14
1.2.9. Воздушные и кабельные линии электропередачи	15
1.2.10. Обобщенная нагрузка	15
1.2.11. Эквивалентные источники питания	15
Глава 2. Расчёт несимметричных и симметричных коротких замыканий	17
2.1. Выбор вида короткого замыкания	17
2.2. Выбор расчётных режимов работы схемы	17
2.3. Преобразование схемы замещения относительно заданной точки короткого замыкания	18
2.4. Распределение токов КЗ по ветвям	20
Глава 3. Несимметричные короткие замыкания	23
3.1. Метод симметричных составляющих	23
3.2. Расчет параметров нулевой последовательности элементов сети	27
3.3. Токи и напряжения в месте несимметричного короткого замыкания, векторные диаграммы токов и напряжений	32
Пример расчета токов КЗ для целей релейной защиты	42
Библиографический список	65

Учебное издание

РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Учебно-методическое пособие

Составители: **Хакимзянов Эльмир Фердинатович,**
Писковацкий Юрий Валерьевич

Кафедра релейной защиты и автоматизации электроэнергетических систем
КГЭУ

Редактор *С. Н. Чемоданова*
Компьютерная верстка *Т. И. Лунченковой*

Подписано в печать 15.04.2022.

Формат 60×84/16.

Усл. печ. л. 3,90. Уч.-изд. л. 1,73. Заказ № 407/эл.

Редакционно-издательский отдел КГЭУ,
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51