
ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЕТЕВАЯ КОМПАНИЯ
ЕДИНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ»



**СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ
ОАО «ФСК ЕЭС»**

**СТО 56947007-
33.180.10.173-2014**

**Методические указания
по расчету термического воздействия токов короткого замыкания и
термической устойчивости грозозащитных тросов и оптических кабелей,
встроенных в грозозащитный трос, подвешиваемых на воздушных
линиях электропередачи**

Стандарт организации

Дата введения: 21.05.2014

ОАО «ФСК ЕЭС»

2014

Предисловие

Цели и принципы стандартизации в Российской Федерации установлены Федеральным законом от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании», объекты стандартизации и общие положения при разработке и применении стандартов организаций Российской Федерации – ГОСТ Р 1.4-2004 «Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты организаций. Общие положения», общие требования к построению, изложению, оформлению, содержанию и обозначению межгосударственных стандартов, правил и рекомендаций по межгосударственной стандартизации и изменений к ним – ГОСТ 1.5-2001, правила построения, изложения, оформления и обозначения национальных стандартов Российской Федерации, общие требования к их содержанию, а также правила оформления и изложения изменений к национальным стандартам Российской Федерации – ГОСТ Р 1.5-2004.

Сведения о стандарте организации

1. РАЗРАБОТАН: ОАО «СОЮЗТЕХЭНЕРГО», НИУ МЭИ (кафедра РЗиАЭ)
2. ВНЕСЁН: Департаментом развития систем связи,
Департаментом инновационного развития.
3. УТВЕРЖДЁН И ВВЕДЁН В ДЕЙСТВИЕ:
Приказом ОАО «ФСК ЕЭС» от 21.05.2014 № 237.
4. ВВЕДЁН: ВПЕРВЫЕ.

Замечания и предложения по стандарту организации следует направлять в Департамент инновационного развития ОАО «ФСК ЕЭС» по адресу 117630, Москва, ул. Ак. Челомея, д. 5А, электронной почтой по адресу: yaga-na@fsk-ees.ru.

Настоящий документ не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения
ОАО «ФСК ЕЭС».

Содержание

Введение	4
1 Область применения	5
2 Нормативные ссылки	5
3 Обозначения и сокращения	5
4 Общие положения	6
5 Расчет тока КЗ в ГТ и ОКГТ	9
6 Расчетные условия для оценки термического воздействия и термической устойчивости ГТ и/или ОКГТ	21
7 Последовательность расчета термического воздействия и термической устойчивости ГТ и/или ОКГТ	27
8 Исходные данные необходимые для расчета термического воздействия и термической устойчивости ГТ и/или ОКГТ	30
9 Правила по формированию требования по термической стойкости ГТ и/или ОКГТ на основании расчетов термического воздействия тока КЗ	33
10 Проверка запланированных к подвеске на ВЛ ГТ и/или ОКГТ на соответствие их термической стойкости к термическому воздействию токов КЗ	35
Приложение А. Примеры расчетов термического воздействия токов КЗ на ГТ (ОКГТ), выполненных с помощью специализированного программного обеспечения	38
Приложение Б. Пример расчета термического воздействия тока КЗ на ОКГТ без применения специализированного программного обеспечения	59
Приложение В. Рекомендации по расчету термической стойкости ГТ и ОКГТ к токам КЗ.....	72
Библиография	80

Введение

Термическое воздействие токов КЗ на ГТ или ОКГТ происходит при протекании через них тока КЗ в произвольный момент времени в течение промежутка времени, определяемого временем отключения тока КЗ, приводящее к нагреву ГТ или ОКГТ и количественно определяемое интегралом Джоуля. Интеграл Джоуля является сложной функцией параметров источников энергии, конфигурации исходной расчетной схемы, положения расчетной точки КЗ относительно источников энергии, ее удаленности от последней и других факторов, определяемых функционированием конкретной ВЛ.

Термическая устойчивость ГТ или ОКГТ определяется путем сопоставления термического воздействия токов КЗ на ГТ или ОКГТ с нормированными производителем параметрами с их нормированной величиной термической стойкости.

Термическая стойкость ГТ или ОКГТ нормируется (определяется) производителем, величина которой указана в технической документации на каждый тип ГТ или ОКГТ, а также гарантирована производителем и подтверждена испытаниями.

Методические указания по расчету термического воздействия токов короткого замыкания и термической устойчивости грозозащитных тросов и оптических кабелей, встроенных в грозозащитный трос, подвешиваемых на воздушных линиях электропередачи (далее - Методические указания) включают в себя методы расчета тока КЗ в ГТ и/или ОКГТ, расчетные условия для оценки термического воздействия и термической устойчивости ГТ и/или ОКГТ, перечень исходных данных необходимых для расчета термического воздействия и термической устойчивости ГТ и/или ОКГТ, рекомендации производителям ГТ и/или ОКГТ по расчету их термической стойкости к токам КЗ.

Данные методические указания существенно отличаются от ранее действовавших методических указаний по расчету термической устойчивости грозозащитных тросов воздушных линий электропередачи (М.: Энергосетьпроект, 1976), которые с учетом изменившихся условий проектирования не в полной мере соответствуют надежной и безопасной эксплуатации ВЛ и ее элементов, особенно применительно к ОКГТ, по следующим причинам:

- 1) ориентированность на проведение расчетов с помощью логарифмической линейки, в связи, с чем содержит ряд упрощений в расчетных выражениях, снижающих точность расчета;

- 2) не учтен ряд факторов, влияющих на итоговый результат: возможность возникновения на ВЛ не только однофазных, но и двухфазных

коротких замыканий на землю; влияние сближенных ВЛ, через взаимоиндукцию с анализируемой ВЛ и т. п.;

3) расчет времени протекания тока в ГТ проводится исходя из действия только основных быстродействующих защит ВЛ, практически вне анализа остался вопрос об оценке времени отключения КЗ с учетом действия устройств релейной защиты и автоматики (РЗА), особенно с учетом возможных отказов выключателей и отдельных устройств РЗА;

4) расчет термического действия токов КЗ проводится без учета аperiodической составляющей.

Настоящие методические указания иллюстрируются примерами расчетов по термическому воздействию и термической устойчивости ГТ и ОКГТ.

1 Область применения

Настоящие Методические указания предназначены для использования инженерами-энергетиками при выполнении ими расчетов по термическому воздействию токов КЗ на грозозащитные тросы (ГТ) и/или оптические кабели, встроенные в грозозащитный трос (ОКГТ), и термической устойчивости ГТ и ОКГТ к воздействию токов КЗ. Дополнительно содержат рекомендации для производителей ГТ и ОКГТ по расчету термической стойкости ГТ и ОКГТ.

2 Нормативные ссылки

ГОСТ Р 52736-2007 Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия тока короткого замыкания.

3 Обозначения и сокращения

Для целей настоящих Методических указаний использованы следующие термины и определения.

АПВ – автоматическое повторное включение.

ВЛ – воздушная линия.

ГТ – грозозащитный трос.

КЗ – короткое замыкание.

ОКГТ – оптический кабель, встроенный в грозозащитный трос. Элемент ВЛ, предназначенный для защиты ВЛ от прямых ударов молнии, а также выполняющий функцию кабеля связи.

ПС – подстанция.

ПУЭ – правила устройства электроустановок.

РЗА – релейная защита и автоматика.

РУ – распределительное устройство.

УРОВ – устройство резервирования отказа выключателя.

ТЗНП – токовая защита нулевой последовательности.

4 Общие положения

4.1 Методические указания предназначены для расчета термической устойчивости грозозащитных тросов (ГТ) и/или оптических кабелей, встроенных в грозозащитный трос (ОКГТ), подвешиваемых на воздушных линиях (ВЛ) электропередачи напряжением 110 – 750 кВ, работающих в сетях с заземленной нейтралью. При этом не ставится задача разработки рекомендаций по методам обеспечения термической устойчивости, если принятое в проекте или существующее фактическое значение термической стойкости ГТ и/или ОКГТ оказывается недостаточным. В этом случае должны быть рассмотрены известные методы повышения термической стойкости ГТ и/или ОКГТ, не входящие в предмет данных указаний. Также не рассматриваются вопросы проверки ГТ и/или ОКГТ по иным критериям, например, по критерию механической прочности ГТ (ОКГТ) или опор, а также термическое воздействие от удара молнии.

4.2 Методические указания позволяют проводить расчеты по термическому воздействию тока короткого замыкания (КЗ) на ГТ и/или ОКГТ с целью выбора их параметров по критерию термической устойчивости к токам КЗ для конкретных условий подвески на вновь проектируемых или модернизируемых ВЛ.

4.3 В количественном выражении критерий термической устойчивости оценивается интегралом Джоуля, определяемым в соответствии с ГОСТ Р 52736 по соотношению:

$$B_{тер.расч} = \int_0^{t_{откл}} i(t)_T^2 dt, \quad (4.1.a)$$

где $B_{тер.расч}$ – расчетное значение интеграла Джоуля;

$i(t)_T$ – ток, протекающий в ГТ и/или ОКГТ в произвольный момент времени t , А;

$t_{откл}$ – расчетная продолжительность КЗ, с.

Термическое воздействие определяется с учетом апериодической составляющей тока, имеющей постоянную времени T_a . Для удаленных КЗ интеграл Джоуля ($B_{тер.расч}$) определяется в соответствии с ГОСТ Р 52736 по формуле:

$$B_{тер.расч} = I_T^2 \cdot \left[t_{откл} + T_a \cdot \left(1 - e^{-\frac{2 \cdot t_{откл}}{T_a}} \right) \right], \quad (4.1.б)$$

В случае, когда $t_{откл} \geq 3 T_a$ интеграл Джоуля ($V_{тер.расч}$) допустимо определять по формуле:

$$V_{тер.расч} \approx I_T^2 \cdot (t_{откл} + T_a), \quad (4.1.в)$$

где I_T – действующее значение тока в ГТ и/или ОКГТ.

Расчетное значение $V_{тер.расч.}$ сравнивается с допустимым значением $V_{тер.доп.}$, гарантированным производителем ГТ и/или ОКГТ.

4.4 Входящая в (4.1) постоянная времени апериодической составляющей тока T_a , может быть приближенно оценена по соотношению индуктивной и активной составляющей входного сопротивления нулевой последовательности исходной схемы сети по отношению к точке КЗ:

$$T_a = \frac{X_{ВХ}}{\omega \cdot R_{ВХ}}, \quad (4.2)$$

где $\omega = 314$ рад/с;

$X_{ВХ}$, $R_{ВХ}$ – индуктивная и активная составляющие входного сопротивления нулевой последовательности схемы сети по отношению к точке КЗ.

4.5 Допустимое значение $V_{тер.доп.}$ нормируется производителем ГТ и/или ОКГТ по максимально допустимой температуре нагрева для заданной начальной температуры ГТ и/или ОКГТ. В случае, когда значение начальной температуры отличается от значения, принятого производителем при определении $V_{тер.доп.}$, например, вследствие нагрева из-за несимметрии нагрузочного режима, его значение должно быть откорректировано.

4.6 Расчеты проводятся для ГТ и/или ОКГТ, имеющего заземление на ряде опор ВЛ, что приводит к прохождению тока через ГТ и/или ОКГТ при КЗ на землю. Далее рассматриваются только опоры, на которых ГТ имеет заземление. При этом под пролетом (средним пролетом) между опорами понимается расстояние между смежными опорами с заземленным ГТ и/или ОКГТ. На участках ВЛ с изолированным креплением троса проверка на термическую стойкость не производится.

При подвеске ГТ и/или ОКГТ на опоре через искровой промежуток в случае его пробоя при возникновении КЗ на землю принимается вариант троса, имеющего заземление на опоре.

4.7 На различных участках ВЛ типы и число ГТ могут различаться и соответственно иметь различные параметры (диаметры, сечения и удельное сопротивление).

4.8 Расчетными видами повреждений являются однофазное и двухфазное КЗ на опору ВЛ (КЗ на землю). При наличии ОАПВ следует также учитывать КЗ в неполнофазном режиме работы ВЛ.

4.9 Расчетными точками КЗ являются опоры на подходах к ПС, опоры на которых изменяется число и/или параметры ГТ и/или ОКГТ, а также опоры, находящиеся в зоне больших времен срабатывания устройств релейной защиты.

4.9.1 При условии отключения КЗ защитой с абсолютной селективностью время срабатывания защиты принимается постоянным, определяемым быстродействием защиты, независимо от положения точки КЗ на ВЛ. При этом, разброс собственного времени срабатывания защиты в зависимости от положения точки КЗ не оказывает существенного влияния на результаты расчета и может не учитываться.

4.9.2 При отсутствии на ВЛ защит с абсолютной селективностью или при учете возможности их отказа отключение КЗ выполняется действием защит с относительной селективностью: токовыми защитами нулевой последовательности или дистанционными защитами от КЗ на землю. В этом случае время срабатывания защиты определяется ступенью, которая оказывается чувствительной в заданной точке КЗ. Соответственно, расчетные точки КЗ должны быть заданы на границах зон, определяемых чувствительностью отдельных ступеней защиты в расчетном режиме прилегающей к ВЛ сети. Как правило, границы зон действия отдельных ступеней могут быть выявлены только в ходе многовариантных расчетов при перемещении точки КЗ вдоль ВЛ и проверке чувствительности ступеней защиты.

4.10 Максимальные токи в ГТ и/или ОКГТ проходят на ближайших пролетах от точки КЗ. Поэтому расчеты тока в ГТ и/или ОКГТ достаточно проводить только для одного пролета слева и справа от точки КЗ.

4.11 При модернизации существующих ВЛ и/или при организации ВОЛС-ВЛ на существующих ВЛ, а также с целью уменьшения механических нагрузок от ГТ и/или ОКГТ на вновь проектируемых ВЛ может оказаться целесообразным выявить участки с повышенным термическим воздействием тока КЗ на ГТ и/или ОКГТ, что выполняется путем расчета термического воздействия при перемещении точки КЗ вдоль всей длины ВЛ, т.е. расчетными точками КЗ являются все опоры с заземленным ГТ и/или ОКГТ. Как правило, необходимо выполнение многовариантных расчетов, предусматривающее использование ГТ и/или ОКГТ различного сечения, диаметра и удельного сопротивления на различных участках ВЛ, при этом, для ОКГТ предъявляются высокие требования к точности расчетов, так как в случае его термической неустойчивости (нарушения его термической стойкости) кроме всего прочего возникнет угроза потери канала связи.

4.12 Точность расчетов определяется не только принятой методикой, но и достоверностью исходных данных, необходимых для выполнения расчетов. При отсутствии достоверных исходных данных должны быть приняты их предельные оценочные значения, определяющие максимальное

термическое воздействие. Кроме того, следует учитывать изменения исходных данных при перспективном развитии прилегающей к проектируемой ВЛ электрической сети, которые могут привести к иным значениям токов КЗ и уставок РЗА.

4.13 Расчеты проводятся исходя из полностью симметричной ВЛ. При этом, допустимо не учитывать нарушение симметрии ВЛ, обусловленной, например, расположением точки КЗ на участках между пунктами транспонирования. Также предполагается симметрия всех других элементов исходной схемы сети.

4.14 Методика расчета предусматривает использование относительно сложных аналитических зависимостей, а также выполнение многовариантных расчетов. Методические указания содержат рекомендации в объеме, достаточном для выполнения ручных расчетов. Однако, с учетом большого объема расчетов, особенно для ВЛ с различными характеристиками ГТ (ОКГТ) по длине ВЛ, а также при отключении КЗ ступенчатыми защитами с относительной селективностью, полноценные расчеты по представленным методическим указаниям целесообразно проводить с применением специализированного программного обеспечения.

4.15 Упрощенные расчеты оценочного характера могут быть проведены без привлечения специализированного программного обеспечения на базе ранее разработанной методики, изложенной в [1]. Следует, однако, иметь в виду, что получаемые при этом результаты могут иметь значительные погрешности и должны рассматриваться в качестве предварительных результатов.

Исходя из оценочного характера результатов, могут быть, в основном, приняты приближения, приведенные в [1], с учетом следующих дополнений:

- 1) расчеты должны проводиться не только для однофазного, но и двухфазного КЗ на землю;
- 2) при анализе времени отключения КЗ должна использоваться методика, изложенная в настоящих методических указаниях;
- 3) в расчетах должна быть использована уточненная расчетная формула (5.1), приведенная в настоящих методических указаниях.

5 Расчет тока КЗ в ГТ и ОКГТ

5.1 В зависимости от схемы заземления ГТ и/или ОКГТ и от числа тросов на опоре на различных участках ВЛ, она может быть представлена участками, отличающимися числом и (или) типом ГТ и/или ОКГТ, как представлено на рисунке 5.1.

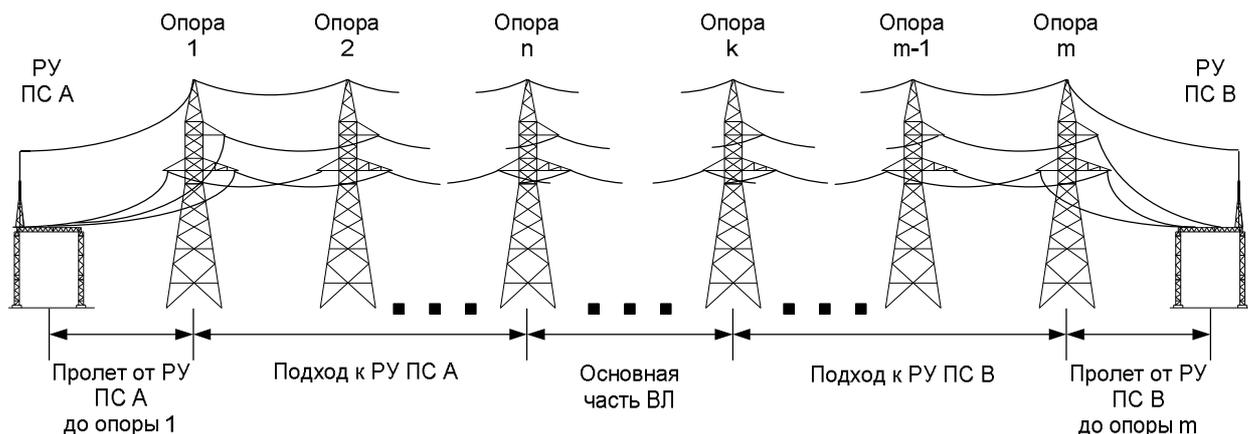


Рисунок 5.1 Участки ВЛ

5.1.1 В максимальном варианте, приведенном на рисунке 5.1, ВЛ содержит пять участков:

- 1) основная часть ВЛ;
- 2) пролет между распределительным устройством (РУ) и первой опорой (справа и слева);
- 3) подход к РУ от первой до n-ой опоры слева и от опоры m до k-ой опоры справа.

В случае, если ВЛ содержит более пяти участков (например, различные тросы на основной части ВЛ), в расчетной схеме она должна быть разбита на две или более линии, последовательно соединяющиеся между собой, для которых расчет по ГТ и/или ОКГТ ведется независимо.

5.1.2 В минимальном варианте, если ГТ и/или ОКГТ не отличаются по всей длине ВЛ, она представляется одним участком, содержащим только основную часть.

5.1.3 По одному из концов ВЛ грозозащитный трос может не иметь заход на РУ. Такая схема может возникать, если в расчетной схеме ВЛ разбита на две линии в соответствии с рекомендациями 5.1.1, а также, если ВЛ или ГТ (ОКГТ) не имеют непосредственной связи с РУ, например, наличие отпайки на ВЛ, прокладка ГТ (ОКГТ) в обход РУ или отсутствие заземления ГТ (ОКГТ) на одном из концов ВЛ, соединяющимся с РУ.

5.2 При однофазном или двухфазном КЗ на опору в схеме на рисунке 5.2(а) растекание тока происходит по направлениям, указанным на рисунке 5.2(б). Ток I_k растекается от точки КЗ по трем контурам в направлении: заземления опоры $I_{оп}$, троса слева $I_{т.А}$ (в направлении подстанции А) и справа $I_{т.В}$ (в направлении подстанции В) от точки КЗ.

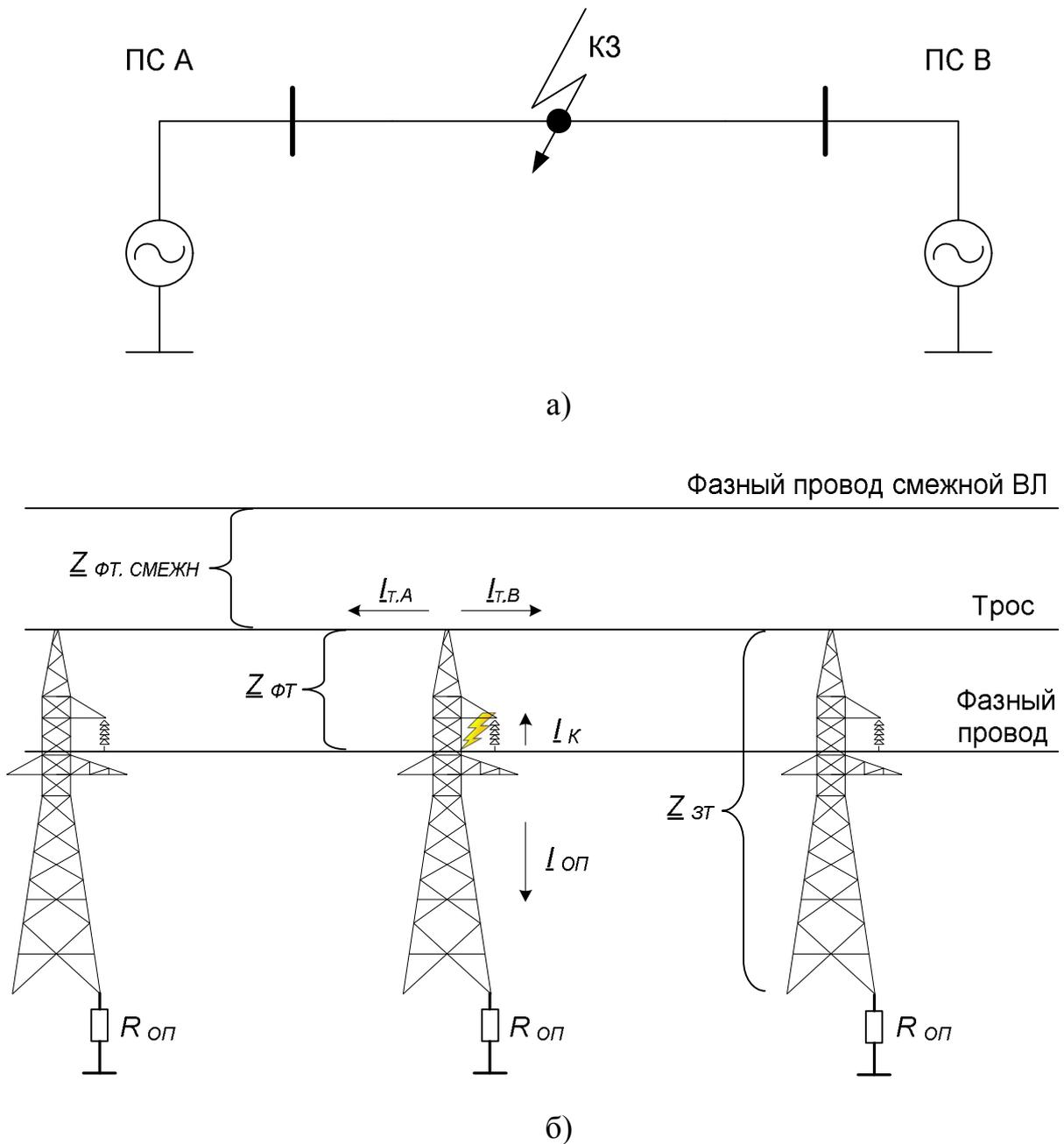


Рисунок 5.2 Распределение токов при пробое на опору

Расчетное выражение для определения тока в ГТ (ОКГТ) получено по методу [2], в соответствии с которым ток в тросе \underline{I}_T определяется по соотношению:

$$\underline{I}_T = \underline{I}_{ур} + \underline{I}_{доп.(R_{оп})} + \underline{I}_{доп.(R_A)} + \underline{I}_{доп.(R_B)} + \underline{I}_{инд.з} + \underline{I}_{инд.ф.смежн}, \quad (5.1)$$

где $\underline{I}_{ур}$ – составляющая тока для «уравновешенной» расчетной схемы, полученной при условии равенства нулю сопротивления опоры, на которой рассматривается КЗ, и сопротивлений заземления РУ подстанций слева (А) и справа (В);

$\underline{I}_{доп.(R_{оп})}$ – дополнительная составляющая тока, учитывающая влияние ненулевого значения сопротивления опоры с точкой КЗ;

$\underline{I}_{\text{доп.}(RA)}$, $\underline{I}_{\text{доп.}(RB)}$ – дополнительные составляющие тока, учитывающие влияние ненулевых значений сопротивления заземления РУ подстанций слева (А) и справа (В);

$\underline{I}_{\text{инд.з}}$ – комплексное значение индуктивной составляющей тока, обусловленное индуктивной связью между током земли и ГТ (ОКГТ). Индуктивная составляющая $\underline{I}_{\text{инд.з}}$, как это принято и в [1], далее не учитывается;

$\underline{I}_{\text{инд. ф. смежн.}}$ – комплексное значение суммарной индуктивной составляющей тока, обусловленное индуктивной связью ГТ (ОКГТ) с фазными проводами смежных ВЛ, находящихся в одном коридоре взаимоиндукции с рассчитываемой ВЛ.

Все входящие в (5.1) составляющие обусловлены только токами нулевой последовательности.

5.3 Составляющая тока ГТ слева $\underline{I}_{\text{ур.А}}$ и справа $\underline{I}_{\text{ур.В}}$ от точки КЗ для «уравновешенной» расчетной схемы определяется по соотношению [1]:

$$\underline{I}_{\text{ур.А}} = (1 - \underline{P}) \cdot \underline{I}_A, \quad (5.2, \text{ а})$$

$$\underline{I}_{\text{ур.В}} = (1 - \underline{P}) \cdot \underline{I}_B, \quad (5.2, \text{ б})$$

где \underline{I}_A , \underline{I}_B – утроенное значение тока нулевой последовательности, проходящего в ВЛ слева (в направлении подстанции А) и справа (в направлении подстанции В) от точки КЗ¹;

\underline{P} – безразмерный коэффициент:

$$\underline{P} = 1 - \frac{R_3 + jX_{\text{фГТ}}}{Z_T}, \quad (5.3)$$

где R_3 – удельное сопротивление растеканию тока в земле [Ом/км];

Z_T – удельное сопротивление петли трос-земля [Ом/км], полученное по рекомендациям 5.11;

$X_{\text{фГТ}}$ – удельное индуктивное сопротивление взаимоиндукции между ГТ и фазными проводами ВЛ [Ом/км], полученное в соответствии с 5.12.

5.4 Дополнительная составляющая тока ГТ слева $\underline{I}_{\text{доп.А}(R_{оп})}$ и справа $\underline{I}_{\text{доп.В}(R_{оп})}$ от точки КЗ, учитывающая влияние ненулевого значения сопротивления опоры с точкой КЗ, определяется по соотношению:

$$\underline{I}_{\text{доп.А}(R_{оп})} = \underline{P} \cdot \underline{I}_K \cdot \frac{Z_0}{Z_{\text{ВХ.А}}}, \quad (5.4, \text{ а})$$

¹ Значения токов рассчитываются согласно [3].

$$\underline{I}_{\text{доп.В(Rоп)}} = \underline{P} \cdot \underline{I}_K \cdot \frac{\underline{Z}_0}{\underline{Z}_{\text{ВХ.В}}}, \quad (5.4, б)$$

где \underline{I}_K – ток в точке КЗ, равный утроенному значению тока нулевой последовательности в точке КЗ²;

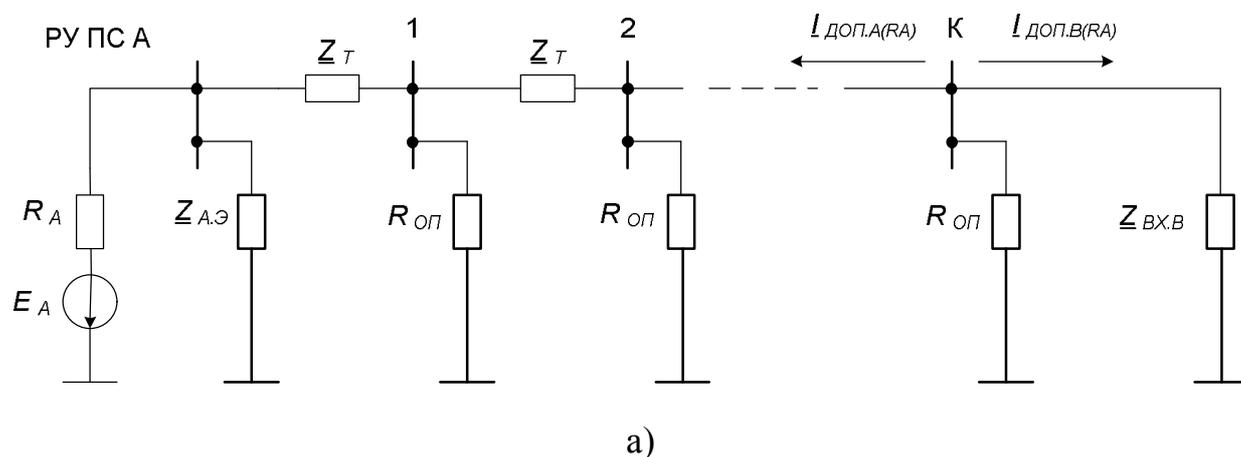
$\underline{Z}_{\text{ВХ.А}}$, $\underline{Z}_{\text{ВХ.В}}$ – входные сопротивления троса слева и справа от точки КЗ, полученные по рекомендациям 5.7;

\underline{Z}_0 – определяется из соотношения:

$$\frac{1}{\underline{Z}_0} = \frac{1}{\underline{Z}_{\text{ВХ.А}}} + \frac{1}{\underline{Z}_{\text{ВХ.В}}} + \frac{1}{R_{\text{оп}}}, \quad (5.5)$$

где $R_{\text{оп}}$ – сопротивление заземления опоры с точкой КЗ.

5.5 Дополнительные составляющие тока $\underline{I}_{\text{доп.(РА)}}$, $\underline{I}_{\text{доп.(RB)}}$, учитывающие влияние ненулевых значений сопротивлений заземления РУ на подстанциях А и В, определяются исходя из расчетной схемы, представленной на рисунке 5.3. Схема на рисунке 5.3,а приведена для расчета дополнительной составляющей тока, проходящего в тросе слева $\underline{I}_{\text{доп.А(РА)}}$ и справа $\underline{I}_{\text{доп.В(РА)}}$ от точки КЗ, схема позволяет учесть влияние сопротивления заземления РУ РА подстанции А. Схема на рисунке 5.3,б приведена для расчета дополнительной составляющей тока, проходящего в тросе слева $\underline{I}_{\text{доп.А(RB)}}$ и справа $\underline{I}_{\text{доп.В(RB)}}$ от точки КЗ, схема позволяет учесть влияние сопротивления заземления РУ RB подстанции В.



² Значение тока рассчитывается согласно [3].

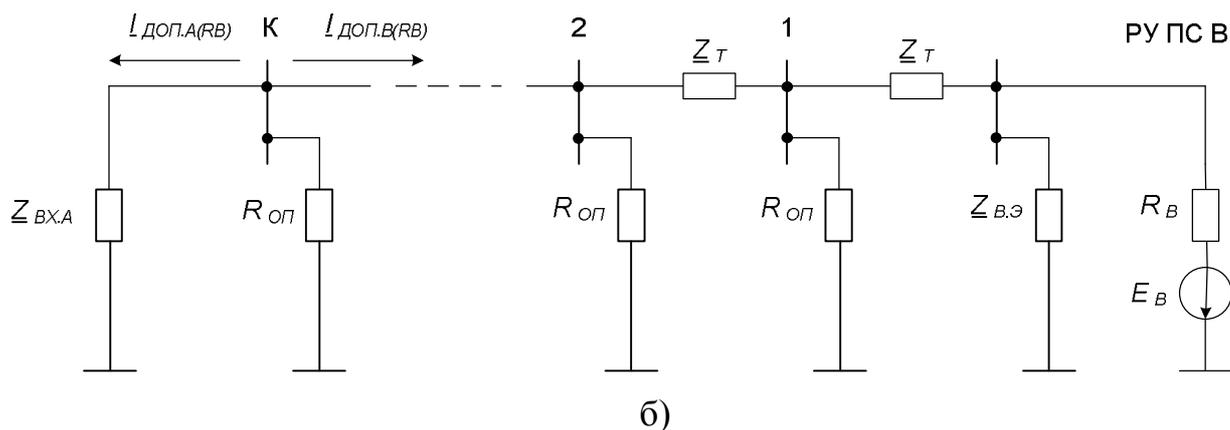


Рисунок 5.3 Расчетные схемы для определения дополнительных составляющих токов в ГТ, учитывающих влияние ненулевых значений сопротивления заземления РУ подстанций слева (рис.5.3,а) и справа (рис.5.3, б)

Обозначения, приведенные на рисунке 5.3, а, б:

K – номер опоры с точкой КЗ, считая от РУ подстанции А (рисунок 5.3, а) и от РУ подстанции В (рисунок 5.3, б);

R_A, R_B – сопротивление заземления РУ на подстанциях А и В;

$Z_{A.э}, Z_{B.э}$ – эквивалентное входное сопротивление тросов смежных ВЛ, отходящих от общих с рассчитываемой ВЛ шин на подстанциях А и В, полученное по рекомендациям 5.8;

Z_T – сопротивление петли трос-земля на пролете между опорами;

$R_{оп}$ – сопротивление заземления опоры;

$Z_{вх.А}, Z_{вх.В}$ – входное сопротивление троса слева и справа от точки КЗ;

E_A, E_B – действующие в схемах ЭДС;

$I_{доп.А(РА)}, I_{доп.В(РА)}$ – дополнительная составляющая тока в тросе слева и справа от точки КЗ, учитывающая влияние ненулевого значения сопротивления R_A ;

$I_{доп.А(РВ)}, I_{доп.В(РВ)}$ – дополнительная составляющая тока в тросе слева и справа от точки КЗ, учитывающая влияние ненулевого значения сопротивления R_B .

Рисунок 5.3 приведен для однородной схемы, характеризующейся следующими условиями:

- 1) сопротивления заземления всех опор совпадают;
- 2) сопротивления тросов на всех участках между опорами совпадают в пределах ВЛ от РУ до опоры с точкой КЗ.

При нарушении этих условий на схеме (см. рис. 5.3) необходимо указать индивидуальные сопротивления элементов $\underline{R}_{оп}$ и $\underline{Z}_г$, соответствующих данному участку.

Значения указанных на рисунке 5.3 ЭДС определяются по выражениям:

$$\underline{E}_A = \underline{P} \cdot \underline{I}_A \cdot R_A, \quad (5.6, а)$$

$$\underline{E}_B = \underline{P} \cdot \underline{I}_B \cdot R_B, \quad (5.6, б)$$

где $\underline{I}_A, \underline{I}_B$ – токи в линии слева и справа от точки КЗ.

Непосредственный расчет $\underline{I}_{доп.(RA)}, \underline{I}_{доп.(RB)}$ по схемам (см. рис. 5.3) может потребовать значительных трудозатрат. При условиях однородности схемы на участке от РУ подстанции до опоры с точкой КЗ (от подстанции А до опоры К на рисунке 5.3, а и от подстанции В до опоры К на рисунке 5.3, б и наличия на участке от точки КЗ до РУ противоположной подстанции (до подстанции В на рисунке 5.3, а и до подстанции А на рисунке 5.3, б более 10 опор практически без погрешности результат может быть получен по приближенным формулам:

$$\underline{I}_{доп.А(RA)} = \frac{\underline{E}_A}{(R_A + \underline{Z}_1)} \cdot \frac{\underline{Z}_{AЭ}}{(\underline{Z}_{AЭ} + \underline{Z}_{BX.B})} \cdot \left(\frac{R_{он}}{R_{он} + \underline{Z}_{BX.B}} \right)^{K-1}, \quad (5.7.а)$$

$$\underline{I}_{доп.В(RA)} = \frac{-\underline{E}_A}{(R_A + \underline{Z}_1)} \cdot \frac{\underline{Z}_{AЭ}}{(\underline{Z}_{AЭ} + \underline{Z}_{BX.B})} \cdot \left(\frac{R_{он}}{R_{он} + \underline{Z}_{BX.B}} \right)^K, \quad (5.7.б)$$

$$\underline{I}_{доп.А(RB)} = \frac{-\underline{E}_B}{(R_B + \underline{Z}_1)} \cdot \frac{\underline{Z}_{BЭ}}{(\underline{Z}_{BЭ} + \underline{Z}_{BX.A})} \cdot \left(\frac{R_{он}}{R_{он} + \underline{Z}_{BX.A}} \right)^K, \quad (5.7.в)$$

$$\underline{I}_{доп.В(RB)} = \frac{\underline{E}_B}{(R_B + \underline{Z}_1)} \cdot \frac{\underline{Z}_{BЭ}}{(\underline{Z}_{BЭ} + \underline{Z}_{BX.A})} \cdot \left(\frac{R_{он}}{R_{он} + \underline{Z}_{BX.A}} \right)^{K-1}, \quad (5.7.г)$$

$$\text{где } \underline{Z}_1 = \frac{\underline{Z}_{BX.B} \cdot \underline{Z}_{AЭ}}{\underline{Z}_{AЭ} + \underline{Z}_{BX.B}}, \quad \underline{Z}_2 = \frac{\underline{Z}_{BX.A} \cdot \underline{Z}_{BЭ}}{\underline{Z}_{BЭ} + \underline{Z}_{BX.A}}.$$

Знак минус в формулах (5.7, б) и (5.7, в) учитывает принятые на рисунке 5.3 условные положительные направления тока и ЭДС.

Влияние ЭДС на ток в тросе быстро снижается при удалении точки КЗ от РУ. Анализ выражений (5.5, 5.6) показывает, что при характерных значениях входящих в схему – рисунок 5.3 сопротивлений, доля тока, доходящего от ЭДС до ближайшего к точке КЗ пролета, составляет доли процента при удалении точки КЗ от РУ на четыре опоры для сталеалюминиевого троса и на пять опор для стального троса. При большем удалении точки КЗ от РУ составляющие $\underline{I}_{доп.(RA)}, \underline{I}_{доп.(RB)}$ могут не учитываться. При расположении точки

КЗ вблизи РУ, как правило, достаточен учет только одной составляющей $I_{доп.(RA)}$ или $I_{доп.(RB)}$, учитывающей влияние ближайшего РУ.

5.6 Суммарная индуктивная составляющая $I_{инд.ф.смежн.}$ обусловленная индуктивной связью ГТ или ОКГТ с фазными проводами смежных ВЛ, находящихся в одном коридоре взаимной индукции с рассчитываемой, находится как сумма составляющих от каждой учитываемой ВЛ:

$$I_{инд.ф.смежн.} = \sum_i \left(I_{0\ смежн. i} \cdot \frac{Z_{фГТ}}{Z_T} \right), \quad (5.8)$$

где $I_{0\ смежн. i}$ – утроенный ток нулевой последовательности i -ой ВЛ³;

$Z_{фГТ}$ – удельное сопротивление взаимной индукции между фазными проводами i -ой ВЛ и проектируемым ГТ [Ом/км]:

$$Z_{фГТ} = R_3 + j X_{фГТ},$$

где Z_T – удельное сопротивление ГТ [Ом/км].

Расчет $X_{фГТ}$ проводится по рекомендациям 5.12 с учетом среднегеометрического расстояния между фазными проводами i -ой ВЛ и рассчитываемым ГТ.

Взаимоиндукцию смежных ВЛ целесообразно учитывать в тех же условиях, в которых принято проводить такой учет при выполнении расчетов токов КЗ для проектирования релейной защиты [3].

5.7 Входное сопротивление троса $Z_{вх.А}$ при КЗ на n -ой опоре определяется по расчетной схеме, представленной на рисунке 5.4. По аналогичной схеме определяется входное сопротивление троса $Z_{вх.В}$.

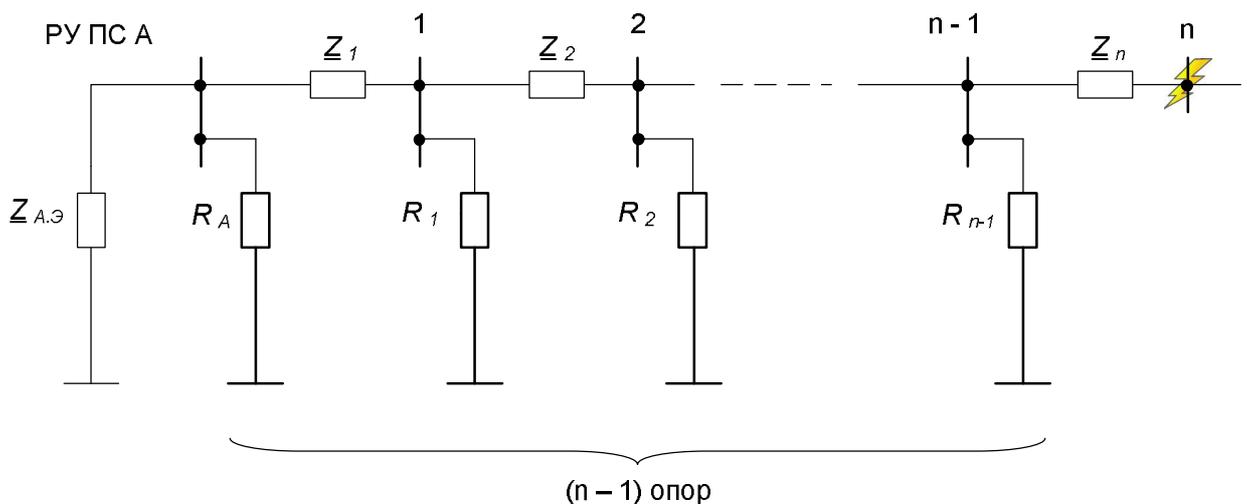


Рисунок 5.4 - Схема замещения для расчета входного сопротивления при КЗ на n -ой опоре

³ Значение тока рассчитывается согласно [3]

На рисунке 5.4: R_i – сопротивление заземления i -ой опоры, где $i=1,2,\dots,n$; R_A – сопротивление заземления РУ; Z_i – сопротивление петли трос-земля на i -м пролете, где $i=1,2,\dots,n$; $Z_{A,Э}$ – эквивалентное входное сопротивление ГТ(ОКГТ) смежных ВЛ, отходящих от шин общих с рассчитываемой ВЛ.

В частном случае, когда значения сопротивлений опор, а также средние длины пролетов между опорами и характеристики троса на пролетах примерно совпадают, допустимо рассматривать схему - рисунок 5.4 как однородную. Расчет входных сопротивлений в этом случае значительно упрощается и могут быть использованы рекомендации [1], согласно которым входное сопротивление определяется соотношением:

$$\underline{Z}_{ex.A} = \frac{\underline{Z}_m \cdot \underline{Z}_c + \underline{Z}_c^2 \cdot th(m \cdot \underline{G})}{\underline{Z}_c + \underline{Z}_m \cdot th(m \cdot \underline{G})}, \quad (5.9)$$

где

$$\underline{Z}_c = \sqrt{\underline{Z}_{cp} \cdot R_{оп}};$$

$$\underline{G} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{cp}}{R_{оп}}};$$

th – гиперболический тангенс;

m – число пролетов однородного участка ВЛ (до портала РУ или до участка ВЛ с другими параметрами троса);

$R_{оп}$ – среднее значение сопротивления опоры, [Ом];

\underline{Z}_{cp} – среднее значение сопротивления петли трос-земля на пролете, [Ом];

\underline{Z}_m – сопротивление, на которое замкнута однородная цепочка (например, сопротивление заземления РУ \underline{Z}_A или сопротивление участка с другими значениями \underline{Z}_{cp} и R_i), [Ом].

При больших значениях m , когда $th(m \cdot \underline{G}) = 1.0$ независимо от \underline{Z}_m входное сопротивление:

$$\underline{Z}_{BX.A(B)} = \underline{Z}_c. \quad (5.10)$$

Значения m , при которых это условие выполняется, определяется соотношением $m \geq 3 \cdot R_{оп} / \underline{Z}_c$.

Расчет $\underline{Z}_{BX.A(B)}$ по усредненным значениям сопротивлений троса \underline{Z}_{cp} на пролете и сопротивлений опор $R_{оп}$ с использованием приближенного расчетного выражения (5.8) на участках вблизи РУ может привести к заметным погрешностям. Как правило, расстояния между отдельными опорами могут значительно отличаться, что может приводить к нарушению монотонности изменения тока в ГТ и/или ОКГТ при перемещении точки КЗ вдоль ВЛ [4]. В частности, при удалении точки КЗ от РУ за счет резко

отличающихся сопротивлений троса Z_i на первых пролетах слева и справа от точки КЗ ток в ГТ и/или ОКГТ в сторону РУ может не снизиться, а возрасти. Поэтому, применительно к рассматриваемой ВЛ, прежде всего на участках вблизи РУ, ориентировочно на четырех пролетах, целесообразно задать индивидуальные расстояния между опорами и индивидуальные значения сопротивления опор. В этом случае входное сопротивление $Z_{вх.А}$ находится путем непосредственного сворачивания входящих в схему замещения – рисунок 5.4 сопротивлений относительно n -ой опоры.

При отсутствии данных об индивидуальных длинах пролетов и сопротивлениях опор, в расчетах могут использоваться усредненные значения.

5.8 Эквивалентное входное сопротивление ГТ (ОКГТ) смежных ВЛ $Z_{А.Э}$ формируется параллельно соединенными входными сопротивлениями грозозащитных тросов всех ВЛ, отходящих от общих с рассматриваемой ВЛ шин и имеющих заземленные ГТ (ОКГТ). Входное сопротивление ГТ или ОКГТ отдельной ВЛ рассчитывается по цепочечной схеме замещения рисунок 5.4.

Допустимо проводить расчет $Z_{А.Э}$ по упрощенным соотношениям, приняв схему – рисунок 5.4 однородной, а число пролетов стремящимся к бесконечности. Поэтому входное сопротивление ГТ или ОКГТ смежных ВЛ рассчитывается как входное сопротивление бесконечной однородной цепочки и определяется соотношением (5.9).

Для коротких смежных ВЛ, а также в случае существенной неоднородности цепочек рекомендуется для расчета $Z_{А.Э}$ воспользоваться рекомендациями 5.7.

5.9 Сопротивления заземления опор R_i носят активный характер. Сопротивления R_i зависят от типа грунта, в связи, с чем при наличии данных измерений сопротивлений контуров заземления опор, значения R_i следует принять в соответствии с измеренными величинами. В случае отсутствия подобных данных или при расчетах для вновь проектируемых ВЛ целесообразно их значения задавать с учетом конкретных условий прохождения ВЛ по местности.

С учетом, как правило, однотипных условий прохождения ВЛ по местности и отсутствии достоверных данных по заземлению отдельных опор допустимо принять для части ВЛ вдали от РУ сопротивления всех опор совпадающими. При этом индивидуальные отклонения сопротивлений опор не оказывают практического влияния на получаемые результаты. В случае, если ВЛ на различных участках проходит по грунту с существенно разной проводимостью, необходимо задать различные значения R_i на различных участках.

Не точный учет индивидуальных сопротивлений опор вблизи РУ может привести к заметной погрешности в расчете термической стойкости ГТ и/или

ОКГТ, в связи с чем, при наличии уточненных данных в схему – рисунок 5.4 должны быть введены конкретные значения сопротивлений. Достаточно указать индивидуальные сопротивления трех опор для концов ВЛ слева и справа вблизи РУ. При наличии сезонных колебаний сопротивлений опор, в случае заземления ГТ на РУ, используются максимальные значения сопротивлений, поскольку они приводят к максимальному току ГТ.

При отсутствии данных рекомендуется принять $R_{оп} = 10 \text{ Ом}$.

5.10 Сопротивления заземления РУ R_A носят активный характер. Их значения для РУ по обоим концам ВЛ должны быть получены из соответствующей технической документации. При наличии данных о сезонных колебаниях сопротивлений $R_{ру}$ используются минимальные значения. При отсутствии данных рекомендуется задать минимальное значение порядка 0,4 Ом.

5.11 Сопротивление петли трос-земля Z_T на пролете между опорами определяется числом и параметрами тросов в пролете, длиной пролета, а также сопротивлением R_3 растеканию тока в земле. Для частоты 50 Гц $R_3 = 0,05 \text{ Ом/км}$. Комплексное значение сопротивления ГТ и/или ОКГТ на пролете между опорами:

$$\underline{Z}_T = (R_3 + R_T + jX_T) \cdot L_{пр}, \quad (5.11)$$

где R_T – активная составляющая удельного сопротивления троса [Ом/км];

X_T – реактивная составляющая удельного сопротивления троса [Ом/км];

$L_{пр}$ – длина троса на пролете между опорами [км].

Длина троса на пролете между опорами по (5.10) может быть принята равной длине пролета без учета стрелы провеса, поскольку увеличение длины троса за счет провеса не оказывает практического влияния на получаемые результаты.

Расчет значений X_T и R_T проводится в следующей последовательности:

1) определяется эффективный диаметр ГТ или ОКГТ $d_{т.эф.}$ по соотношениям [5]:

а) для сталеалюминиевого и алюминиевого ГТ (ОКГТ):

$$d_{т.эф.} = 0.95 \cdot d_T, \quad (5.12, а)$$

б) для стального ГТ (ОКГТ):

$$d_{т.эф.} = \frac{d_T}{10^{X_{BH}^{0.145}}}, \quad (5.12, б)$$

где d_T – диаметр ГТ [м];

$X_{вн}$ – внутреннее индуктивное сопротивление троса [Ом/км].

Для стальных тросов значения $X_{вн}$ и R_T имеют нелинейную зависимость от тока в ГТ, который на этапе расчета Z_T еще не известен. Точный учет указанной зависимости может быть получен путем итераций. В области токов в ГТ превышающих более 200 А значения $X_{вн}$ и R_T изменяются относительно слабо. С учетом того, что нарушение термической стойкости ГТ может возникать при токах больше 200 А допустимо приближенно задать значения $X_{вн}$ и R_T , соответствующие большим токам порядка 200 А без последующего итерационного уточнения сопротивлений.

2) определяется эквивалентный диаметр ГТ $d_{Т.ЭКВ}$. Эквивалентный диаметр одиночного ГТ (ОКГТ) равен его эффективному диаметру, а при наличии двух ГТ (ОКГТ) определяется соотношением:

$$d_{Т.ЭКВ} = \sqrt{d_{Т.ЭФ} \cdot a}, \quad (5.13)$$

где a – расстояние между тросами, [м].

При наличии на ВЛ двух тросов с различными параметрами расчет по выражению (5.12) ведется по параметрам троса с наименьшим сопротивлением (наибольшее значение $d_{Т.ЭФ}$). Получаемая при этом погрешность, обусловленная различными параметрами троса, приводит к некоторому завышению тока в тросах, что создает запас термической стойкости троса.

3) определяется значение X_T по соотношению [5]:

$$X_T = 0.145 \cdot \left[\lg \left(\frac{2 \cdot D_3}{d_{Т.ЭКВ}} \right) \right], \quad (5.14)$$

где D_3 – эквивалентная глубина обратного тока земли, [м].

4) для ВЛ с двумя тросами значение R_T рассчитывается как для параллельного соединения тросов. В частном случае двух одинаковых тросов значение R_T уменьшается в два раза.

Значения R_T , d_T и $X_{вн}$ – каталожные параметры троса. Глубина обратного тока земли D_3 определяется типом грунта. Характерные значения D_3 для разных типов грунта:

- а) сухая земля $D_3 = 3000$ [м];
- б) влажная земля $D_3 = 900$ [м];
- в) морская вода $D_3 = 100$ [м].

При отсутствии данных целесообразно принять $D_3 = 1000$ м.

5.12 Сопротивление взаимной индукции фаза-трос определяется по выражению [3]:

$$X_{\phi T} = 0.145 \cdot \left[\lg \left(\frac{D_3}{D_{\phi T}} \right) \right], \quad (5.15)$$

где $D_{\phi T}$ – среднегеометрическое расстояние между фазными проводами и ГТ (ОКГТ), [м];

D_3 – глубина обратного тока земли, [м].

Входящее в (5.14) значение $D_{\phi T}$ определяется по соотношениям:

1) для ВЛ с одним ГТ или ОКГТ:

$$D_{\phi T} = \sqrt[3]{D_{A-T} \cdot D_{B-T} \cdot D_{C-T}}, \quad (5.16.a)$$

где D_{A-T} , D_{B-T} , D_{C-T} – расстояние между каждым из фазных проводов и ГТ или ОКГТ, [м].

2) для ВЛ с двумя ГТ или ОКГТ:

$$D_{\phi T} = \sqrt[6]{D_{A-T1} \cdot D_{B-T1} \cdot D_{C-T1} \cdot D_{A-T2} \cdot D_{B-T2} \cdot D_{C-T2}}, \quad (5.16.b)$$

где D_{A-T1} , D_{B-T1} , D_{C-T1} , D_{A-T2} , D_{B-T2} , D_{C-T2} – расстояния между каждым из фазных проводов и первым и вторым ГТ или ОКГТ соответственно, [м].

5.13 Для ВЛ с двумя тросами полученные по (5.1) суммарные значения токов I_{T1} и I_{T2} распределяются между двумя параллельно соединенными ГТ и/или ОКГТ в соответствии с их входными сопротивлениями.

6 Расчетные условия для оценки термического воздействия и термической устойчивости ГТ и/или ОКГТ

6.1 При расчетах термической устойчивости (выражение 4.1, а; п. 4.3) допустимо не учитывать рассеивание выделяемого в ГТ и/или ОКГТ тепла на интервалах времени от момента возникновения КЗ до его полного отключения устройствами релейной защиты (РЗ), поскольку такие интервалы, как правило, незначительны.

6.2 Термическое воздействие зависит от уровня тока в ГТ и/или ОКГТ и времени его прохождения с учетом дополнительного термического воздействия токов при неуспешных действиях автоматического повторного включения (АПВ), которые должны быть определены с учетом действия РЗА ВЛ [6].

6.3 Продолжительность $t_{откл}$ цикла прохождения тока в ГТ и/или ОКГТ:

$$t_{откл} = t_{уст.} + t_{выкл.} + t_{с.з.}, \quad (6.1)$$

где $t_{уст.}$ – время формирования сигнала на отключение выключателя, заданное в виде уставок по времени срабатывания устройств РЗ;

$t_{выкл.}$ – время отключения КЗ выключателем;

$t_{с.з.}$ – собственное время срабатывания РЗ.

Значения $t_{выкл.}$ и $t_{с.з.}$ задаются по данным технической документации на выключатели и устройства РЗ. В состав $t_{уст.}$ входит время уставки срабатывания РЗ, а также ряд рассмотренных ниже (п. 6.7) составляющих. При наличии данных о перспективном развитии прилегающей к проектируемой ВЛ электрической сети, в случае возможного изменения выдержек времени срабатывания защит в сторону увеличения, в выражении (6.1) необходимо использовать увеличенные значения уставок.

6.4 Количество циклов прохождения тока в ГТ и/или ОКГТ зависит от наличия устройства АПВ на ВЛ и его кратности. При отсутствии АПВ имеется один цикл прохождения тока. При наличии АПВ появляются дополнительные циклы, количество которых определяется кратностью АПВ, а расчетным режимом при оценке максимального термического воздействия тока является неуспешное включение ВЛ на устойчивое КЗ при действии АПВ.

6.5 При наличии двухстороннего питания в дополнительных циклах ВЛ вначале включается с одного из концов и только при успешном АПВ линия замыкается в транзит. Поскольку в процессе эксплуатации заданный конец ВЛ, включаемый при АПВ первым, может изменяться, то следует рассматривать два варианта начального включения ВЛ в процессе АПВ: с одного или другого конца.

6.6 Время срабатывания РЗ, входящее в $t_{уст.}$, для каждого из концов ВЛ определяется исходя из уставки времени срабатывания первой сработавшей при КЗ защиты. Как правило, на ВЛ устанавливаются быстродействующая защита с абсолютной селективностью и ступенчатая защита с относительной селективностью (токовая защита нулевой последовательности или дистанционная защита от КЗ на землю).

Для обоих полукомплектов защиты с абсолютной селективностью время срабатывания $t_{уст.}$ принимается равным уставке срабатывания (обычно $t_{уст.} = 0$) для КЗ в любой точке в пределах ВЛ.

Для определения $t_{уст.}$ защит с относительной селективностью должна быть снята характеристика времени срабатывания защиты в зависимости от положения точки КЗ на ВЛ. Применительно к ВЛ с двухсторонним питанием такая характеристика снимается для обоих комплектов РЗ, установленных на

противоположных концах ВЛ. В результате расчетов должны быть определены границы зон срабатывания отдельных ступеней защиты.

Для каждой точки КЗ характеристика снимается в следующей последовательности:

1) в исходной схеме включения ВЛ (включение с обоих концов) рассчитываются электрические величины, поступающие на входы комплектов РЗ, установленных на противоположных концах ВЛ, и определяется комплект и ступень в его составе, сработавшие первыми;

2) отключаются выключатели, на которые подается выходной сигнал от первой сработавшей защиты;

3) во вновь возникшей схеме подключения ВЛ проводится повторный расчет электрических величин для оставшейся защиты и определяется сработавшая с меньшим временем ступень.

6.7 Значения токов в ГТ и/или ОКГТ, а также зоны срабатывания отдельных ступеней могут изменяться при изменении режима работы сети, прилегающей к рассматриваемой ВЛ. Необходим поиск расчетного режима сети, определяющего максимальное термическое воздействие на ГТ и/или ОКГТ. С учетом большого объема расчетов, необходимых, прежде всего, для поиска границ зон срабатывания отдельных ступеней, рекомендуется определить зоны для «базового», наиболее вероятного режима работы прилегающей сети. Уточнение зон срабатывания в иных режимах, целесообразно проводить при существенном (порядка 10 % и более) изменении контролируемых защитой электрических величин.

6.8 Используемое в выражении (6.1) время $t_{уст.}$ должно быть определено для наихудшего случая, при котором $t_{уст.}$ принимает максимальное значение. При этом рассматриваются последовательности событий, связанных с отказами участвующих в отключении КЗ устройств и приводящих к увеличению времени отключения КЗ и росту числа циклов прохождения тока КЗ. В числе таких событий:

1) при наличии на ВЛ двух основных защит с абсолютной селективностью – успешное срабатывание по крайней мере одной из основных защит. Одновременный отказ двух защит допустимо не учитывать;

2) при наличии на ВЛ основной защиты с абсолютной селективностью и резервной защиты с относительной селективностью отказ (временный вывод из действия) основной защиты с абсолютной селективностью. Короткие замыкания с обоих концов ВЛ отключаются резервными защитами;

3) при наличии на ВЛ только одной защиты ее отказ и отключение КЗ защитами смежных элементов (далее резервирование);

4) отказ выключателя с последующим действием УРОВ при его наличии;

Рекомендуемые расчетные режимы для наиболее распространенного случая установки на ВЛ отечественных аналоговых основной защиты с абсолютной селективностью и резервной защиты с относительной селективностью, а также АПВ и УРОВ на обоих концах:

1) *Первый вариант (с учетом действия УРОВ):*

а) отказ (вывод из действия) основной защиты и успешное срабатывание резервных защит с обоих концов ВЛ (со стороны подстанций А и В);

б) успешное действие выключателя и отключение ВЛ со стороны подстанции А(В) и отказ выключателя с противоположного конца – со стороны подстанции В(А);

в) успешное действие УРОВ на подстанции с отказавшим выключателем В(А);

г) отключение КЗ от УРОВ.

2) *Второй вариант (с учетом неуспешного АПВ):*

а) отказ (вывод из действия) основной защиты и успешное срабатывание резервных защит с обоих концов ВЛ (со стороны подстанций А и В);

б) успешное действие выключателей и отключение ВЛ со стороны подстанций А и В;

в) включение ВЛ со стороны подстанции А(В) от АПВ на устойчивое КЗ;

г) окончательное отключение КЗ действием резервной защиты и выключателя подстанции А (В).

3) *Третий вариант (с учетом неуспешного АПВ и действия УРОВ):*

а) отказ (вывод из действия) основной защиты и успешное срабатывание резервных защит с обоих концов ВЛ (со стороны подстанций А и В);

б) успешное действие выключателей и отключение ВЛ со стороны подстанций А и В;

в) включение ВЛ со стороны подстанции А(В) от АПВ на устойчивое КЗ;

г) успешное срабатывание резервной защиты и отказ выключателя со стороны подстанции А(В);

д) успешное действие УРОВ на подстанции с отказавшим выключателем А(В).

В данных последовательностях время отключения КЗ определяется по следующим соотношениям:

Первый вариант (с учетом действия УРОВ):

1) отключение ВЛ с одного из концов защитой с относительной селективностью. Для выбора отключаемого конца ВЛ для защит, установленных на противоположных концах, определяется наиболее быстродействующая ступень, в зоне действия которой расположено КЗ. Из двух защит, установленных на противоположных концах ВЛ сработавшей принимается та, которая обеспечивает наименьшее время отключения с учетом выдержки времени ступени, в зоне действия которой находится точка КЗ. Время отключения выбранного конца ВЛ:

$$t_1 = t_{pз1} + t_{откл.выкл.1}, \quad (6.2)$$

При учете отказа выключателя добавляется время действия УРОВ:

$$t_1 = t_{pз1} + t_{уров} + t_{откл.кз.уров1}, \quad (6.3)$$

где $t_{pз1}$ – время уставки срабатывания сработавшей ступени первой защиты;

$t_{откл.выкл.1}$ – время отключения выключателя со стороны выбранного конца ВЛ;

$t_{уров}$ – время действия УРОВ;

$t_{откл.кз.уров1}$ – время отключения КЗ от УРОВ выбранного конца ВЛ.

В указанном режиме ВЛ подключена к сети обоими концами.

2) отключение ВЛ с противоположного конца с временем:

$$t_2 = t_{pз2} + t_{откл.выкл.2}, \quad (6.4)$$

При учете отказа выключателя добавляется время действия УРОВ:

$$t_2 = t_{pз2} + t_{уров} + t_{откл.кз.уров2}, \quad (6.5)$$

где $t_{pз2}$ – время уставки срабатывания сработавшей ступени второй защиты;

$t_{откл.выкл.2}$ – время отключения выключателя с противоположного конца ВЛ;

$t_{откл.кз.уров2}$ – время отключения КЗ от УРОВ на противоположном конце ВЛ.

На интервале $(t_2 - t_1)$ линия подключена к сети одним концом.

Второй вариант (с учетом неуспешного АПВ):

1) отключение ВЛ защитой того конца, где произошло неуспешное АПВ после успешного отключения ВЛ с обоих концов. Время отключения ВЛ с обоих концов определяется согласно выражениям (6.2) и (6.4). Аналогично предыдущему, время отключения КЗ после неуспешного АПВ будет определяться временем срабатывания той ступени защиты, в зоне действия которой расположена точка КЗ:

$$t_3 = t_{pz} + t_{откл.выкл.1(2)}, \quad (6.6)$$

где t_{pz} – время уставки и собственное время срабатывания сработавшей ступени защиты конца ВЛ, со стороны которого проведено АПВ.

$t_{откл.выкл.1(2)}$ – время отключения выключателя с того конца ВЛ, где проводится АПВ.

При расчете указанного времени t_{pz} следует обратить внимание на то, что в режиме АПВ некоторые ступени могут иметь ускорение, то есть, для них выдержка времени t_{pz} соответствует времени в режиме ускорения.

В указанном режиме ВЛ подключена к сети одним концом, со стороны которого проводится АПВ.

Третий вариант (с учетом неуспешного АПВ и действия УРОВ):

1) отключение ВЛ после отказа выключателя и действия УРОВ на том же конце ВЛ, где произошло неуспешное АПВ после успешного отключения ВЛ с обоих концов. Время отключения ВЛ с обоих концов определяется согласно выражениям (6.2) и (6.4). Время отключения КЗ после неуспешного АПВ с последующим успешным срабатыванием резервной защиты, отказом выключателя и действием УРОВ будет определяться временем срабатывания той ступени защиты, в зоне действия которой расположена точка КЗ:

$$t_4 = t_{pz} + t_{уров} + t_{откл.кз.уров 1(2)}, \quad (6.7.)$$

где t_{pz} – время уставки и собственное время срабатывания сработавшей ступени защиты конца ВЛ, со стороны которого проведено АПВ.

$t_{откл.кз.уров 1(2)}$ – время отключения КЗ от УРОВ с того конца ВЛ, где проводится АПВ.

При расчете указанного времени t_{pz} следует обратить внимание на то, что в режиме АПВ некоторые ступени могут иметь ускорение, т.е. для них выдержка времени t_{pz} соответствует времени в режиме ускорения.

В указанном режиме ВЛ подключена к сети одним концом, со стороны которого проводится АПВ.

7 Последовательность расчета термического воздействия и термической устойчивости ГТ и/или ОКГТ

7.1 Уровни токов КЗ и зоны действия отдельных ступеней защит с относительной селективностью могут изменяться в зависимости от режима работы сети. В частности, могут изменяться:

- 1) режимы работы эквивалентных питающих систем;
- 2) количество и состав включенных (отключенных) элементов;
- 3) положение РПН трансформаторов.

На первом этапе расчетов должен быть выявлен режим работы сети, приводящий к максимальному термическому воздействию тока на ГТ и/или ОКГТ, что, как правило, требует перебора ряда вариантов режимов сети.

7.2 При выборе режима работы сети достаточно рассмотреть только часть сети непосредственно прилегающую к ВЛ с рассчитываемым ГТ и/или ОКГТ, элементы которой оказывают значимое влияние на уровень токов КЗ. Как правило, достаточно ограничиться элементами непосредственно примыкающими к концам ВЛ и смежными с ними элементами (элементы в пределах двух поясов от концов ВЛ). Для электрических сетей с большим числом перекрестных связей между элементами, а также при малых значениях сопротивлений смежных элементов число поясов может быть значительным. Остальная часть сети представляется эквивалентами: эквивалентные питающие системы, эквивалентные сопротивления, эквивалентные трансформаторные связи. Значения эквивалентов можно получить из программ, используемых в энергосистемах, например, по программе ТКЗ - 3000.

7.3 По рекомендациям п. 5 проводится расчет токов в ГТ и/или ОКГТ и снимается зависимость тока при перемещении точки КЗ по расчетным точкам вдоль ВЛ (п. 4.7). Расчеты проводятся как для однофазных, так и двухфазных КЗ на землю в режимах работы сети, определенных в 7.1. Наличие меньших значений токов в ГТ не является достаточным основанием для принятия решения о меньшем термическом воздействии, т.к. время отключения КЗ релейной защитой может быть заметно больше.

Характерный вид зависимостей уровней токов в ГТ и/или ОКГТ от положения точки КЗ приведен в Приложении А.

Допускается проведение расчетов токов в ГТ и/или ОКГТ по уже известным значениям суммарных токов КЗ I_K в заданных расчетных точках, а также значениям токов в ВЛ в обе стороны от точки КЗ. Значения токов КЗ I_K должны соответствовать режиму работы сети согласно 7.1 и рассчитаны как для однофазных, так и для двухфазных КЗ на землю (п. 4.6), а так же с учетом рекомендаций 6.8. В расчетах суммарных токов КЗ I_K должны быть учтены смежные ВЛ, имеющие взаимоиндукцию с рассчитываемой. При расчете суммарных токов КЗ I_K в расчетных точках должны быть учтены параметры ВЛ с подвеской именно того ГТ и/или ОКГТ для которых проводится дальнейший расчет. В случае если при расчете суммарных токов I_K использованы параметры ВЛ без учета параметров ГТ и/или ОКГТ для которых проводится расчет, то в результаты расчетов будет внесена дополнительная погрешность, которая может быть значительной и привести к неправильным результатам. Наибольшая ошибка в результатах может быть получена при использовании значений суммарных токов КЗ, рассчитанных для ВЛ с одним стальным ГТ, при расчете термической устойчивости при замене стального ГТ на сталеалюминевый ГТ и/или ОКГТ.

7.4 По рекомендациям 6.8 определяется последовательность событий, связанных с возможными отказами защит, выключателей и неуспешным действием АПВ, приводящих к увеличению времени прохождения тока в ГТ, а также увеличению циклов прохождения тока.

7.5 По рекомендациям п. 6.6 снимаются характеристики времени отключения тока КЗ всеми защитами, участвующими в полном отключении точки КЗ от сети. Для ВЛ с двухсторонним питанием снимаются характеристики двух защит с противоположных концов ВЛ. В случае, когда расчетный режим предусматривает отключение точки КЗ защитами смежных элементов в варианте с дальним резервированием, таких характеристик может быть значительное количество.

Если расчетный режим включает несколько циклов, обусловленных повторным воздействием тока при неуспешных АПВ, то характеристики 7.3 и 7.4 снимаются для каждого цикла.

Наличие меньших времен отключения КЗ релейной защитой не является достаточным основанием для принятия решения о меньшем термическом воздействии, т.к. значения токов в ГТ и/или ОКГТ могут оказаться значительными, что приведет к большим значениям интеграла Джоуля.

Характерный вид временных характеристик от положения точки КЗ приведен в Приложении А.

7.6 По выражению (4.1, б) определяется термическое воздействие тока в каждом цикле КЗ. Полное термическое воздействие тока определяется как сумма воздействий каждого цикла.

7.7 Выявляются участки ВЛ, на которых термическая устойчивость ГТ и/или ОКГТ нарушена: значение термической стойкости гарантируемое производителем или поставщиком ГТ или ОКГТ меньше чем рассчитанное.

Для выявленных участков рассматриваются меры повышения термической устойчивости, например, замена типа ГТ или ОКГТ, а расчеты повторяются с новыми исходными данными. В некоторых случаях, особенно при расчетах ОКГТ, в том числе с различным сечением троса на разных участках ВЛ, могут потребоваться многократные повторные расчеты, т. е. расчет ведется итерациями.

При разработке мер повышения термической устойчивости, прежде всего применительно к ОКГТ, целесообразно исходить из соотношения дополнительных затрат на повышение термической устойчивости и ущерба при нарушении термической устойчивости, в том числе и ущерб от нарушения канала связи. При этом, следует учитывать вероятность возникновения режима работы сети, а также цепочки отказов защит, выключателей и неуспешных АПВ, при которых нарушена термическая устойчивость.

8 Исходные данные необходимые для расчета термического воздействия и термической устойчивости ГТ и/или ОКГТ

8.1 Необходимый набор исходных данных формируется в зависимости от применяемого для расчетов программного обеспечения. В данном разделе перечисляются исходные данные, наличие которых необходимо для расчетов по приведенной методике. Приводимый объем исходных данных так же является необходимым и достаточным условием для проведения расчетов с использованием программного обеспечения, которое было применено для расчета примеров, приведенных в Приложении А. В случае проведения расчетов по другим программам, обладающими более широкими возможностями, перечень данных может быть изменен и расширен.

8.2 Исходные данные, которые требуются для проведения расчетов термической устойчивости или термического воздействия на ГТ и/или ОКГТ, должны быть основаны на данных эксплуатации, паспортных и проектных данных по ВЛ и данных по работе устройств РЗА. Для вновь строящихся объектов используются только проектные данные.

8.3 Если расчет токов в ГТ и/или ОКГТ проводится по исходным схемам сети (пункты 7.1-7.3), то для создания расчетной схемы и предварительных расчетов суммарных однофазных и двухфазных токов КЗ на землю в расчетных точках (п. 4.7) необходимы:

1) данные по рассчитываемой ВЛ. Перечень данных приведен в Таблице 8.1;

2) данные по каждой из ВЛ сближающей с рассчитываемой ВЛ на отдельных участках или по всей длине. Перечень данных приведен в Таблице 8.2;

3) расчет эквивалентов (например по программе ТКЗ-3000) по отношению к шинам подстанций А и В с учетом ВЛ сближающихся с рассчитываемой ВЛ, в соответствии с Таблицей 8.3;

4) суммарные значения токов при однофазном КЗ на землю К(1), трехфазном КЗ К(3) на шинах ПС, значения токов текущих в ВЛ при К(1), К(3) на шинах ПС, в соответствии с Таблицей 8.3.

На рисунке 8.1 в качестве примера приведена схема прохождения рассчитываемой ВЛ ПС А – ПС В на всем протяжении вблизи с ВЛ ПС С – ПС F , а так же на участке D-E (H-I) сближается с ВЛ ПС G – ПС J. В Таблице 8.1 приведены необходимые данные по участкам сближения в соответствии с рисунком 8.1. Аналогичные данные потребуются и в случае более сложных схем прохождения ВЛ вблизи.

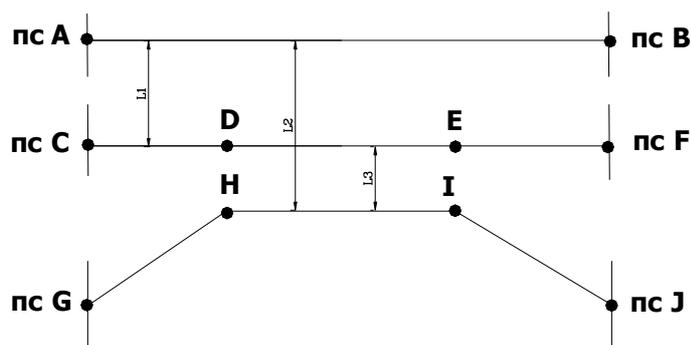


Рисунок 8.1 - Пример схемы прохождения рассчитываемой ВЛ ПС А – ПС В вблизи с другими ВЛ: ПС С – ПС F, ПС G – ПС J.

Помимо данных, перечисленных в Таблице 8.1, рекомендуется использовать данные по индивидуальным длинам пролетов между опорами (п. 5.8) и реальным (измеренным) сопротивлением опор вблизи ПС (п. 5.4).

Расчетная схема, полученная на основе данных по исходной сети, должна соответствовать по уровню токов КЗ исходной схеме сети, для чего после создания схемы рекомендуется проводить проверку.

Проверка проводится следующим образом:

- 1) по расчетной схеме при однофазных КЗ на землю и трехфазных КЗ на шинах ПС рассчитываются суммарные токи на шинах и токи текущие в ВЛ;
- 2) полученные расчетные значения сравниваются с известными данными, перечисленными в пунктах 1-4 Таблицы 8.3. Подобные данные могут быть получены по программе ТКЗ-3000 или аналогичной;
- 3) различие между расчетными и известными данными должно быть менее 6-7 %.

Дальнейший расчет термического воздействия токов КЗ на ГТ и/или ОКГТ проводится по полученной расчетной схеме с учетом данных по устройствам РЗА, установленных на ПС. Перечень необходимых данных приведен в Таблице 8.4.

8.4 В качестве исходных данных также могут быть использованы суммарные значения токов КЗ в расчетных точках (п. 4.7) в соответствии с условиями, приведенными в 4.3, при однофазных и двухфазных КЗ на землю.

8.5 Если расчет токов в ГТ и/или ОКГТ (п. 5) проводится по известным токам в расчетных точках (п. 8.4), то для проведения расчета термического воздействия токов КЗ на ГТ и/или ОКГТ достаточно данных Таблицы 8.4.

Таблица 8.1 Данные по рассчитываемой ВЛ

ВЛ ПС А – ПС В			
Напряжение, кВ		Среднее значение сопротивления контура заземления опор, Ом	
Длина, км		Расстояние между проводами в фазе, мм	
Количество проводов в фазе		Длина пролета, м	
Пролет от первой опоры до РУ	ПС А	Количество тросов	
		Марка троса	
		Длина пролета, м	
	ПС В	Количество тросов	
		Марка троса	
		Длина пролета, м	
Подход к ПС А			
Длина подхода к ПС А, на котором ГТ заземлен на каждой опоре ¹ , км		Тип опоры	Количество тросов
			Марка троса
			Марка фазного провода
Подход к ПС В			
Длина подхода к ПС В, на котором ГТ заземлен на каждой опоре ¹ , км		Тип опоры	Количество тросов
			Марка троса
			Марка фазного провода
Основная часть ВЛ ПС А – ПС В			
Тип опоры			
Количество тросов			
Марка троса			
Марка фазного провода			
Прохождение ВЛ ПС А – ПС В вблизи других ВЛ (рисунок 8.1)			
Расстояние до соседних ВЛ на участке сближения, м	L1		
	L2		
	L3		
Данные по участкам сближения	Длины участков ВЛ ПС G – ПС J, ПС С – ПС F до начала участка сближения: участок С-D, участок G-H. Длина участка сближения: участок D-E(H-I). Длина участка I-J.		
Примечание. ¹ Если на основной части ВЛ заземление ГТ организовано по Г-образной схеме.			

Таблица 8.2 Данные по ВЛ, проходящей с рассчитываемой на участке сближения

Название ВЛ (ПС 1 – ПС 2)			
Напряжение, кВ			
Длина, км			
Количество проводов в фазе			
Расстояние между проводами в фазе, мм			
Подход к ПС 1		Подход к ПС 2	
Количество тросов		Количество тросов	
Марка троса		Марка троса	
Марка фазного провода		Марка фазного провода	
Основная часть ВЛ ПС 1 – ПС 2			
Тип опоры			
Количество тросов			
Марка троса			
Марка фазного провода			

Таблица 8.3 Данные для составления и проверки расчетной схемы

№	Данные для составления и проверки расчетной схемы
1.	Суммарное значение тока на шинах ПС А(В) при трехфазном КЗ
2.	Суммарное значение тока на шинах ПС А(В) при однофазном КЗ на землю
3.	Ток текущий в ВЛ при трехфазном КЗ на шинах ПС А(В)
4.	Ток текущий в ВЛ при однофазном КЗ на землю на шинах ПС А(В)
5.	Расчет эквивалентов (например по программе ТКЗ-3000) по отношению к шинам подстанций А и В с учетом ВЛ сближающихся с рассчитываемой ВЛ.

Таблица 8.4 Расчетные данные и данные по устройствам РЗА

№	Расчетные данные и данные по устройствам РЗА на ПС А(В)		
1.	Время срабатывания основной защиты с абсолютной селективностью	t, с	
2.	Уставки срабатывания резервной защиты с относительной селективностью (ТЗНП ¹), с указанием ускоряемой ступени и времени срабатывания при ускорении.	I ступень	t, с
		II ступень	t, с
		III ступень	t, с
		IV ступень	t, с
3.	Времена срабатывания и характеристики срабатывания реле дистанционной защиты от КЗ на землю для каждой ступени.		
4.	Тип АПВ, кратность АПВ		
5.	Время срабатывания УРОВ	t, с	
6.	Полное время отключения выключателей с учетом времени гашения дуги.	t, с	
7.	Утроенный ток нулевой последовательности во всех расчетных точках КЗ	I _к , кА	
8.	Утроенный ток нулевой последовательности i – ой смежной опоры.	I _{0, смежн. 1} , кА	
9.	Глубина протекания обратного тока земли	м	
10.	Сопrotивление заземления РУ ПС А/ПС В	Ом	
11.	Поопорная ведомость		
12.	Сопrotивление заземления первых трех опор у ПС А/ПС В	Ом	
Примечание. ¹ ТЗНП – токовая защита нулевой последовательности.			

9 Правила по формированию требования по термической стойкости ГТ и/или ОКГТ на основании расчетов термического воздействия тока КЗ

9.1 Для выбора типа ГТ и/или ОКГТ устойчивого к токам КЗ перед проектированием их подвески при реконструкции действующих ВЛ, при проектировании вновь сооружаемых ВЛ и создании ВОЛС-ВЛ необходимо сформировать требование по их термической стойкости. Для этого необходимо определить термическое воздействие тока КЗ на ГТ и/или ОКГТ. Расчет термического воздействия тока КЗ следует проводить в соответствии с разделами 5-7 настоящих Методических указаний.

9.2 Для расчета термического воздействия тока КЗ необходимо задать параметры ГТ и/или ОКГТ. Параметры ГТ и/или ОКГТ выбираются в зависимости от уровня термического воздействия тока КЗ, рекомендуемые параметры представлены в Таблице 9.1. Подбор параметров ГТ и/или ОКГТ с соответствующей термической стойкостью предполагает серию расчетов по термическому воздействию тока КЗ.

Таблица 9.1 Рекомендуемые параметры ГТ и/или ОКГТ

Термическая стойкость (В), кА ² с	Активное сопротивление постоянному току при 20 °С, Ом/км	Внешний диаметр, мм
<i>Стальной трос ТК-50 [1]</i>		
13	2,86	9,1
<i>Стальной трос ТК-70 [1]</i>		
28	1,92	11
<i>Сталеалюминевые ГТ и ОКГТ</i>		
до 50	0,6	13
55-70	0,5	13
80-120	0,4	14
130-160	0,35	16
170-190	0,3	17
200-290	0,25	18
300-500	0,2	19
более 550	0,15	22

9.3 В случае реконструкции действующей ВЛ с заменой ГТ проводятся расчеты по термическому воздействию токов КЗ на ГТ запроектированный и подвешенный на данной ВЛ с учетом перспективы развития энергосистемы и в соответствии с разделами 5-7 настоящих Методических указаний. Если ГТ подвешенный на рассчитываемой ВЛ термически устойчив, уровень термического воздействия токов КЗ не более его термической стойкости гарантированной производителем, то термическая стойкость вновь подвешиваемого ГТ должна быть не ниже заменяемого ГТ. Если в процессе реконструкции предполагается замена ГТ на ОКГТ, или в результате расчетов старый ГТ оказался термически неустойчив по всей длине ВЛ или на отдельных ее участках, то необходимо произвести перерасчет термического воздействия на ГТ или ОКГТ с новыми параметрами. Методом итерации подобрать параметры ГТ и/или ОКГТ с соответствующей термической стойкостью к термическому воздействию токов КЗ.

9.4 Для вновь сооружаемых ВЛ расчеты по термическому воздействию тока КЗ проводятся для ГТ и/или ОКГТ с параметрами, выбранными из Таблицы 9.1 и методом последующей итерации подбираются параметры ГТ и/или ОКГТ с соответствующей термической стойкостью к термическому воздействию токов КЗ.

9.5 Для формирования требований по термической стойкости к ГТ и/или ОКГТ необходимо задать начальную и конечную (максимально допустимую) температуру нагрева. Как правило, начальная температура ГТ задается в соответствии с рекомендациями ГОСТ Р 52736 и [1] равной 25 °С. В отдельных случаях, например, вследствие нагрева ГТ или ОКГТ из-за несимметрии нагрузочного режима, или при их эксплуатации в климатической зоне с повышенной температурой воздуха, это значение может быть увеличено. Конечная (максимально допустимая) температура ГТ или ОКГТ

определяется изготовителем и должна быть не выше: 400 °С – для стальных проводников (ГТ), 200 °С – для сталеалюминевых проводников (ГТ или ОКГТ).

9.6 На основании проведенных расчетов по термическому воздействию тока КЗ формируются требования к ГТ или ОКГТ в одном из следующих вариантов:

Вариант I.

ГТ или ОКГТ должен быть стоек

при начальной температуре – 25 °С

к термическому воздействию тока КЗ, при сопротивлении постоянному току при 20 °С - (например – 0,6) Ом/км, - не менее (например - 45) кА²с.

Вариант II.

ГТ или ОКГТ должен быть стоек

при начальной температуре – 25 °С

к току КЗ в течение 1 с, при сопротивлении постоянному току при 20 °С - (например – 0,6) Ом/км, - не менее (например- 6,7) кА.

9.7 Указанное значение сопротивления постоянному току является справочной величиной, не обязательной для поставщика ГТ или ОКГТ. Эта величина показывает условие, для которого проведены расчеты термического воздействия тока КЗ. Поставщик (изготовитель) ГТ или ОКГТ должен учитывать, что если предлагаемое к поставке изделие имеет меньшее сопротивление, то его термическая стойкость должна быть выше, чем указанная величина в требовании по термической стойкости.

10 Проверка запланированных к подвеске на ВЛ ГТ и/или ОКГТ на соответствие их термической стойкости к термическому воздействию токов КЗ

10.1 При проектировании подвески ГТ и/или ОКГТ на вновь сооружаемых ВЛ, а также при реконструкции действующих ВЛ должна проводиться проверка выбранного к подвеске типа ГТ и/или ОКГТ на соответствие их термической стойкости, гарантированной производителем, термическому воздействию токов КЗ, возникающих при несимметричных режимах работы данной ВЛ, в соответствии с 2.5.82, 2.5.192 и 2.5.196 [6] и настоящими Методическими указаниями.

10.2 Допускается не проводить проверку ГТ и/или ОКГТ для ВЛ с одним типом ГТ(ОКГТ) если при формировании технических требований были проведены расчеты по термическому воздействию токов КЗ в соответствии с настоящими Методическими указаниями и выбранный тип ГТ

и/или ОКГТ имеет сопротивление постоянному току при 20 °С ($R_{уд}$) равное или меньшее расчетной величины, на основе которой были проведены расчеты по термическому воздействию тока КЗ, а значение его термической стойкости, гарантированное производителем, равно или больше требуемого.

10.3 В случае если на ВЛ в соответствии с техническими требованиями запланированы к подвеске ГТ или ОКГТ двух типов и более и предварительно проведены расчеты по термическому воздействию токов КЗ в соответствии с настоящими Методическими указаниями, то при проектировании их подвески должна быть проведена проверка если удельное сопротивление постоянному току при 20 °С ($R_{уд}$) хотя бы одного из ГТ (ОКГТ) больше расчетной величины, на основе которой были проведены расчеты по термическому воздействию тока КЗ.

10.4 Если были проведены предварительные расчеты по термическому воздействию тока КЗ в соответствии с настоящими Методическими указаниями, то проверка должна быть проведена по тем же расчетным схемам. Расчеты проводятся в расчетных точках, где термическое воздействие тока КЗ максимально. Полученное новое значение термического воздействия тока КЗ не должно превышать гарантированную производителем термическую стойкость выбранного для подвески ГТ и/или ОКГТ.

10.5 Для ВЛ с двумя и более типами ГТ и/или ОКГТ при проведении проверки дополнительно должны быть уточнены (определены) длины участков для каждого типа ГТ(ОКГТ) и расчетные точки, в которых меняется тип и/или число ГТ (ОКГТ), а их термическая стойкость, гарантированная производителем, должна быть не менее термического воздействия тока КЗ на этих участках ВЛ.

10.6 Определение длин участков ВЛ с различными типами и/или числом ГТ (ОКГТ) и расчетных точек, где следует произвести смену типа ГТ (ОКГТ) проводится путем расчетов термического воздействия тока КЗ на ГТ (ОКГТ) справа и слева от расчетной точки и сравнения полученного значения с термической стойкостью гарантируемой производителем ГТ (ОКГТ).

10.7 Расчет следует начинать с той расчетной точки, по которой предварительно определялись длины участков. Если же предварительных расчетов не проводилось то начальная точка расчетов выбирается исходя из уровня термического воздействия на рассчитываемой ВЛ и термической стойкости ГТ (ОКГТ), гарантируемой производителем.

10.8 Если для выбранной расчетной точки термическое воздействие справа/слева не превышает термическую стойкость одного из ГТ (ОКГТ) и имеется некоторый запас по термической стойкости у ГТ (ОКГТ) с меньшим максимально допустимым значением по термической стойкости, то следует провести расчет для соседних расчетных точек в сторону увеличения суммарного тока КЗ, что возможно позволит сократить длину участка с более термостойким ГТ (ОКГТ).

10.9 Если для данной расчетной точки термическое воздействие справа/слева превышает термическую стойкость одного из ГТ (ОКГТ), то необходимо провести следующий расчет для соседней расчетной точки, где суммарный ток КЗ меньше по сравнению с первоначально рассчитанной точкой КЗ. Расчеты продолжаются до тех пор, пока не будет найдена расчетная точка, при КЗ в которой значения термического воздействия на ГТ (ОКГТ) справа/слева от расчетной точки не превышают термической стойкости гарантированной производителем ГТ (ОКГТ).

**Примеры расчетов термического воздействия токов КЗ на ГТ (ОКГТ),
выполненных с помощью специализированного
программного обеспечения**

Пример 1

Расчет термического воздействия токов КЗ на ГТ на ВЛ 110 кВ

Расчетная схема показана на рисунке А.1.

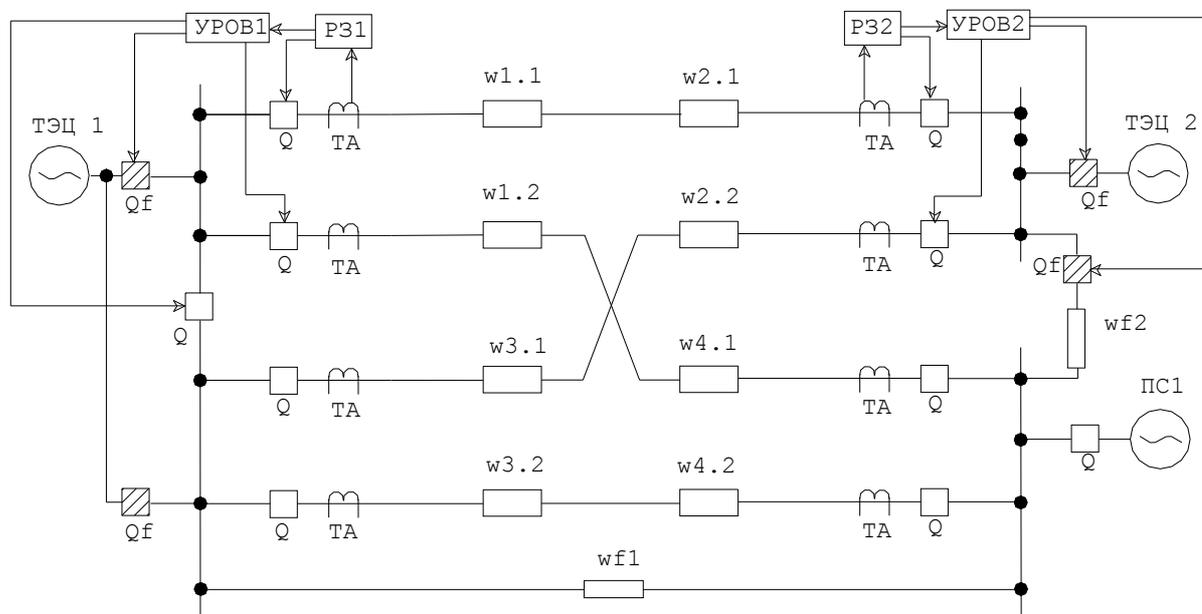


Рисунок А.1 Расчетная схема

На расчетной схеме QF – выключатели, имитирующие отключение питания ВЛ при действии УРОВ.

Данные по элементам схемы приведены в Таблицах А.1 – А.4.

Таблица А.1 Характеристики ВЛ, заданные подвеской

W 1 (двухцепная)			
Напряжение, кВ	110		
Длина, км	19,2		
Количество проводов в фазе	1	Расстояние между проводами в фазе, мм	-
Пролет от первой опоры до РУ	ТЭЦ 1	Длина пролета, м	50
		Количество тросов	2
		Марка троса	ТК-50
Основная часть ВЛ			
Тип опоры	ПБ-110-4		
Количество тросов	1		
Марка троса	ТК-50		
Марка фазного провода	АС-240/39		
Средняя длина пролета, м	186		
W 3 (двухцепная)			
Напряжение, кВ	110		
Длина, км	19,2		
Количество проводов в фазе	1	Расстояние между проводами в фазе, мм	-
Пролет от первой опоры до РУ	ТЭЦ 1	Длина пролета, м	50
		Количество тросов	2
		Марка троса	ТК-50
Основная часть ВЛ			
Тип опоры	ПБ-110-4		
Количество тросов	1		
Марка троса	ТК-50		
Марка фазного провода	АС-300/48		
Средняя длина пролета, м	186		
Прохождение ВЛ W1 и W2 на участке сближения			
Расстояние между ВЛ, м	70		
Длина участка, км	19,2		
W 2 (двухцепная)			
Напряжение, кВ	110		
Длина, км	18,2		
Количество проводов в фазе	1	Расстояние между проводами в фазе, мм	-
Пролет от первой опоры до РУ	ТЭЦ 2	Длина пролета, м	50
		Количество тросов	2
		Марка троса	ТК-50
Основная часть ВЛ			
Тип опоры	ПБ-110-4		
Количество тросов	1		
Марка троса	ТК-50		
Марка фазного провода	АС-240/39		
Средняя длина пролета, м	178		

Окончание Таблицы А1

W 4 (двухцепная)			
Напряжение, кВ	110		
Длина, км	10,2		
Количество проводов в фазе	1	Расстояние между проводами в фазе, мм	-
Пролет от первой опоры до РУ	ПС 1	Длина пролета, м	50
		Количество тросов	2
		Марка троса	ТК-50
Основная часть ВЛ			
Тип опоры	ПБ-110-4		
Количество тросов	1		
Марка троса	ТК-50		
Марка фазного провода	АС-240/39		
Средняя длина пролета, м	200		

Таблица А.2 Расчетные данные и данные по устройствам РЗА

РЗ 1 и РЗ 5			
Время срабатывания основной защиты с абсолютной селективностью	с	0,15	
Уставки срабатывания резервной защиты с относительной селективностью (ТЗНП), с указанием ускоряемой ступени и времени срабатывания при ускорении.	I ступень	0,1 с	3700 А
	II ступень	1,7 с	1400 А
	III ступень	3,8/0,1 с	800 А
	IV ступень	5,5 с	400 А
Тип АПВ, кратность АПВ	слепое/с синхронизмом		
	однократное		
Время срабатывания УРОВ	с	0,4	
Полное время отключения выключателей с учетом времени гашения дуги.	с	0,08	
РЗ 2 и РЗ 4			
Время срабатывания основной защиты с абсолютной селективностью	с	0,15	
Уставки срабатывания резервной защиты с относительной селективностью (ТЗНП), с указанием ускоряемой ступени и времени срабатывания при ускорении.	I ступень	0,1 с	3700 А
	II ступень	0,9 с	2120 А
	III ступень	2,5/0,1 с	1300 А
	IV ступень	6,9 с	270 А
Тип АПВ, кратность АПВ	слепое/с синхронизмом		
	однократное		
Время срабатывания УРОВ	с	0,4	
Полное время отключения выключателей с учетом времени гашения дуги.	с	0,08	
РЗ 3			
Время срабатывания основной защиты с абсолютной селективностью	с	0,15	
Уставки срабатывания резервной защиты с относительной селективностью (ТЗНП), с указанием ускоряемой ступени и времени срабатывания при ускорении .	I ступень	0,1 с	4300 А
	II ступень	0,9 с	2400 А
	III ступень	1,7/0,1 с	1020 А
	IV ступень	6,5 с	240 А
Тип АПВ, кратность АПВ	слепое/с синхронизмом		
	однократное		
Время срабатывания УРОВ	с	0,4	
Полное время отключения выключателей с учетом времени гашения дуги.	с	0,08	

Окончание Таблицы А2

РЗ 6			
Время срабатывания основной защиты с абсолютной селективностью	с	0,15	
Уставки срабатывания резервной защиты с относительной селективностью (ТЗНП), с указанием ускоряемой ступени и времени срабатывания при ускорении .	I ступень	0,1 с	4300 А
	II ступень	0,9 с	2000 А
	III ступень	2,5/0,1 с	700 А
	IV ступень	4,3 с	450 А
Тип АПВ, кратность АПВ	слепое/с синхронизмом		
	однократное		
Время срабатывания УРОВ	с	0,4	
Полное время отключения выключателей с учетом времени гашения дуги.	с	0,08	

Таблица А.3 Эквиваленты и обходные связи

	R ₁ , Ом	X ₁ , Ом	R ₀ , Ом	X ₀ , Ом	U, кВ
ТЭЦ 1	0	8,964	0,029	5,31	119
ТЭЦ 2	0,305	4,313	0,007	6,03	124,2
ПС 1	2,659	8,259	0	9,718	121,2
WF 1	14,426	2,307	0,009	1,441	
WF 2	2326	34,06	-4,09	23,453	

Таблица А.4 Общие параметры расчета

Глубина залегания обратного тока земли	м	1000
Сопротивление заземления РУ ТЭЦ 1, ТЭЦ 2, ПС 1	Ом	0,5
Среднее значение сопротивления контура заземления опор	Ом	10

Данные по эквивалентам и обходным связям получены путем эквивалентирования исходной схемы энергосистемы по программе ТКЗ-3000. Уставки ТЗНП получены из энергосистемы. Данные по токам в контрольных точках, полученные по программе ТКЗ-3000 и рассчитанные с применением специализированного программного обеспечения представлены в Таблице А.5.

Таблица А.5 Данные по токам в контрольных точках, полученные по программе ТКЗ-3000 и рассчитанные с применением специализированного программного обеспечения

Точка КЗ	Ветвь	К ⁽³⁾		К ⁽¹⁾	
		ТКЗ-3000 I, А	Спец. ПО I, А	ТКЗ-3000 I ₁ / I ₂ / 3I ₀ , А	Спец. ПО I ₁ / I ₂ / 3I ₀ , А
365	365-754	1145	1130	365/363/244	361/359/313
	365-756	2924	2874	976/907/652	959/893/707
346	346-1024	2632	2589	644/712/1373	634/701/1383
460	460-754	1563	1531	448/449/1376	437/440/1347

Рассчитаем термическое воздействие, оказываемое токами КЗ на ГТ, между ТЭЦ 1 и ТЭЦ 2 (ВЛ W1 и W2). Расчет проводится по средней длине пролета.

Изменение тока в ГТ при перемещении точки КЗ вдоль ВЛ для однофазного короткого замыкания К(1) показано на рисунке А.2, для двухфазного К(1,1) – на рисунке А.3. Максимальный ток в ГТ протекает при КЗ на вторых опорах от ТЭЦ 1 и ТЭЦ 2. Величина его составляет:

- 1) для К(1) около ТЭЦ 1 – 13,2 кА, около ТЭЦ 2 – 12,4 кА;
- 2) для К(1,1) около ТЭЦ 1 – 13,6 кА, около ТЭЦ 2 – 10,8 кА.

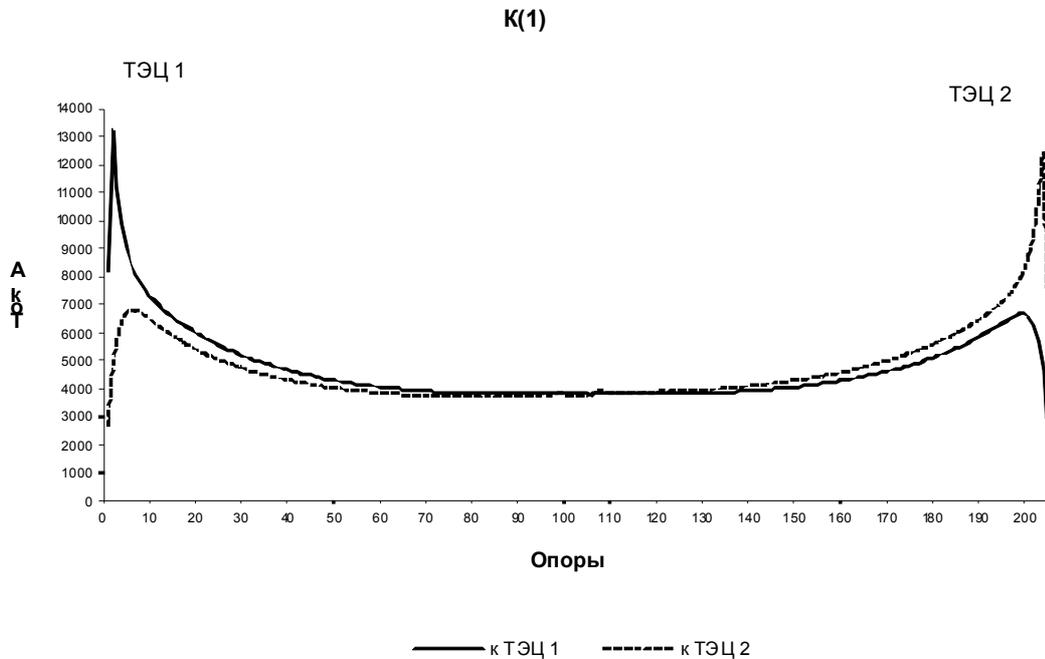


Рисунок А.2 Изменение тока в ГТ при перемещении КЗ вдоль ВЛ при однофазном КЗ на землю

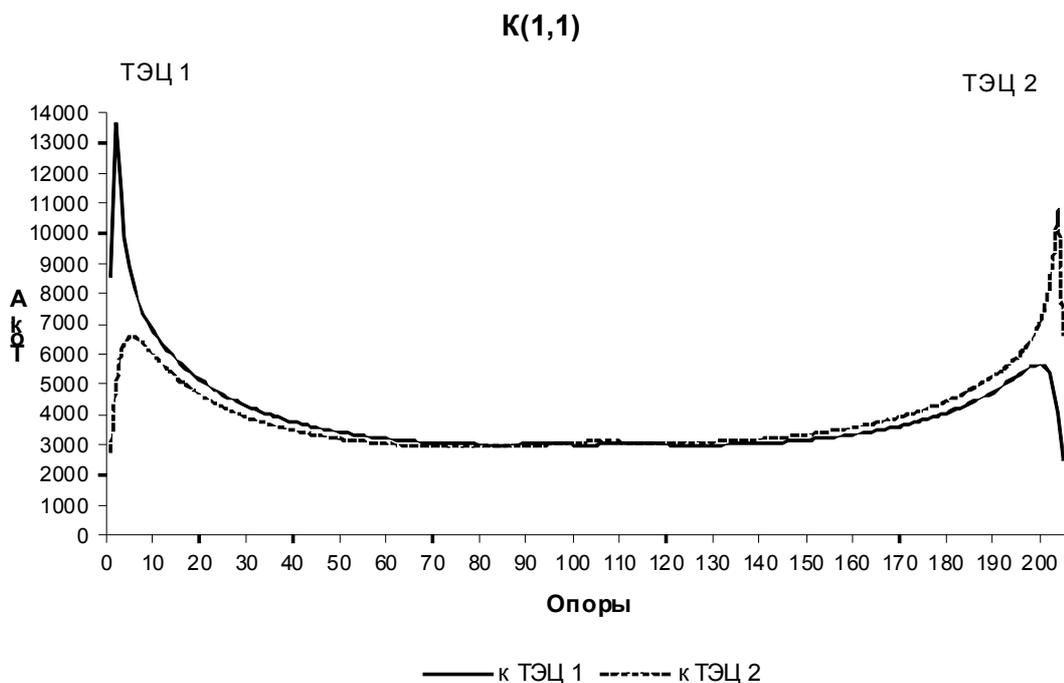


Рисунок А.3 Изменение тока в ГТ при перемещении КЗ вдоль ВЛ при двухфазном КЗ на землю

Зоны срабатывания ступеней ТЗНП вдоль ВЛ показаны на рисунке А.4 и А.5. Анализ графиков показывает, что при двухфазном КЗ полное отключение ВЛ производится II-ми ступенями ТЗНП, поэтому необходимо обратить внимание на возможное возрастания термического воздействия при двухфазном КЗ в середине ВЛ.

К(1)

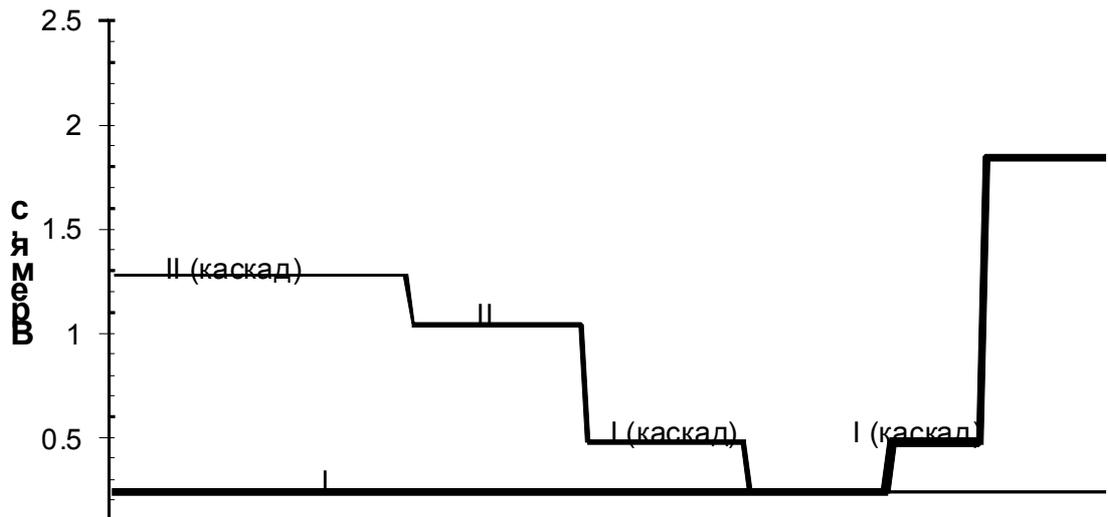


Рисунок А.4 Срабатывание ТЗНП при однофазном КЗ на землю

К(1,1)

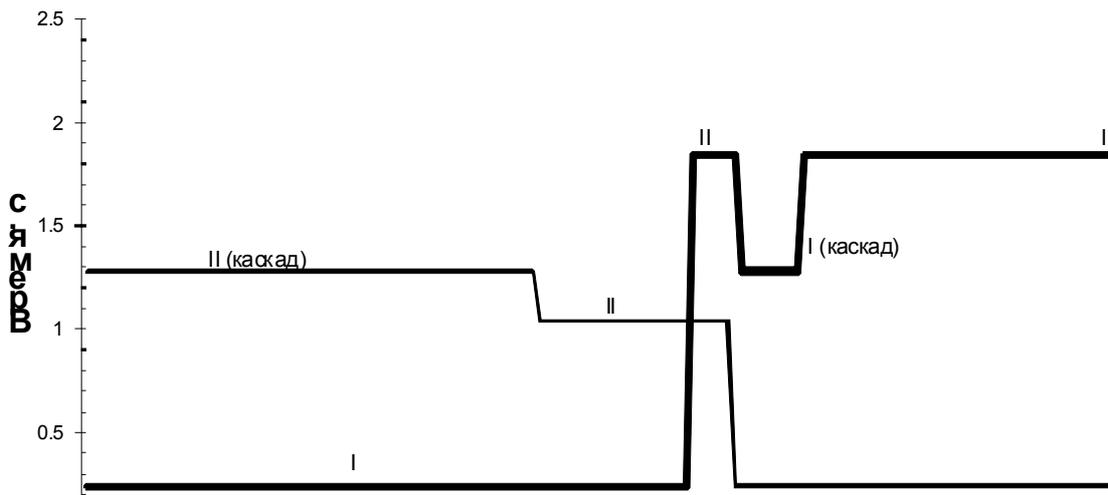


Рисунок А.5 Срабатывание ТЗНП при двухфазном КЗ на землю

Термическое воздействие, оказываемое на ГТ при перемещении точки КЗ вдоль ВЛ при однофазном и двухфазном КЗ, показано на рисунках А.6 и А.7 соответственно.

Максимальное термическое воздействие на ГТ около ТЭЦ 1 оказывает двухфазное замыкание ($B = 65 \text{ кА}^2\text{с}$), около ТЭЦ 2 – однофазное ($B = 69,2 \text{ кА}^2\text{с}$). Вследствие большего времени отключения при двухфазных КЗ в середине ВЛ термическое воздействие на ГТ составляет 16,8-17,1 $\text{кА}^2\text{с}$.

К(1)

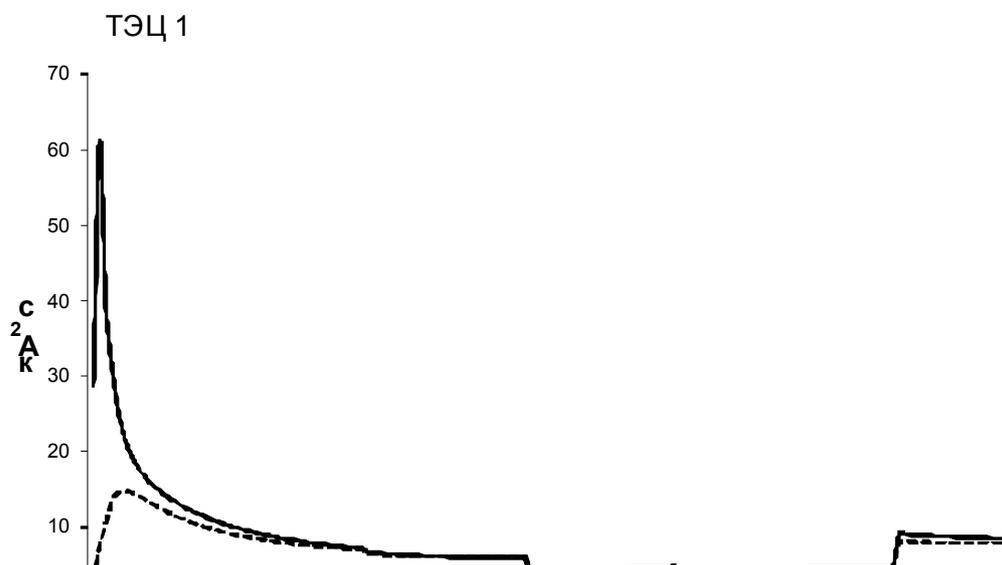


Рисунок А.6 Изменение термического воздействия на ГТ при перемещении КЗ вдоль ВЛ при однофазном КЗ на землю

К(1,1)



Рисунок А.7 Изменение термического воздействия на ГТ при перемещении КЗ вдоль ВЛ при двухфазном КЗ на землю

Заключение

ГТ ТК-50 (термостойкость $B = 13 \text{ кА}^2\text{с}$) [1], не термостойчив даже без учета действия УРОВ или АПВ на подходе к ТЭЦ 1 оп. 1 – оп. 14, на подходе к ТЭЦ 2 оп. 189 – оп. 205 при однофазном и двухфазном КЗ, а также в середине ВЛ (опора 88 - опора 94) при двухфазном КЗ.

Пример 2

Расчет термического воздействия токов КЗ на ОКГТ на ВЛ 110 кВ

Выбор требуемой термической стойкости ОКГТ

Проведем расчет термического воздействия на ОКГТ в предыдущей расчетной схеме (рисунок А.1). Рассмотрим подвеску ОКГТ между ТЭЦ 1 и ТЭЦ 2.

Наличие двухцепных ВЛ, где цепи подходят к разным ПС, обязывает проводить расчет термического воздействия и определение максимального термического воздействия на ОКГТ (при УРОВ или АПВ) для каждой цепи. В рассматриваемой схеме максимальное термическое воздействие на ТК-50 с учетом действия УРОВ составляет 142 кА²с. Вследствие меньшего сопротивления ОКГТ на него будет оказано большее термическое воздействие, поэтому для расчета термического воздействия используем «виртуальный» трос с сопротивлением 0,3 ом/км ($B \approx 170 - 190$ кА²с). Для определения максимального термического воздействия рассмотрим КЗ вблизи ТЭЦ 1 и ТЭЦ 2 при УРОВ или АПВ со стороны ближайшей к КЗ ТЭЦ. Термические воздействия представлены в Таблице А.6.

Таблица А.6

		Около ТЭЦ 1		Середина ВЛ	Около ТЭЦ2	
		W1.1	W1.2		W2.1	W2.2
УРОВ	K(1)	177,7	161	10,6 (УРОВ на ТЭЦ 2)	157,8	156,6
	K(1,1)	192	197,7	38,1 (УРОВ на ТЭЦ 2)	122,3	121
АПВ	K(1)	130	139,2	8,4 (АПВ на ТЭЦ 2)	122	122,2
	K(1,1)	144,7	152,6	15,9 (АПВ на ТЭЦ 2)	95,2	95,5

Максимальное термическое воздействие, оказываемое на ОКГТ, составляет ≈ 200 кА²с на ВЛ W1.2 при двухфазном КЗ и УРОВ со стороны ТЭЦ 1. ОКГТ с такой термостойкостью имеет сопротивление $\approx 0,25$ ом/км, термическое воздействие на трос с таким сопротивлением будет составлять 202 кА²с около ТЭЦ 1 и в середине ВЛ 38,8 кА²с. Изменение термического воздействия на подходе к ТЭЦ 1 показано на рисунке А.8.

ОКГТ с высокой термической стойкостью необходимо использовать на подходах к ТЭЦ, на всей ВЛ можно использовать ОКГТ с термической стойкостью 55 - 70 кА²с. ОКГТ с такой термостойкостью имеет сопротивление $\approx 0,5$ ом/км.

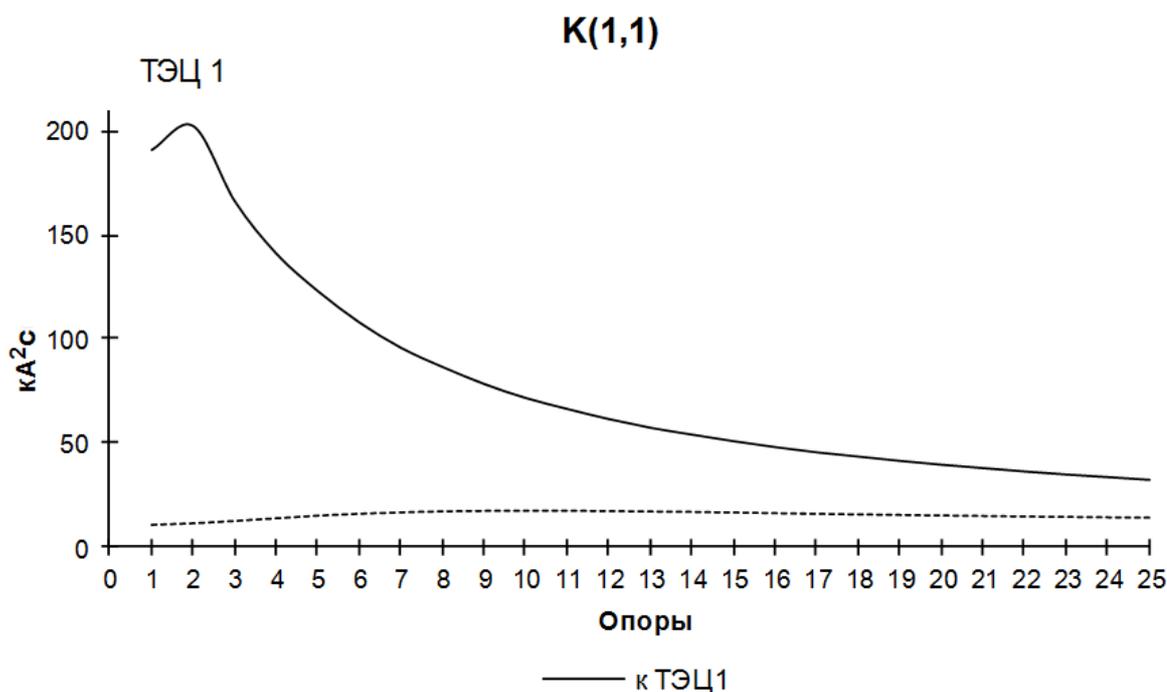
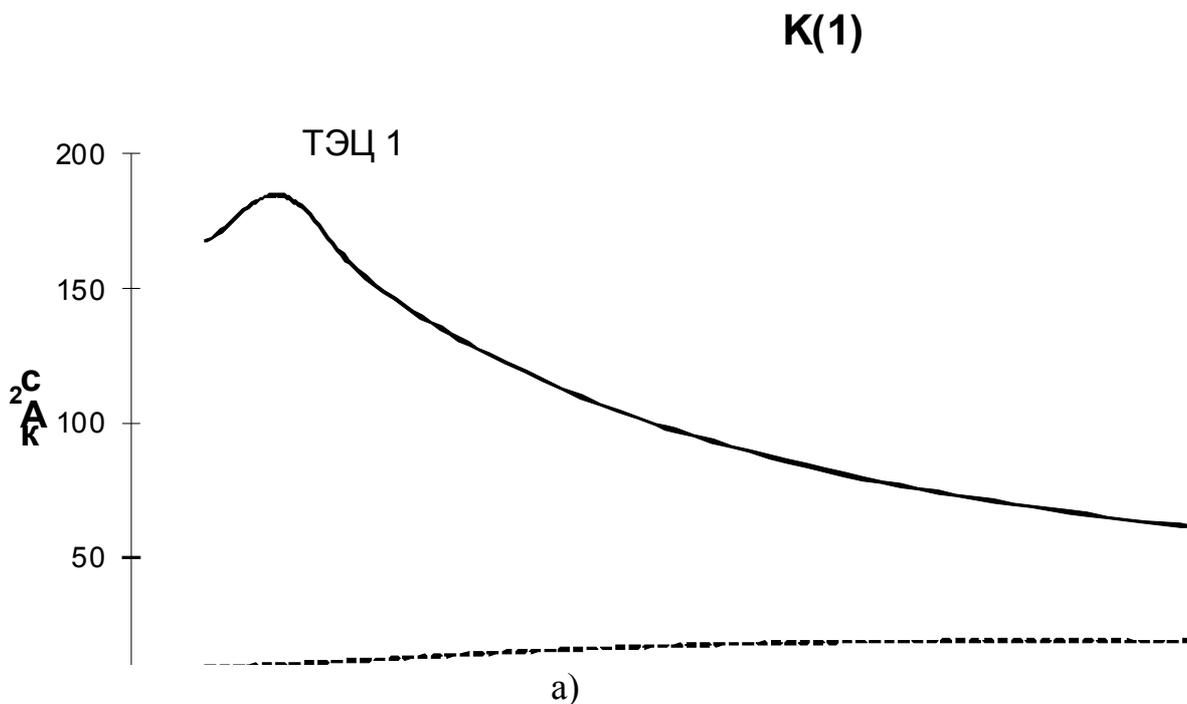


Рисунок А.8 Изменение термического воздействия на ОКГТ с сопротивлением 0,25 ом/км при двухфазном КЗ на землю и УРОВ

Изменяя длину участка ВЛ с ОКГТ высокой термостойкостью, определяем опору на которой термическое воздействие будет не более 50 кА²с. Изменение термического воздействия на ОКГТ на подходе к ТЭЦ 1 показано на рисунке А.9(а), а к ТЭЦ 2 на рисунке А.9(б).



К(1)

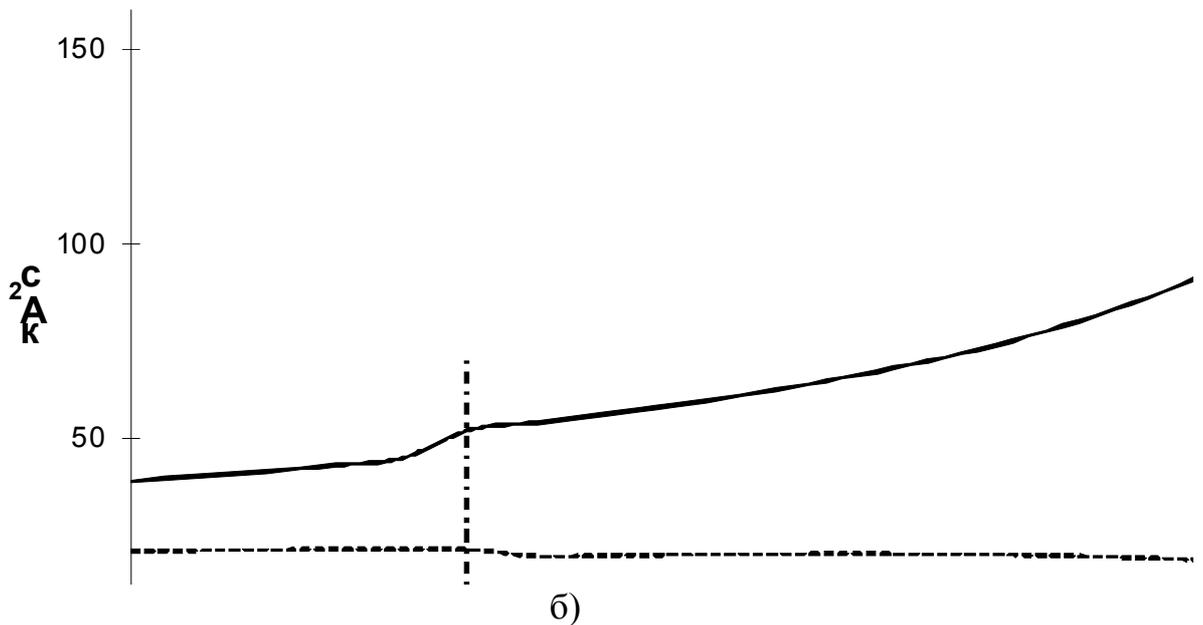


Рисунок А.9 (а, б) - Изменение термического воздействия на ОКГТ с сопротивлением 0,25 Ом/км (а) и 0,5 Ом/км (б) на подходах к ТЭЦ

Заключение

При подвески ОКГТ на ВЛ W1 и W2 между ТЭЦ 1 и ТЭЦ 2 требуется два типа ОКГТ:

1) Тип 1 - ОКГТ должен быть стоек при начальной температуре 25 °С.

к термическому воздействию тока КЗ, при сопротивлении постоянному току при 20 °С = 0,25 Ом/км не менее 200 кА²с на подходах к ТЭЦ (15 опор около ТЭЦ 1 и 18 опор около ТЭЦ 2);

2) Тип 2 - ОКГТ должен быть стоек при начальной температуре 25 °С.

к термическому воздействию тока КЗ, при сопротивлении постоянному току при 20 °С = 0,5 Ом/км не менее 50 кА²с на основной части ВЛ.

Пример 3

Расчет термического воздействия токов КЗ на ОКГТ на ВЛ 220 кВ
Выбор требуемой термической стойкости ОКГТ

Расчетная схема представлена на рисунке А.10.

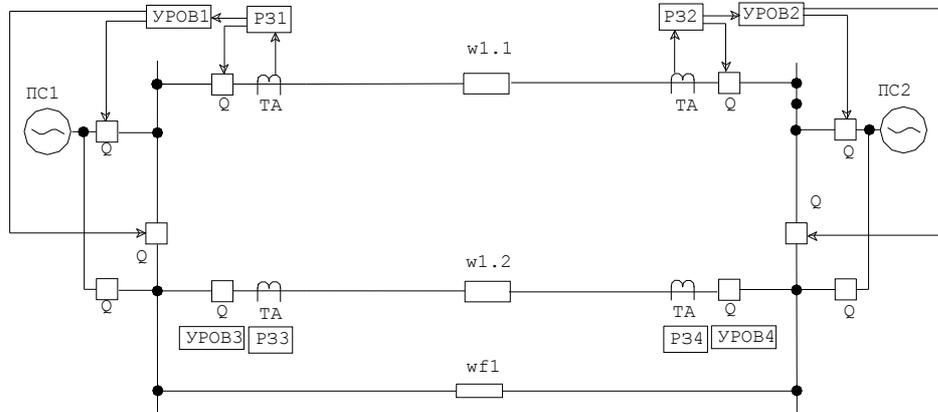


Рисунок А.10 Расчетная схема

Данные по элементам схемы приведены в Таблицах А.7 – А.10

Таблица А.7 Характеристики ВЛ, заданные подвеской

W 1 (двухцепная)			
Напряжение, кВ	220		
Длина, км	35		
Количество проводов в фазе	1	Расстояние между проводами в фазе, мм	-
		Длина пролета, м	100
Пролет от первой опоры до РУ	ПС 1	Количество тросов	2
		Марка троса	ТК-70
		Длина пролета, м	100
	ПС 2	Количество тросов	2
		Марка троса	ТК-70
		Длина пролета, м	100
Основная часть ВЛ			
Тип опоры	П220-2т		
Количество тросов	2		
Марка троса	ТК-70		
Марка фазного провода	АС-400/51		
Средняя длина пролета, м	293		

Таблица А.8 Расчетные данные и данные по устройствам РЗА

РЗ 1 и РЗ 3			
Время срабатывания основной защиты с абсолютной селективностью	с	0,1	
Уставки срабатывания резервной защиты с относительной селективностью (ТЗНП), с указанием ускоряемой ступени и времени срабатывания при ускорении .	I ступень	0 с	14000 А
	II ступень	0,4 с	1400 А
	III ступень	1,4/0,1 с	2600 А
	IV ступень	5,5 с	400 А
Тип АПВ, кратность АПВ	слепое/с синхронизмом		
	однократное		
Время срабатывания УРОВ	с	0,4	
Полное время отключения выключателей с учетом времени гашения дуги.	с	0,08	
РЗ 2 и РЗ 4			
Время срабатывания основной защиты с абсолютной селективностью	с	0,1	
Уставки срабатывания резервной защиты с относительной селективностью (ТЗНП), с указанием ускоряемой ступени и времени срабатывания при ускорении .	I ступень	0 с	5000 А
	II ступень	1,1 с	2900 А
	III ступень	2,3/0,1 с	1450 А
	IV ступень	3,5 с	650 А
Тип АПВ, кратность АПВ	слепое/с синхронизмом		
	однократное		
Время срабатывания УРОВ	с	0,4	
Полное время отключения выключателей с учетом времени гашения дуги.	с	0,08	

Таблица А.9 Эквиваленты и обходные связи

	R_1 , Ом	X_1 , Ом	R_0 , Ом	X_0 , Ом	U, кВ
ПС 1	4,7	2,074	4,7	2,728	235,9
ПС 2	2,777	26,584	3,045	33,385	229,2
WF 1	6,421	60,323	107,935	463,07	

Таблица А.10 Общие параметры расчета

Глубина залегания обратного тока земли	м	1000
Сопротивление заземления РУ ТЭЦ 1, ТЭЦ 2, ПС 1	Ом	0,5
Среднее значение сопротивления контура заземления опор	Ом	10

Данные по токам в контрольных точках, полученные по программам ТКЗ-3000 и рассчитанные с применением специализированного программного обеспечения, представлены в Таблице А.11.

Таблица А.11 Данные по токам в контрольных точках, полученные по программам ТКЗ-3000 и рассчитанные с применением специализированного программного обеспечения

Точка КЗ	Ветвь	К ⁽³⁾		К ⁽¹⁾	
		ТКЗ-3000 I, А	Спец. ПО I, А	ТКЗ-3000 I ₁ / I ₂ / 3I ₀ , А	Спец. ПО I ₁ / I ₂ / 3I ₀ , А
543	543-464	9673	9677	2492/2436/6417	2447/2399/6209
544	544-463	9590	9677	2470/2415/6386	2447/2399/6209
463	463-544	2143	2154	753/808/1140	755/812/1124
464	464-543	2163	2154	760/816/1146	756/812/1124

Расчеты показали, что термическое воздействие на ГТ около ПС 1 составляет 82,3 кА²с и около ПС 2 13,8 кА²с при однофазном КЗ и УРОВ на ближних к КЗ подстанциях. Существующий трос ТК-70 (В = 28 кА²с) не термоустойчив вблизи подстанции ПС 1. Учитывая, что большая часть тока КЗ будет проходить по ОКГТ, для моделирования термического воздействия на ОКГТ используем трос с сопротивлением R = 0,25 ом/км (В = 200 – 290 кА²с) на подходе к ПС 1 и с R = 0,6 ом/км (В < 50 кА²с) на подходе к ПС 2. Изменение термического воздействия на подходе к ПС 1 показано на рисунке А.11 и на подходе к ПС 2 на рисунке А.12.

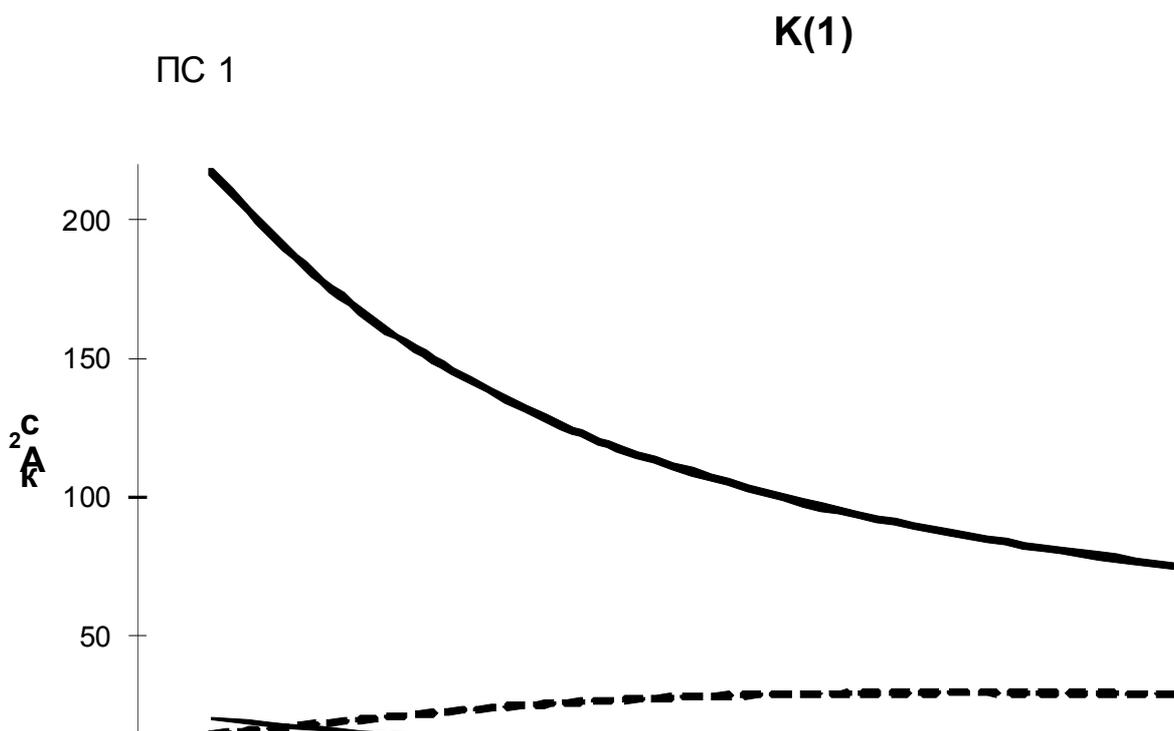


Рисунок А.11 - Изменение термического воздействия на ОКГТ и ГТ при перемещении КЗ вдоль ВЛ

К(1)

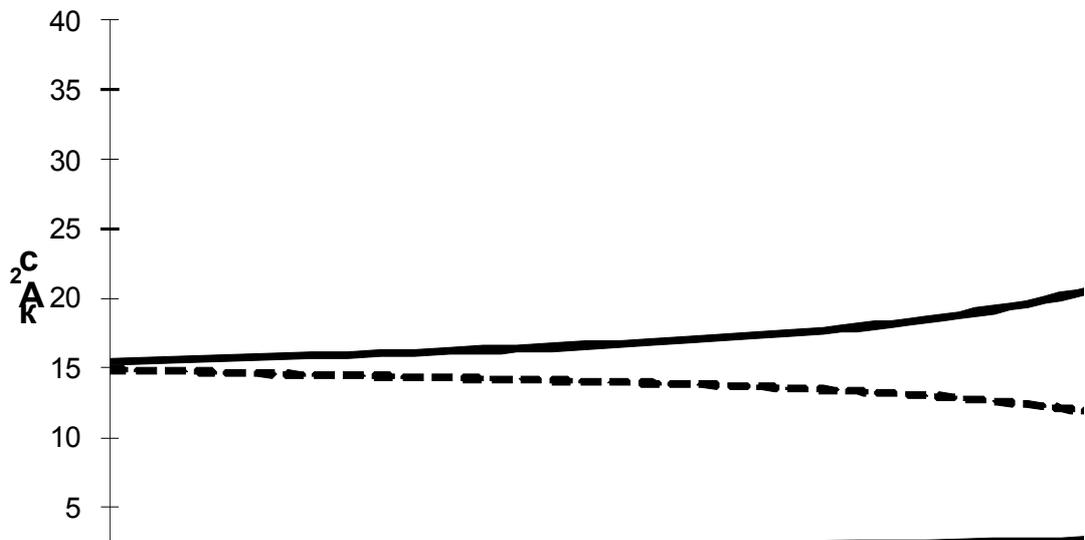


Рисунок А.12 Изменение термического воздействия на ОКГТ и ГТ при перемещении КЗ вдоль ВЛ

Максимальное термическое воздействие на ОКГТ около ПС 1 составляет 210 кА²с, около ПС 2 - 36,6 кА²с. На подходе к ПС 1 необходимо использовать ОКГТ с высокой термической стойкостью, а по всей ВЛ, включая подход к ПС 2, ОКГТ с термической стойкостью 50 – 60 кА²с. Изменение термического воздействия на ОКГТ на подходе к ПС 1 при перемещении КЗ вдоль ВЛ показано на рисунке А.13.

К(1)

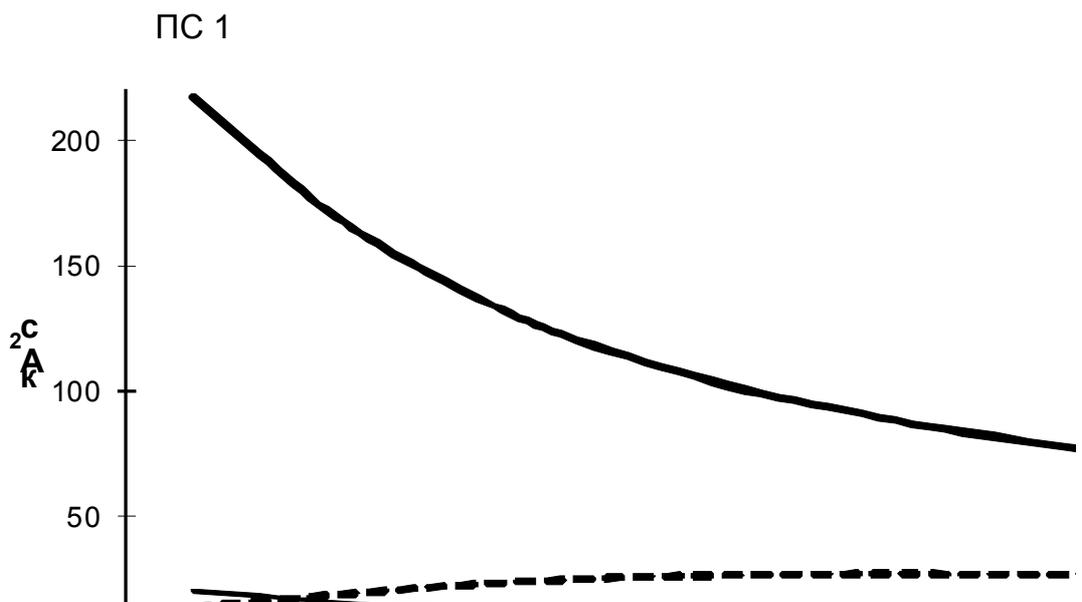


Рисунок А.13 Изменение термического воздействия на ОКГТ и ГТ при перемещении КЗ вдоль ВЛ

ОКГТ с термической стойкостью не менее $217 \text{ кА}^2\text{с}$ должен быть подвешен до 16 опоры, по всей ВЛ может быть использован ОКГТ с термической стойкостью не менее $56 \text{ кА}^2\text{с}$. Для снижения требования к термической стойкости ОКГТ можно заменить на подходе к ПС трос ТК-70 на АС-70/72. Уровень термического воздействия при таком сочетании показан на рисунке А.14.

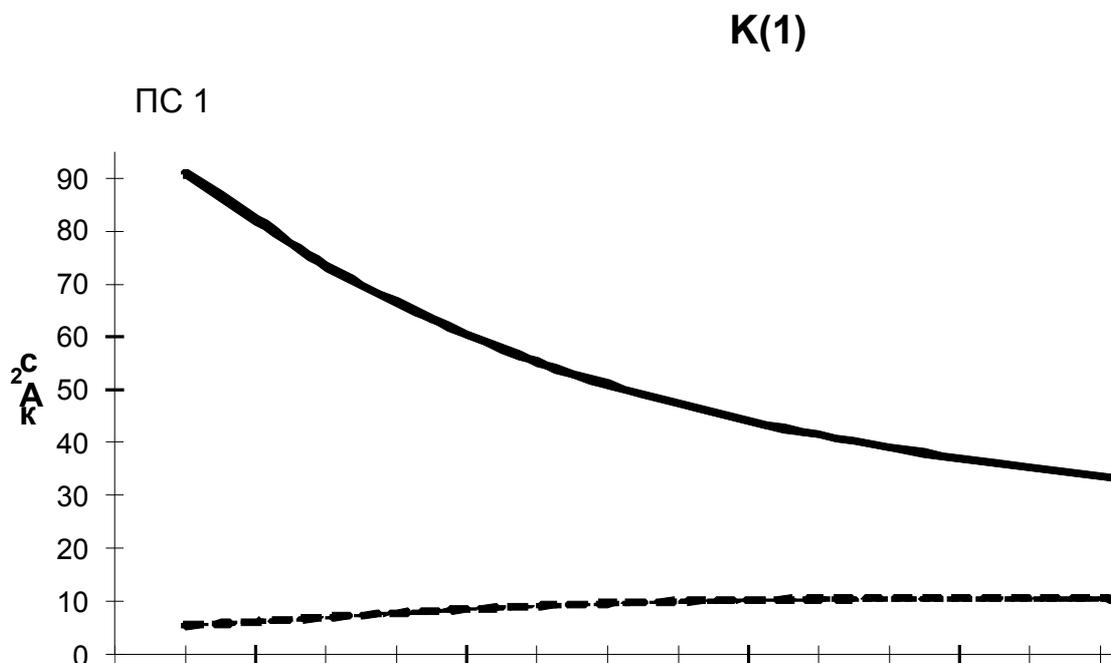


Рисунок А.14 Изменение термического воздействия на ОКГТ и ГТ при перемещении КЗ вдоль ВЛ

Заключение

Подвеска ОКГТ на ВЛ между ПС 1 и ПС 2 может быть проведена в следующих принятых в проекте вариантах (например в зависимости от механической прочности опор):

1) Требуется два типа ОКГТ:

а) Тип 1 - ОКГТ должен быть стоек при начальной температуре $25 \text{ }^\circ\text{C}$;

к термическому воздействию тока КЗ, при сопротивлении постоянному току при $20 \text{ }^\circ\text{C} = 0,25 \text{ Ом/км}$ не менее $217 \text{ кА}^2\text{с}$ на подходах к ПС 1 (оп. 1 – 16);

б) Тип 2 - ОКГТ должен быть стоек при начальной температуре $25 \text{ }^\circ\text{C}$;

к термическому воздействию тока КЗ, при сопротивлении постоянному току при 20 °С = 0,5 Ом/км не менее 56 кА²с на оставшейся части ВЛ.

2) Требуется два типа ОКГТ и замена ГТ ТК-70 на подходе к ПС 1 (оп. 1 - 16) на провод АС-70/72:

1) Тип 1 - ОКГТ должен быть стоек при начальной температуре 25 °С;

к термическому воздействию тока КЗ, при сопротивлении постоянному току при 20 °С = 0,4 Ом/км не менее 91 кА²с на подходах к ПС 1 (опоры 1 – 16);

2) Тип 2 - ОКГТ должен быть стоек при начальной температуре 25 °С;

к термическому воздействию тока КЗ, при сопротивлении постоянному току при 20 °С = 0,5 Ом/км не менее 56 кА²с на оставшейся части ВЛ.

Пример 4

Расчет термического воздействия токов КЗ на ОКГТ на ВЛ 330 кВ Выбор требуемой термической стойкости ОКГТ

Расчетная схема представлена на рисунке А.15.

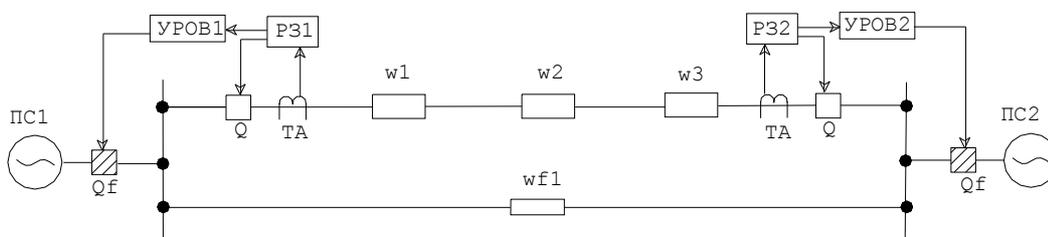


Рисунок А.15 - Расчетная схема

На расчетной схеме QF – выключатели, имитирующие отключения питания ВЛ при действии УРОВ.

Данные по элементам схемы приведены в Таблицах А.12 – А.15.

Таблица А.12 Характеристики ВЛ, заданные подвеской

W 1 (одноцепная)				
Напряжение, кВ	330			
Длина, км	7,3			
Количество проводов в фазе	2	Расстояние между проводами в фазе, мм		400
Пролет от первой опоры до РУ	ПС 1	Длина пролета, м		80
		Количество тросов		2
		Марка троса		ТК-70
Подход к ПС 1				
Длина подхода к ПС 1, на котором ГТ заземлен на каждой опоре, км	4,1	Тип опоры	Количество тросов	2
		П-330-3	Марка троса	ТК-70
			Марка фазного провода	АС-300/39
Основная часть ВЛ				
Тип опоры	П-330-3			
Количество тросов	2			
Марка троса	ТК-70			
Марка фазного провода	АС-300/39			
Средняя длина пролета, м	243			
W 2 (одноцепная)				
Напряжение, кВ	330			
Длина, км	192,4			
Количество проводов в фазе	2	Расстояние между проводами в фазе, мм		400
Основная часть ВЛ				
Тип опоры	П-330-3			
Количество тросов	2			
Марка троса	ТК-70			
Марка фазного провода	АС-300/39			
Средняя длина пролета, м	273			
W 3 (одноцепная)				
Напряжение, кВ	330			
Длина, км	8,4			
Количество проводов в фазе	2	Расстояние между проводами в фазе, мм		400
Пролет от первой опоры до РУ	ПС 2	Длина пролета, м		89
		Количество тросов		2
		Марка троса		ТК-70
Подход к ПС 1				
Длина подхода к ПС 1, на котором ГТ заземлен на каждой опоре, км	5	Тип опоры	Количество тросов	2
		П-330-3	Марка троса	ТК-70
			Марка фазного провода	АС-300/39

Продолжение Таблицы А.12

Основная часть ВЛ	
Тип опоры	П-330-3
Количество тросов	2
Марка троса	ТК-70
Марка фазного провода	АС-300/39
Средняя длина пролета, м	280

Таблица А.13 Расчетные данные и данные по устройствам РЗА

РЗ 1			
Время срабатывания основной защиты с абсолютной селективностью	с	0,1	
Уставки срабатывания резервной защиты с относительной селективностью (ТЗНП), с указанием ускоряемой ступени и времени срабатывания при ускорении .	I ступень	0 с	2300 А
	II ступень	1,2 с	900 А
	III ступень	3,5/0 с	400 А
	IV ступень	6,6 с	170 А
Тип АПВ, кратность АПВ	с синхронизмом		
	однократное		
Время срабатывания УРОВ	с	0,2	
Полное время отключения выключателей с учетом времени гашения дуги.	с	0,08	
РЗ 2			
Время срабатывания основной защиты с абсолютной селективностью	с	0,1	
Уставки срабатывания резервной защиты с относительной селективностью (ТЗНП), с указанием ускоряемой ступени и времени срабатывания при ускорении .	I ступень	0 с	2300 А
	II ступень	1,2/0 с	700 А
	III ступень	3,6 с	400 А
	IV ступень	5,3 с	180 А
Тип АПВ, кратность АПВ	слепое		
	однократное		
Время срабатывания УРОВ	с	0,3	
Полное время отключения выключателей с учетом времени гашения дуги.	с	0,08	

Таблица А.14 Эквиваленты и обходные связи

	R ₁ , Ом	X ₁ , Ом	R ₀ , Ом	X ₀ , Ом	U, кВ
ПС 1	1,1	37,6	0,39	27,56	337,5
ПС 2	0,2	16,3	0,103	16,13	329,4
WF 1	69	557	11000	31000	

Таблица А.15 Общие параметры расчета

Глубина залегания обратного тока земли	м	1000
Сопротивление заземления РУ ПС 1, ПС 2	Ом	0,5
Среднее значение сопротивления контура заземления опор	Ом	10

Из общей линии выделены участки ВЛ с глухозаземленными тросам (W1 и W2), по всей ВЛ трос заземлен по Г-образной схеме. Данные по токам в контрольных точках, полученные по программам ТКЗ-3000 и рассчитанные

с применением специализированного программного обеспечения, представлены в Таблице А.16.

Таблица А.16

Точка КЗ	Ветвь	К ⁽³⁾		К ⁽¹⁾	
		ТКЗ-3000 I, А	Спец. ПО I, А	ТКЗ-3000 I ₁ / I ₂ / 3I ₀ , А	Спец. ПО I ₁ / I ₂ / 3I ₀ , А
821	- 850	2219	2246	718/752/671	726/763/742
900	- 850	1776	1798	597/563/678	606/567/748

Расчет термического воздействия на ВЛ W 1 и W 2 проводился с учетом поопорной ведомости.

Максимальное термическое воздействие на ТК 70 оказывает однофазное короткое замыкание около ПС 2 ($B = 26,4 \text{ кА}^2\text{с}$). Существующий ГТ термоустойчив.

Вследствие небольшого термического воздействия токов КЗ на трос на ВЛ возможно использовать ОКГТ с $B < 50 \text{ кА}^2\text{с}$. Изменение термического воздействия тока КЗ на ОКГТ и ТК-70 около ПС 2 для однофазного и двухфазного коротких замыканий изображено на рисунках А.16 и А.17 соответственно. Неравномерность изменения термического воздействия связана с различной длиной пролетов. Увеличение термического воздействия на опоре № 747 обуславливается отсутствием на ВЛ заземленного на каждой опоре троса ТК-70.

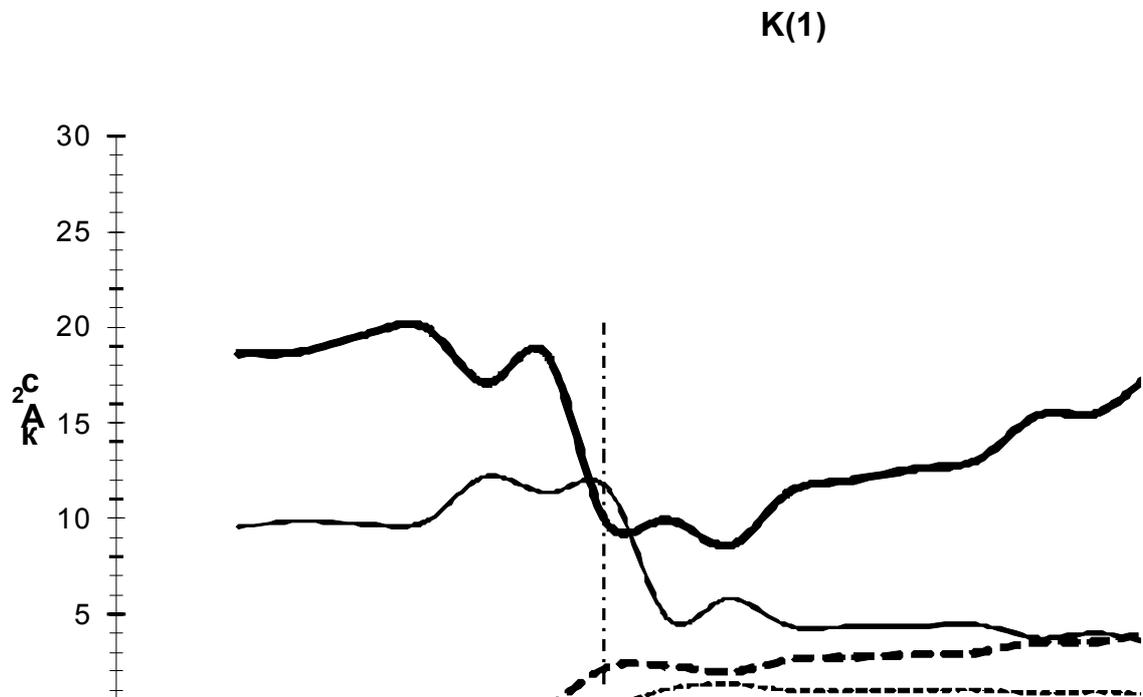


Рисунок А.16 - Изменение термического воздействия на ОКГТ и ГТ при перемещении КЗ вдоль ВЛ

К(1,1)

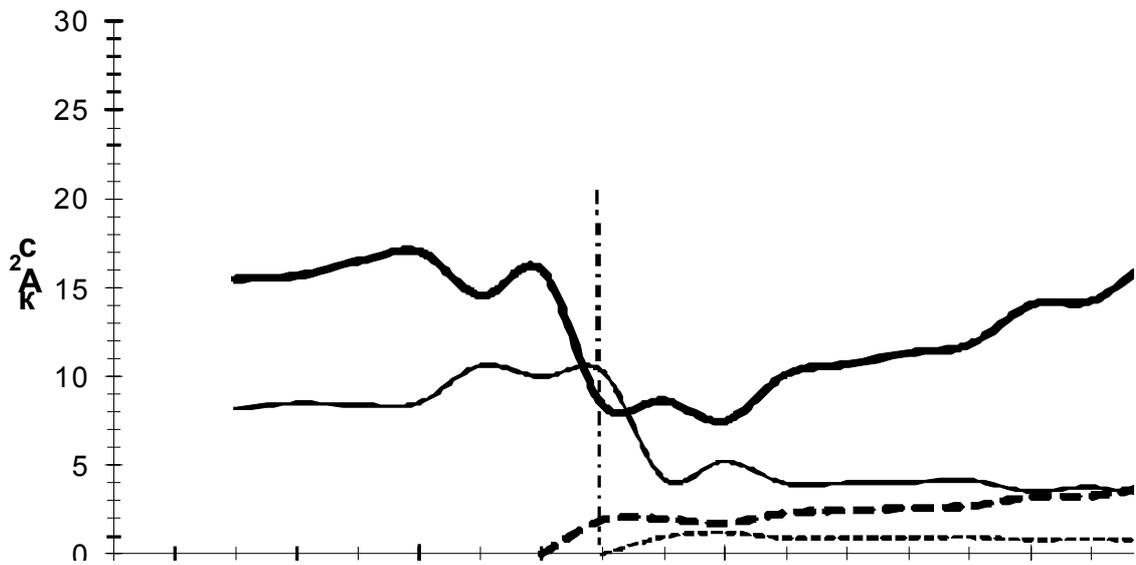


Рисунок А.17 Изменение термического воздействия на ОКГТ и ГТ при перемещении КЗ вдоль ВЛ

Заключение

Для подвески ОКГТ между ПС 1 и ПС 2 требуется ОКГТ с термической стойкостью при начальной температуре 25 °С не менее 30 кА²с при сопротивлении постоянному току при 20 °С = 0,6 Ом/км.

Пример 5

Проверка термической устойчивости к токам КЗ конкретного ОКГТ

Проводим проверку термической стойкости реального ОКГТ в схеме примера 3 (рисунок А.5). Для варианта с заменой ТК-70 на провод АС-70/72 предложены следующие ОКГТ:

- 1) Тип 1: $V = 97 \text{ кА}^2\text{с}$, $R = 0,392 \text{ Ом/км}$, $d = 13,9 \text{ мм}$;
- 2) Тип 2: $V = 66 \text{ кА}^2\text{с}$, $R = 0,475 \text{ Ом/км}$, $d = 12,6 \text{ мм}$.

Максимальное термическое воздействие на ОКГТ с высокой термической стойкостью около ПС 1 при однофазном коротком замыкании составляет 91,5 кА²с, для массового ОКГТ в точке перехода (оп. 16) – 57 кА²с. Термическое воздействие около ПС 2 составляет 34 кА²с.

Предложенные ОКГТ в данном варианте подвески термически устойчивы. Так как предложенный массовый ОКГТ имеет большую термическую стойкость, чем рассчитанное воздействие, можно уменьшить длину участка с термостойким ОКГТ. Изменение термического воздействия

на ОКГТ на подходе к ПС 1 при перемещении КЗ вдоль ВЛ показано на рисунке А.18.

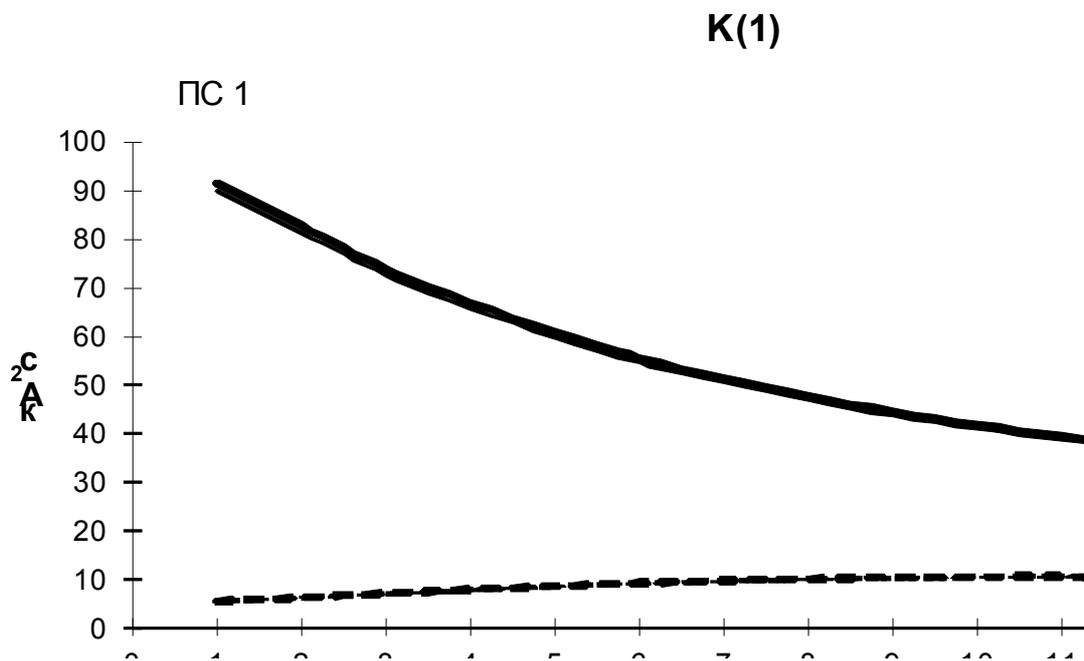


Рисунок А.18 Изменение термического воздействия на ОКГТ и ГТ при перемещении КЗ вдоль ВЛ

Заключение

Предложенные ОКГТ термоустойчивы при следующей схеме подвески:

- 1) ОКГТ тип 1 и провод АС-70/72 на подходе к ПС 1 до 13 опоры;
- 2) ОКГТ тип 2 и существующий трос ТК-70.

Пример расчета термического воздействия тока КЗ на ГТ без применения специализированного программного обеспечения

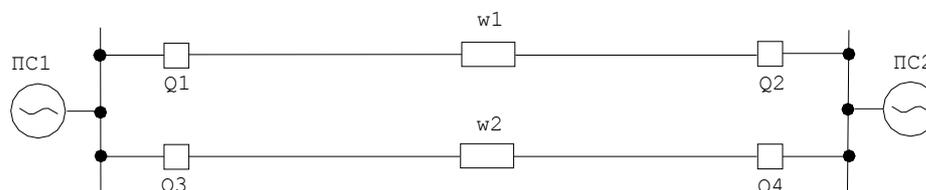


Рисунок Б.1 Схема сети

В Таблице Б.1 приведены исходные параметры для ВЛ W1 и W2.

Таблица Б.1 Исходные параметры для ВЛ W1 и W2

W 1 (одноцепная), W 2 (одноцепная),			
Напряжение, кВ	110		
Длина, км	20		
Количество проводов в фазе	1	Расстояние между проводами в фазе, мм	-
Пролет от первой опоры до РУ		Длина пролета, м	50
		Количество тросов	2
		Параметры троса	D=13мм, R _r =0.6 Ом/км
Основная часть ВЛ			
Тип опоры	ПБ-110-1		
Количество тросов	1		
Трос	D=13мм, R=0.6 Ом/км		
Марка фазного провода	АС-120/19		
Средняя длина пролета, м	200		
Сопротивление заземления опор, R _{оп}	10 Ом		
Сопротивление заземления контура ПС, R _{ру}	0,4 Ом		
Глубина обратного тока земли, D _з	1000 м		
Расстояние между ВЛ W1 и ВЛ W2	50 м		

На рисунке Б.2 представлена конфигурация опоры для W1 и W2.

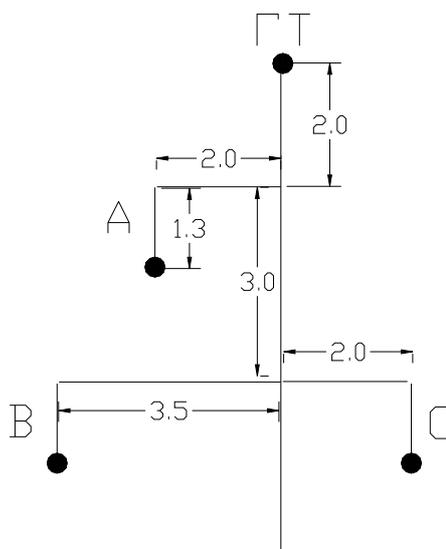


Рисунок Б.2 Конфигурация опоры ПБ110-1

Значения токов в точках КЗ на ВЛ W1 и ток $I_{0.смежн. w2}$ в смежной ВЛ W2 приведены в Таблице Б.2. Токи рассчитаны для параметров ВЛ, приведенных в Таблице Б.1.

Таблица Б.2 Значения токов в точках КЗ

Точка КЗ	Отключенная ПС	ВЛ W1			Ток в ВЛ W2 $I_{0.смежн. w2}$, кА
		Суммарный ток в точке КЗ, I_k , кА	Ток ВЛ слева от точки КЗ, I_1 , кА	Ток ВЛ справа от точки КЗ, I_2 , кА	
<u>K31</u> : 250 м от портала ПС1 (2-я опора)	обе включены	14	12	2	1.1
	отключена ПС1	2.8	0	2.8	3.4
	отключена ПС2	11.7	11.7	0	2.7
<u>K32</u> : 2250 м от портала ПС1 (12-я опора)	обе включены	12.3	9.8	2.5	0.9
	отключена ПС1	3	0	3	3.4
	отключена ПС2	9.5	9.5	0	2.8

Характеристики срабатывания ТЗНП при отключении однофазного КЗ на землю на ВЛ W1 приведены на рисунке Б.3.

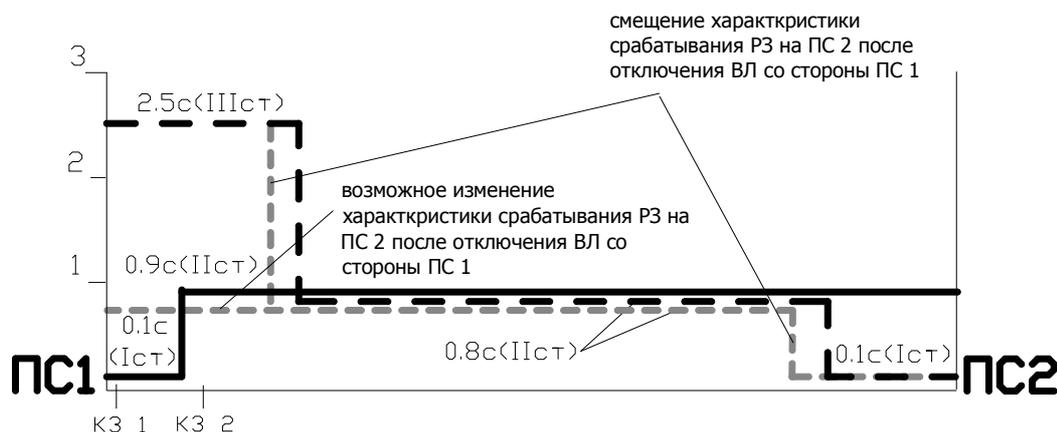


Рисунок Б.3 Характеристики срабатывания ТЗНП с обоих концов ВЛ от места расположения точки однофазного КЗ на землю

При проведении расчетов следует учитывать, что при двухстороннем питании ВЛ после отключения выключателя с одного из концов ВЛ, отключение КЗ с другого конца ВЛ возможно будет производиться ступенью с меньшей выдержкой времени (повышение чувствительности РЗ в режиме каскадного отключения). В данном примере расчета считается, что в точках КЗ1, КЗ2 отключение со стороны ПС 2 во всех случаях проводится III – ей ступенью ТЗНП.

Параметры срабатывания РЗА приведены в Таблице Б.3.

Таблица Б.3 Параметры срабатывания РЗА

РЗА	
Тип АПВ, кратность АПВ	с синхронизмом
	однократное
Время срабатывания УРОВ	0,4 с
Полное время отключения выключателей с учетом времени гашения дуги.	0,08 с
Собственное время срабатывания РЗ	0,06 с
Время отключения КЗ от УРОВ	0,09 с
Время ускорения ступени ТЗНП после АПВ	0,1 с

Рассчитываем параметры ГТ для средней длины пролета $L_{np}=200$ м:

Эффективный диаметр ГТ по (5.12. а):

$$d_{Т.эф} = 0.95 \cdot 0.013 = 0,0124 \text{ м.}$$

Поскольку трос один, то:

$$d_{Т.экв} = d_{Т.эф} = 0,0124 \text{ м.}$$

Реактивная составляющая удельного сопротивления троса, X_T по (5.14):

$$X_T = 0.145 \cdot \left[\lg \left(\frac{2 \cdot 1000}{0.0124} \right) \right] = 0.755 \text{ Ом/км}$$

По (5.11) определяем \underline{Z}_T на пролете $L=200\text{м}$:

$$\underline{Z}_T = (0.05 + 0.6 + j0.755) \cdot 0.2 = 0.13 + j0.151 \text{ Ом}$$

Среднегеометрическое расстояние между фазными проводами ВЛ W1 и ГТ на ВЛ W1 по(5.16.а):

$$D_{\phi T W1} = \sqrt[3]{3.86 \cdot 7.21 \cdot 6.6} = 5.68 \text{ м}$$

Среднегеометрическое расстояние между фазными проводами ВЛ W2 и ГТ на ВЛ W1 по(5.16.а):

$$D_{\phi T W2} = \sqrt[3]{48.11 \cdot 46.92 \cdot 52.38} = 49.08 \text{ м}$$

Сопротивление взаимоиндукции между ГТ на ВЛ W1 и фазными проводами ВЛ W1 по (5.15):

$$X_{\phi T W1} = 0.145 \cdot \left[\lg \left(\frac{1000}{5.68} \right) \right] = 0.33 \text{ Ом/км}$$

Сопротивление взаимоиндукции между ГТ на ВЛ W1 и фазными проводами ВЛ W2 по (5.15):

$$X_{\phi T W2} = 0.145 \cdot \left[\lg \left(\frac{1000}{49.08} \right) \right] = 0.19 \text{ Ом/км}$$

Безразмерный коэффициент P , учитывающий взаимоиндукцию между ГТ и фазными проводами ВЛ W1 по (5.3):

$$\underline{P} = 1 - \frac{0.05 + j0.33}{0.65 + j0.76} = 0.72 - j0.18$$

Рассмотрим однофазное короткое замыкание на землю в точке КЗ1 находящейся на расстоянии 250 м от портала ПС1. Эта точка соответствует второй опоре ВЛ.

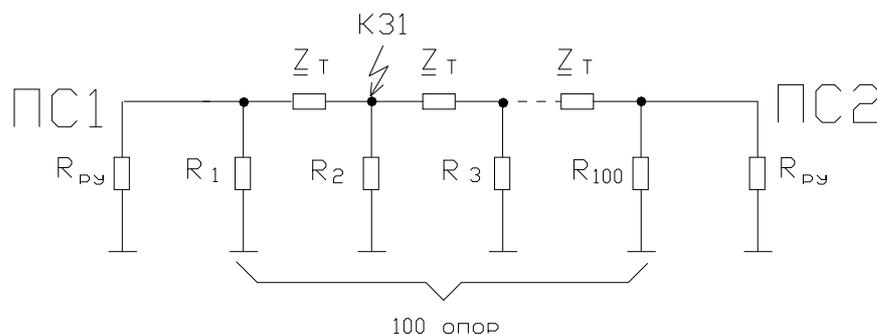


Рисунок Б.4 Расчетная схема для $K^{(1)}$ в точке КЗ1

Для КЗ на второй опоре (точка КЗ1) при расчете входного сопротивления слева - $m=1$, $Z_m=R_{py}$; при расчете входного сопротивления справа - $m=98$, $Z_m=Z_c$.

Входные сопротивления:

а) входное сопротивление троса слева от точки КЗ1 по (5.9):

$$\underline{Z}_{BX.A} = \frac{0.4 \cdot (1.28 + j0.59) + (1.28 + j0.59)^2 \cdot th(1 \cdot (0.13 + j0.06))}{(1.28 + j0.59) + 0.4 \cdot th(1 \cdot (0.13 + j0.06))} = 0.51 + j0.14 \text{ Ом}$$

б) входное сопротивление троса справа от точки КЗ1 по (5.10):

При больших значениях m , когда $m > 3R_{on}/Z_c$, $Z_{BX} = Z_c$. В данном случае $m=98 > (3R_{on}/Z_c)=21$.

$$\underline{Z}_{BX.B} = \underline{Z}_c = 1.28 + j0.59 \text{ Ом}$$

Определяем \underline{Z}_0 по (5.5):

$$\frac{1}{\underline{Z}_0} = \frac{1}{0.51 + j0.14} + \frac{1}{1.28 + j0.59} + \frac{1}{10}$$

$$\underline{Z}_0 = 0.36 + j0.11 \text{ Ом}$$

Определяем составляющую тока ГТ по (5.2, а, б):

1) ВЛ включена с обоих концов:

а) ток в ГТ влево от точки КЗ1:

$$\underline{I}_{yp.A} = (1 - (0.72 - j0.18)) \cdot 12 = 3.4 + j2.1 \text{ кА}$$

б) ток в ГТ вправо от точки КЗ1:

$$\underline{I}_{yp.B} = (1 - (0.72 - j0.18)) \cdot 2 = 0.56 + j0.35 \text{ кА}$$

2) ВЛ включена только со стороны ПС2:

а) ток в ГТ влево от точки КЗ1:

$$\underline{I}_{yp.A} = 0 \text{ кА}$$

б) ток в ГТ вправо от точки КЗ1:

$$\underline{I}_{yp.B} = (1 - (0.72 - j0.18)) \cdot 2.8 = 0.79 + j0.49 \text{ кА}$$

3) ВЛ включена только со стороны ПС1:

а) ток в ГТ влево от точки КЗ1:

$$\underline{I}_{yp.A} = (1 - (0.72 - j0.18)) \cdot 11.7 = 3.3 + j2.1 \text{ кА}$$

б) ток в ГТ вправо от точки КЗ1:

$$\underline{I}_{\text{ур.В}} = 0 \text{ кА}$$

Определяем дополнительную составляющую тока ГТ по (5.4, а, б):

1) ВЛ включена с обоих концов:

а) ток в ГТ влево от точки КЗ1:

$$\underline{I}_{\text{дон.А(Рон)}} = (0.72 - j0.18) \cdot 14 \cdot \frac{0.36 + j0.11}{0.51 + j0.14} = 7.1 - j1.5 \text{ кА}$$

б) ток в ГТ вправо от точки КЗ:

$$\underline{I}_{\text{дон.В(Рон)}} = (0.78 - j0.18) \cdot 14 \cdot \frac{0.36 + j0.11}{1.28 + j0.59} = 2.6 - j0.97 \text{ кА}$$

2) ВЛ включена только со стороны ПС2:

а) ток в ГТ влево от точки КЗ1:

$$\underline{I}_{\text{дон.А(Рон)}} = 2.8 \cdot \frac{0.36 + j0.11}{0.51 + j0.14} = 1.43 - j0.3 \text{ кА}$$

б) ток в ГТ вправо от точки КЗ:

$$\underline{I}_{\text{дон.В(Рон)}} = (0.72 - j0.18) \cdot 2.8 \cdot \frac{0.36 + j0.11}{1.28 + j0.59} = 0.51 - j0.19 \text{ кА}$$

3) ВЛ включена только со стороны ПС1:

а) ток в ГТ влево от точки КЗ1:

$$\underline{I}_{\text{дон.А(Рон)}} = (0.72 - j0.18) \cdot 11.7 \cdot \frac{0.36 + j0.11}{0.51 + j0.14} = 5.7 - j1.3 \text{ кА}$$

б) ток в ГТ вправо от точки КЗ:

$$\underline{I}_{\text{дон.В(Рон)}} = 11.7 \cdot \frac{0.36 + j0.11}{1.28 + j0.59} = 2.1 - j0.81 \text{ кА}$$

Определяем индуктивную составляющую $\underline{I}_{\text{инд.ф.смежн}}$ по (5.8):

1) ВЛ включена с обоих концов:

$$\underline{I}_{\text{инд.ф.смежн}} = 1.1 \cdot \frac{0.05 + j0.19}{0.13 + j0.151} = 0.974 + j0.474 \text{ кА}$$

2) ВЛ включена только со стороны ПС2:

$$\underline{I}_{\text{инд.ф.смежн}} = 3.4 \cdot \frac{0.05 + j0.19}{0.13 + j0.151} = 3.01 + j1.47 \text{ кА}$$

3) ВЛ включена только со стороны ПС1:

$$\underline{I}_{\text{инд.ф. смежн}} = 2.7 \cdot \frac{0.05 + j0.19}{0.13 + j0.151} = 2.39 + j1.16 \text{ кА}$$

Поскольку точка КЗ1 расположена вблизи портала ПС1 то достаточен учет только $\underline{I}_{\text{донРА}}$ в соответствие с (5.7.а, б). Предварительно по (5.6, а) определяем ЭДС и \underline{Z}_1 :

1) ВЛ включена с обоих концов:

$$\underline{E}_A = (0.72 - j0.18) \cdot 12 \cdot 0.4 = 3.5 - j0.84 \text{ кВ}$$

$$\underline{Z}_1 = \frac{(1.28 - j0.59)^2}{2 \cdot (1.28 - j0.59)} = 0.64 + j0.3 \text{ Ом}$$

а) дополнительная составляющая тока в тресе слева от точки КЗ1:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{\text{дон.А(РА)}} &= \frac{(3.5 - j0.84)}{0.4 + 0.64 + j0.3} \cdot \frac{1.28 + j0.59}{2 \cdot (1.28 + j0.59)} \cdot \frac{10}{10 + 1.28 + j0.59} = \\ &= 1.23 - j0.78 \text{ кА} \end{aligned}$$

б) дополнительная составляющая тока в тресе справа от точки КЗ1:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{\text{дон.В(РА)}} &= \frac{(3.5 - j0.84)}{0.4 + 0.64 + j0.3} \cdot \frac{1.28 + j0.59}{2 \cdot (1.28 + j0.59)} \cdot \left(\frac{10}{10 + 1.28 + j0.59} \right)^2 = \\ &= 0.104 - j0.074 \text{ кА} \end{aligned}$$

2) ВЛ включена со стороны ПС1:

$$\underline{E}_A = (0.72 - j0.18) \cdot 11.7 \cdot 0.4 = 3.4 - j0.82 \text{ кВ}$$

а) дополнительная составляющая тока в тресе слева от точки КЗ1:

$$\underline{I}_{\text{дон.А(РА)}} = 1.2 - j0.76 \text{ кА}$$

б) дополнительная составляющая тока в тресе справа от точки КЗ1:

$$\underline{I}_{\text{дон.В(РА)}} = 0.1 - j0.073 \text{ кА}$$

По (2.1) определяем полный ток в ГТ, текущий влево и вправо от точки КЗ1:

1) ВЛ включена с обоих концов:

а) ток в ГТ влево от точки КЗ:

$$\underline{I}_{\text{ГА}} = (3.4 + j2.1) + (7.1 - j1.5) + (1.23 - j0.78) + (0.974 + j0.474) = 12.704 + j0.294 \text{ кА}$$

б) ток в ГТ вправо от точки КЗ:

$$\underline{I}_{TB} = (0.56 + j0.35) + (2.6 - j0.97) + (0.104 - j0.074) - (0.974 + j0.474) = 2.326 - j1.174 \text{ кА}$$

2) ВЛ включена только со стороны ПС2:

а) ток в ГТ влево от точки КЗ:

$$\underline{I}_{TA} = (1.43 - j0.3) + (3.01 + j1.47) = 4.44 + j1.17 \text{ кА}$$

б) ток в ГТ вправо от точки КЗ:

$$\underline{I}_{TB} = (0.79 + j0.49) + (0.51 - j0.19) - (3.01 + j1.47) = -1.71 - j1.17 \text{ кА}$$

3) ВЛ включена только со стороны ПС1:

а) ток в ГТ влево от точки КЗ:

$$\underline{I}_{TA} = (3.3 + j2.1) + (5.7 - j1.3) + (1.2 - j0.76) + (2.39 + j1.16) = 12.59 + j1.20 \text{ кА}$$

б) ток в ГТ вправо от точки КЗ:

$$\underline{I}_{TB} = (2.1 - j0.81) + (0.1 - j0.073) - (2.39 + j1.16) = -0.19 - j2.04 \text{ кА}$$

Ток в ГТ в сторону левого портала значительно больше тока текущего вправо, поэтому рассчитываем термическое воздействие тока КЗ на ГТ для случаев работы УРОВ на ПС1 и неуспешного АПВ на устойчивое КЗ со стороны ПС1 для тока слева. В обоих вариантах считается, что отключение КЗ проводится ТЗНП.

Постоянная времени апериодической составляющей тока $T_a = 0,01 \text{ с}$.

1) Отказ выключателя со стороны ПС1 и действие УРОВ.

Согласно рисунку Б.3 отключение в точке КЗ1 со стороны ПС1 производится I ступенью, со стороны ПС2 - III ступенью.

Время отключения КЗ со стороны ПС1 с учетом действия УРОВ по (6.1) и (6.3).

$$t_{откл1} = 0.1 + 0.06 + 0.4 + 0.09 = 0.65 \text{ с}$$

Время отключения КЗ со стороны ПС2 по (3.1) и (3.4)

$$t_{откл2} = 2.5 + 0.06 + 0.08 = 2.64 \text{ с}$$

Определяем интеграл Джоуля по (4.1.в) для тока в ГТ текущего влево от точки КЗ.

Термическое воздействие на ГТ в случае действия УРОВ на ПС1:

$$\begin{aligned}
 B_{тер.расч} &= 12.707^2 \cdot (0.65 + 0.01) \left. \vphantom{12.707^2} \right\} \text{отключение после УРОВ со стороны ПС1} \\
 &+ 4.59^2 \cdot (2.64 - 0.65) \left. \vphantom{4.59^2} \right\} \text{отключение со стороны ПС2} \\
 &+ (12.707 - 4.59)^2 \cdot 0.01 \left. \vphantom{(12.707 - 4.59)^2} \right\} \text{учет } T_a \text{ после отключения ПС1} \\
 B_{тер.расч} &= 149 \text{ кА}^2\text{с}
 \end{aligned}$$

2) Отключение КЗ с обоих концов ВЛ с последующим неуспешным АПВ со стороны ПС 1.

Время отключения КЗ со стороны ПС1 по (6.2):

$$t_{откл1} = 0.1 + 0.06 + 0.08 = 0.24 \text{ с}$$

Время отключения КЗ со стороны ПС2 по (6.4):

$$t_{откл2} = 2.5 + 0.06 + 0.08 = 2.64 \text{ с}$$

Время отключения КЗ со стороны ПС1 после неуспешного АПВ:

$$t_{откл3} = 0.1 + 0.06 + 0.08 = 0.24 \text{ с}$$

Термическое воздействие на ГТ в случае неуспешного АПВ со стороны ПС1:

$$\begin{aligned}
 B_{тер.расч} &= 12.707^2 \cdot (0.24 + 0.01) \left. \vphantom{12.707^2} \right\} \text{отключение со стороны ПС1} \\
 &+ 4.59^2 \cdot (2.64 - 0.24) \left. \vphantom{4.59^2} \right\} \text{отключение со стороны ПС2} \\
 &+ (12.707 - 4.59)^2 \cdot 0.01 \left. \vphantom{(12.707 - 4.59)^2} \right\} \text{учет } T_a \text{ после отключения ПС1} \\
 &+ 12.65^2 \cdot (0.24 + 0.01) \left. \vphantom{12.65^2} \right\} \text{отключение со стороны ПС1 после неуспешного АПВ} \\
 B_{тер.расч} &= 132 \text{ кА}^2\text{с}
 \end{aligned}$$

Рассмотрим однофазное короткое замыкание на землю в точке КЗ2, находящейся на расстоянии 2250 м от портала ПС1. Эта точка соответствует двенадцатой опоре ВЛ.

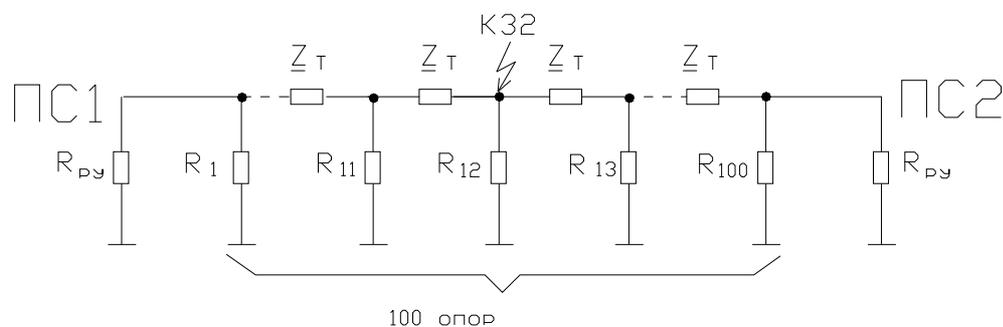


Рисунок Б.5 Расчетная схема для $K^{(1)}$ в точке КЗ2

Для КЗ на двенадцатой опоре (точка К32) при расчете входного сопротивления слева - $m=10$, $Z_m=R_{py}$; при расчете входного сопротивления справа - $m=89$, $Z_m=Z_c$.

а) входное сопротивление троса слева от точки К32 по (5.9).

$$\underline{Z}_{BX.A} = \frac{0.4 \cdot (1.28 + j0.59) + (1.28 + j0.59)^2 \cdot th(10 \cdot (0.13 + j0.06))}{(1.28 + j0.59) + 0.4 \cdot th(10 \cdot (0.13 + j0.06))} = 1.17 + j0.64 \text{ Ом}$$

б) входное сопротивление троса справа от точки К32 по (5.10)

При больших значениях m , когда $m > 3R_{on}/Z_c$, $Z_{BX}=Z_c$. В данном случае $m=89 > (3R_{on}/Z_c)=21$.

$$\underline{Z}_{BX.B} = \underline{Z}_c = 1.28 + j0.59 \text{ Ом}$$

Определяем \underline{Z}_0 по (5.5):

$$\frac{1}{Z_0} = \frac{1}{1.17 + j0.64} + \frac{1}{1.28 + j0.59} + \frac{1}{10},$$

$$\underline{Z}_0 = 0.6 + j0.27 \text{ Ом}$$

Определяем составляющую тока ГТ по (5.2.а, б):

1) ВЛ включена с обоих концов:

а) ток в ГТ влево от точки К32:

$$\underline{I}_{yp.A} = (1 - (0.72 - j0.18)) \cdot 9.8 = 2.75 + j1.72 \text{ кА}$$

б) ток в ГТ вправо от точки К31:

$$\underline{I}_{yp.B} = (1 - (0.72 - j0.18)) \cdot 2.5 = 0.7 + j0.44 \text{ кА}$$

2) ВЛ включена только со стороны ПС2:

а) ток в ГТ влево от точки К32:

$$\underline{I}_{yp.A} = 0 \text{ кА}$$

б) ток в ГТ вправо от точки К32:

$$\underline{I}_{yp.B} = (1 - (0.72 - j0.18)) \cdot 2.97 = 0.83 + j0.52 \text{ кА}$$

3) ВЛ включена только со стороны ПС1:

а) ток в ГТ влево от точки К32:

$$\underline{I}_{yp.A} = (1 - (0.72 - j0.18)) \cdot 9.45 = 2.65 + j1.66 \text{ кА}$$

б) ток в ГТ вправо от точки К31:

$$\underline{I}_{\text{ур.В}} = 0 \text{ кА}$$

Определяем дополнительную составляющую тока ГТ по (5.4.а, б):

1) ВЛ включена с обоих концов:

а) ток в ГТ влево от точки К32:

$$\underline{I}_{\text{дон.А(Рон)}} = (0.72 - j0.18) \cdot 12.3 \cdot \frac{0.36 + j0.11}{1.17 + j0.64} = 4.2 - j1.32 \text{ кА}$$

б) ток в ГТ вправо от точки К3:

$$\underline{I}_{\text{дон.В(Рон)}} = (0.72 - j0.18) \cdot 12.3 \cdot \frac{0.36 + j0.11}{1.28 + j0.59} = 4.07 - j0.95 \text{ кА}$$

2) ВЛ включена только со стороны ПС2:

а) ток в ГТ влево от точки К32:

$$\underline{I}_{\text{дон.А(Рон)}} = 2.97 \cdot \frac{0.36 + j0.11}{1.17 + j0.64} = 1.02 - j0.32 \text{ кА}$$

б) ток в ГТ вправо от точки К32:

$$\underline{I}_{\text{дон.В(Рон)}} = (0.72 - j0.18) \cdot 2.97 \cdot \frac{0.36 + j0.11}{1.28 + j0.59} = 0.98 - j0.23 \text{ кА}$$

3) ВЛ включена только со стороны ПС1:

а) ток в ГТ влево от точки К32:

$$\underline{I}_{\text{дон.А(Рон)}} = (0.72 - j0.18) \cdot 9.45 \cdot \frac{0.36 + j0.11}{1.17 + j0.64} = 3.23 - j1.01 \text{ кА}$$

б) ток в ГТ вправо от точки К3:

$$\underline{I}_{\text{дон.В(Рон)}} = 9.45 \cdot \frac{0.36 + j0.11}{1.28 + j0.59} = 3.12 - j0.73 \text{ кА}$$

Определяем индуктивную составляющую $\underline{I}_{\text{инд.ф.смежн}}$ по (5.8):

1) ВЛ включена с обоих концов:

$$\underline{I}_{\text{инд.ф.смежн}} = 0.9 \cdot \frac{0.05 + j0.19}{0.13 + j0.151} = 0.797 + j0.388 \text{ кА}$$

2) ВЛ включена только со стороны ПС2:

$$\underline{I}_{\text{инд.ф.смежн}} = 3.4 \cdot \frac{0.05 + j0.19}{0.13 + j0.151} = 3.01 + j1.47 \text{ кА}$$

3) ВЛ включена только со стороны ПС1:

$$\underline{I}_{\text{инд.ф.смежн}} = 2.8 \cdot \frac{0.05 + j0.19}{0.13 + j0.151} = 2.48 + j1.21 \text{ кА}$$

Поскольку от точки КЗ2 до порталов обеих ПС более 10 опор, то расчет дополнительных составляющих по (5.7.а, б, в, г) не требуется.

По (5.1) определяем полный ток в ГТ текущий влево и в право от точки КЗ1:

1) ВЛ включена с обоих концов:

а) ток в ГТ влево от точки КЗ:

$$\underline{I}_{\text{ТА}} = (2.75 + j1.72) + (4.2 - j1.32) + (0.797 + j0.388) = 7.747 + j0.788 \text{ кА}$$

б) ток в ГТ вправо от точки КЗ:

$$\underline{I}_{\text{ТВ}} = (0.7 + j0.44) + (4.07 - j0.95) - (0.797 + j0.388) = 3.973 - j0.898 \text{ кА}$$

2) ВЛ включена только со стороны ПС2:

а) ток в ГТ влево от точки КЗ:

$$\underline{I}_{\text{ТА}} = (1.02 - j0.32) + (3.01 + j1.47) = 4.03 + j1.15 \text{ кА}$$

б) ток в ГТ вправо от точки КЗ:

$$\underline{I}_{\text{ТВ}} = (0.83 + j0.52) + (0.98 - j0.23) - (3.01 + j1.47) = -1.2 - j1.18 \text{ кА}$$

3) ВЛ включена только со стороны ПС1:

а) ток в ГТ влево от точки КЗ:

$$\underline{I}_{\text{ТА}} = (2.65 + j1.66) + (3.23 - j1.01) + (2.48 + j1.21) = 8.36 + j1.86 \text{ кА}$$

б) ток в ГТ вправо от точки КЗ:

$$\underline{I}_{\text{ТВ}} = (3.12 - j0.73) - (2.48 + j1.21) = 0.64 - j1.94 \text{ кА}$$

Ток в ГТ в сторону левого портала значительно больше тока текущего вправо, поэтому рассчитываем термическое воздействия тока КЗ на ГТ для случаев работы УРОВ на ПС1 и неуспешного АПВ на устойчивое КЗ со стороны ПС1 для тока слева. В обоих вариантах считается, что отключение КЗ проводится ТЗНП.

Постоянная времени апериодической составляющей тока $T_a = 0,01 \text{ с}$.

Рассмотрим варианты отключения однофазного КЗ на землю:

1) Отказ выключателя со стороны ПС1 и действие УРОВ.

Согласно рисунку Б.3 отключение в точке КЗ2 со стороны ПС1 производится II-ой ступенью, со стороны ПС2 – III-ей ступенью.

Время отключения КЗ со стороны ПС1 с учетом действия УРОВ по (6.1) и (6.3):

$$t_{откл1} = 0.9 + 0.06 + 0.4 + 0.09 = 1.45 \text{ с}$$

Время отключения КЗ со стороны ПС2 по (6.1) и (6.4):

$$t_{откл2} = 2.5 + 0.06 + 0.08 = 2.64 \text{ с}$$

Определяем интеграл Джоуля по (4.1.в) для тока в ГТ текущего влево от точки КЗ.

Термическое воздействие на ГТ в случае действия УРОВ на ПС1:

$$B_{тер.расч} = 7.79^2 \cdot (1.45 + 0.01) + 5.13^2 \cdot (2.64 - 1.45) + (7.79 - 5.13)^2 \cdot 0.01 = 120 \text{ кА}^2\text{с}$$

2) Отключение КЗ с обоих концов ВЛ с последующим неуспешным АПВ со стороны ПС 1.

Время отключения КЗ со стороны ПС1 по (6.2):

$$t_{откл1} = 0.9 + 0.06 + 0.08 = 1.04 \text{ с}$$

Время отключения КЗ со стороны ПС2 по (6.4):

$$t_{откл2} = 2.5 + 0.06 + 0.08 = 2.64 \text{ с}$$

Время отключения КЗ со стороны ПС1 после неуспешного АПВ:

$$t_{откл3} = 0.1 + 0.06 + 0.08 = 0.24 \text{ с}$$

Термическое воздействие на ГТ слева от точки КЗ в случае неуспешного АПВ со стороны ПС1:

$$B_{тер.расч} = 7.79^2 \cdot (1.04 + 0.01) + 5.13^2 \cdot (2.64 - 1.04) + (7.79 - 5.13)^2 \cdot 0.01 + 8.56^2 \cdot (0.24 + 0.01) = 124 \text{ кА}^2\text{с}$$

Из двух просчитанных вариантов удаления точки однофазного КЗ на землю от портала подстанции, максимальное термическое воздействие оказывается в точке КЗ1 и равняется $149 \text{ кА}^2\text{с}$. Несмотря на то, что время отключения в точке КЗ2 больше по сравнению с точкой КЗ1, из-за снижения тока в ГТ термическое воздействия тока КЗ на ГТ больше в точке КЗ1.

Рекомендации по расчету термической стойкости ГТ и ОКГТ к токам КЗ

Значение термической стойкости должно быть указано в технической документации на каждый тип ГТ или ОКГТ, а также гарантировано производителем и подтверждено испытаниями. В данном разделе рассмотрены методы расчета термической стойкости ГТ или ОКГТ, а выводы носят рекомендательный характер для производителей ГТ и ОКГТ.

Процесс нагрева ГТ (ОКГТ) в условиях КЗ рассматривается как адиабатный процесс [7], т.е. считается, что отсутствует теплообмен между проводником и окружающей средой ввиду маленькой продолжительности воздействия тока КЗ и все выделяемое тепло идет на нагрев проводника. Кроме этого при расчетах для избежания излишнего усложнения можно допустить, что от температуры зависит только электрическое сопротивление проводника, а удельная теплоемкость является независимой от температуры величиной. Помимо этого исключаются из рассмотрения электромагнитное влияние проводника самого на себя и электромагнитное влияние соседних проводников.

Согласно ГОСТ Р 52736 проверка проводников на термическую стойкость при КЗ проводится путем сравнения конечной температуры проводника с предельно допустимой температурой нагрева для данных проводников. Для расчетов используются «Кривые для определения температуры нагрева проводов при КЗ» ГОСТ Р 52736 и [1] по которым определяется значение функции A_9 ($A \cdot c^2 / \text{мм}^4$) для начальной и конечной (предельно допустимой) температур проводника. Определение термической стойкости проводника данного сечения для известной максимально-допустимой температуры ГТ (ОКГТ) выполняется по формуле:

$$B = S^2 \cdot (A_{9\text{доп}} - A_{9\text{н}}) \cdot 10^{-6}, \quad \text{кА}^2\text{с} \quad (\text{В.1})$$

где S (мм^2) – площадь поперечного сечения проводника. Для сталеалюминиевого проводника используется площадь поперечного сечения алюминиевой части проводника.

$A_{9\text{доп}}$ ($A^2 \cdot c / \text{мм}^4$) – значение функции A_9 , соответствующее предельно допустимой температуре нагрева проводника при КЗ.

$A_{9\text{н}}$ ($A^2 \cdot c / \text{мм}^4$) – значение функции A_9 , соответствующее начальной температуре проводника до КЗ.

Термическая стойкость ГТ (ОКГТ) в соответствии с [1] определяется исходя из допустимого для данного сечения ГТ(ОКГТ) тока КЗ протекающем в течение времени t [1]:

- 1) для монометаллического ГТ (ОКГТ):

$$I_{Кдоп} = \frac{S \cdot 10^{-3}}{\sqrt{\frac{t}{A_{9K} - A_{9H}}}}, \text{ кА} \quad (\text{В.2})$$

- 2) для сталеалюминиевого ГТ (ОКГТ):

$$I_{Кдоп} = \frac{S_a \cdot (\rho_a + c \cdot \rho_s) \cdot 10^{-3}}{c \cdot \rho_s \cdot \sqrt{\frac{t}{A_{9K} - A_{9H}}}}, \text{ кА} \quad (\text{В.3})$$

где S – площадь сечения ГТ (ОКГТ), мм²;

A_{9K} – величина, являющаяся функцией температуры ГТ (ОКГТ) после КЗ;

A_{9H} – величина, являющаяся функцией температуры ГТ (ОКГТ) до КЗ;

S_a – площадь сечения алюминиевой части ГТ (ОКГТ);

c – отношение сечений алюминия и стали S_a/S_s ;

ρ_a – удельное сопротивление алюминия, Ом·м;

ρ_s – удельное сопротивление стали, Ом·м;

A_{9K} и A_{9H} – определяются по кривым в соответствии с ГОСТ Р 52736 и [1].

Термическая стойкость ГТ (ОКГТ):

$$B = I_{Кдоп}^2 \cdot t, \text{ кА}^2\text{с} \quad (\text{В.4})$$

Согласно [7,8] конечная температура для данного термически эквивалентного кратковременного тока КЗ вычисляется по формуле:

$$T_2 = \frac{[1 + \alpha \cdot (T_1 - 20)] \cdot e^{\left(\frac{I_T^2 \cdot \rho_{dc} \cdot \alpha \cdot t}{S_1 \cdot S_2 \cdot \gamma \cdot c}\right)} - 1}{\alpha} + 20, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{В.5})$$

Термическая стойкость ГТ (ОКГТ) для данной максимально допустимой конечной температуры нагрева:

$$B_{тер.доп} = \frac{\ln \frac{1 + \alpha \cdot (T_2 - 20)}{1 + \alpha \cdot (T_1 - 20)} \cdot 10^{-6}}{\frac{\rho_{dc} \cdot \alpha \cdot t}{S_1 \cdot S_2 \cdot \gamma \cdot c}}, \text{ кА}^2\text{с} \quad (\text{В.6})$$

где I_T – термически эквивалентный ток, А;

c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);

T_1 – начальная температура, °С;

T_2 – конечная температура, °С;

α – температурный коэффициент сопротивления при 20 °С, 1/К;

ρ_{dc} – удельное сопротивление при 20 °С, Ом·м;

γ – удельная плотность, кг/м³;

S_1 – сечение проводящей части ГТ (ОКГТ), м²;

S_2 – полное сечение ГТ (ОКГТ), м²;

t – длительность короткого замыкания, с.

Применение данных формул для вычисления термической стойкости и конечной температуры проводника выглядит достаточно простым в случае проведения расчетов для проводника, изготовленного из одного металла. В расчетах связанных с сталеалюминевыми проводниками ситуация несколько усложняется из-за того, что помимо хорошо проводящей электрический ток алюминиевой части проводника, в расчетах, в ряде случаев, должна быть принята во внимание и стальная часть проводника.

В [8] рассматриваются пять различных методов для вычисления температуры проводника в процессе адиабатного нагревания в условия КЗ.

Метод 1

Этот метод приводится в [7] и является пригодным только для однородных проводников. В данном методе учитывается только наиболее проводящая часть проводника – алюминий или алюминиевый сплав. Поэтому в выражениях (В.5) и (В.6) будут следующие величины: $S_1=S_2=S_a$, α_a , ρ_a , γ_a , c_a .

Если проводник полностью стальной то: $S_1=S_2=S_s$, α_s , ρ_s , γ_s , c_s .

Методы 2 и 3

В данных методах учитывается помимо алюминиевой также и стальная составляющая проводника. Отличие методов состоит в использовании разных значений удельного сопротивления стали ρ_s . Для этих методов величины в выражениях (В.5) и (В.6):

$$S_1=S_2=S_a+S_s, \alpha_{tot}, \rho_{tot}, \gamma_{tot}, c_{tot}.$$

Метод 4

В методе учитывается удельная теплоемкость обеих составляющих сталеалюминиевого кабеля – алюминия и стали, но при этом не берется в расчет электрическая проводимость стальной части. В выражениях (В.5) и (В.6) в этом случае подставляются следующие величины:

$$S_1=S_a, S_2=S_a+S_s, \alpha_a, \rho_a, \gamma_{tot}, c_{tot}.$$

Метод 5

Метод учитывает зависимость удельной теплоемкости от температуры. Расчет проводится по выражению (В.7). Уравнение решается методом итераций. Величины в выражениях (В.7): $S_1=S_a$, $S_2=S_a+S_s$, α_a , ρ_a , γ_{tot} , c_{tot} , β_{tot} .

$$\begin{aligned} & \frac{-\ln(1+\alpha \cdot T_2 - 20\alpha) \cdot \beta + \beta \cdot \alpha \cdot T_2 + \ln(1+\alpha \cdot T_2 - 20\alpha) \cdot \alpha}{\alpha^2} + \\ & + \frac{\ln(1+\alpha \cdot T_1 - 20\alpha) \cdot \beta - \beta \cdot \alpha \cdot T_1 - \ln(1+\alpha \cdot T_1 - 20\alpha) \cdot \alpha}{\alpha^2} = \frac{I^2 \cdot \rho \cdot t}{S_1 \cdot S_2 \cdot \gamma \cdot c} \end{aligned} \quad (B.7)$$

где β – температурный коэффициент теплоемкости при 20 °С, 1/К.

В перечисленных методах индекс «а» соответствует алюминиевой части провода, индекс «s» - стальной. Величины с индексом «tot» вычисляются по формулам:

$$\alpha_{tot} \approx \frac{\alpha_a \cdot \alpha_s \cdot \left(\frac{\rho_a}{S_a} + \frac{\rho_s}{S_s} \right) + \alpha_a \cdot \frac{\rho_s}{S_s} + \alpha_s \cdot \frac{\rho_a}{S_a}}{\frac{\rho_s}{S_s} + \frac{\rho_a}{S_a} + \alpha_s \cdot \frac{\rho_s}{S_s} + \alpha_a \cdot \frac{\rho_a}{S_a}}, \quad (B.8)$$

$$\rho_{tot} = \frac{\rho_a \cdot \rho_s \cdot (S_a + S_s)}{\rho_a \cdot S_s + \rho_s \cdot S_a}, \quad (B.9)$$

$$\gamma_{tot} = \frac{\gamma_a \cdot S_a + \gamma_s \cdot S_s}{S_a + S_s}, \quad (B.10)$$

$$c_{tot} = \frac{c_a \cdot \gamma_a \cdot S_a + c_s \cdot \gamma_s \cdot S_s}{\gamma_a \cdot S_a + \gamma_s \cdot S_s}, \quad (B.11)$$

$$\beta_{tot} = \frac{c_a \gamma_a \cdot \beta_a S_a + c_s \gamma_s \cdot \beta_s S_s}{c_a \gamma_a \cdot S_a + c_s \gamma_s \cdot S_s}. \quad (B.12)$$

В случае отличия температуры окружающей среды от 20 °С (начальная температура проводника) расчет термической стойкости ГТ и/или ОКГТ проводится по формуле аналогичной выражениям (В.5) и (В.6):

$$T_2 = \frac{[1 + \alpha \cdot (T_1 - T_0)] \cdot e^{\left(\frac{I_{th}^2 \cdot \rho \cdot \alpha \cdot t}{S_1 \cdot S_2 \cdot \gamma \cdot c} \right)} - 1}{\alpha} + T_0, \quad ^\circ\text{C} \quad (B.13)$$

$$B = \frac{\ln \frac{1 + \alpha \cdot (T_2 - T_0)}{1 + \alpha \cdot (T_1 - T_0)} \cdot 10^{-6}}{\rho_T \cdot \alpha \cdot t}, \quad \text{кА}^2\text{с} \quad (\text{В.14})$$

$$S_1 \cdot S_2 \cdot \gamma \cdot c$$

где T_0 – температура окружающей среды, °С;

ρ_T – удельное сопротивление при температуре окружающей среды T , Ом·м.

Значение ρ_T вычисляется по формуле:

$$\rho_T = \rho_{dc} \cdot (1 + \alpha \cdot (T_0 - 20)), \quad \text{Ом} \cdot \text{м} \quad (\text{В.15})$$

11.1 Результаты расчетов термической стойкости ГТ (ОКГТ), полученные по методам 1, 2, 3, 4, а также по выражениям (В.1-В.4) сильно отличаются друг от друга и не все расчеты приближены к результатам тестовых замеров температуры проводников в лабораторных условиях.

11.1.1 Расчеты по выражению (В.5), проводимые по методу 1, дают результаты с наибольшими значениями среди всех перечисленных методов. Они также превосходят значения лабораторных замеров, что особенно сильно заметно для ГТ (ОКГТ) со значительной площадью сечения стали. Использование этого метода рекомендовано только для полностью стальных ГТ (ОКГТ). Расчеты термической стойкости ГТ (ОКГТ) по методам 2, 3, 4 дают достаточно близкие результаты по отношению друг к другу при сечении стальной составляющей ГТ (ОКГТ) равной $0,5 \cdot S_a$ и ниже (рисунок В.1). При этом с увеличением площади сечения стальной составляющей погрешность расчетов по этим методам возрастает, и особенно это заметно при применении метода 4, использование которого нецелесообразно при площади сечения стальной составляющей S_s равной $0,5 \cdot S_a$ и выше.

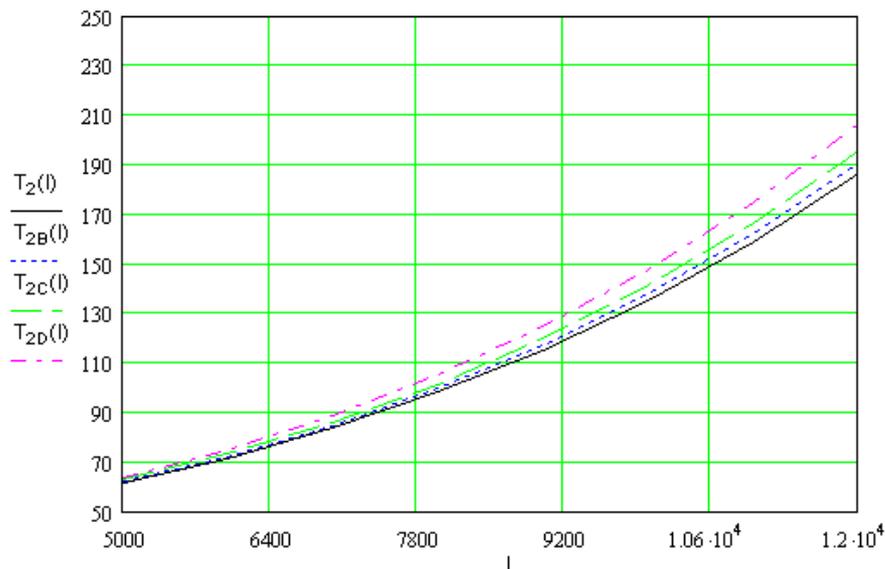


Рисунок В.1 Зависимость конечной температуры для ОКГТ 1 от тока КЗ
 T_2 – метод 2/3, T_{2B} – метод 2, T_{2C} – метод 3, T_{2D} – метод 4.

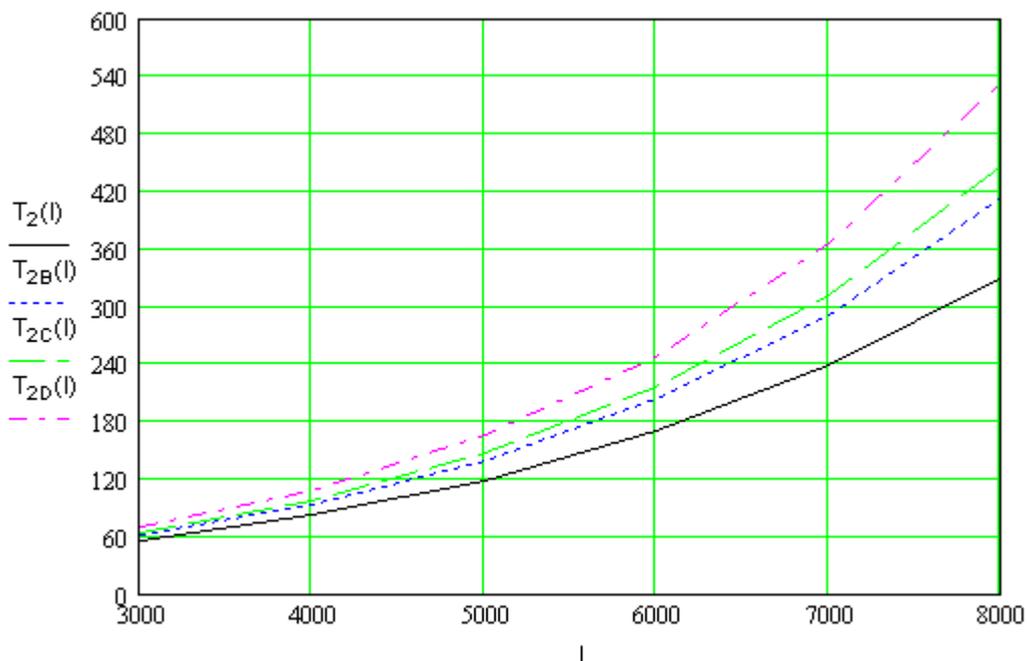


Рисунок В.2 Зависимость конечной температуры для ОКГТ 2 от тока КЗ

T₂ – метод 2/3, T_{2B} – метод 2, T_{2C} – метод 3, T_{2D} – метод 4.

В худшем случае для проводников с большой площадью сечения стали относительно алюминиевой части, результатов расчетов по методу 4 могут быть занижены в 2-3 раза (Таблица В.1 и рисунок В.3).

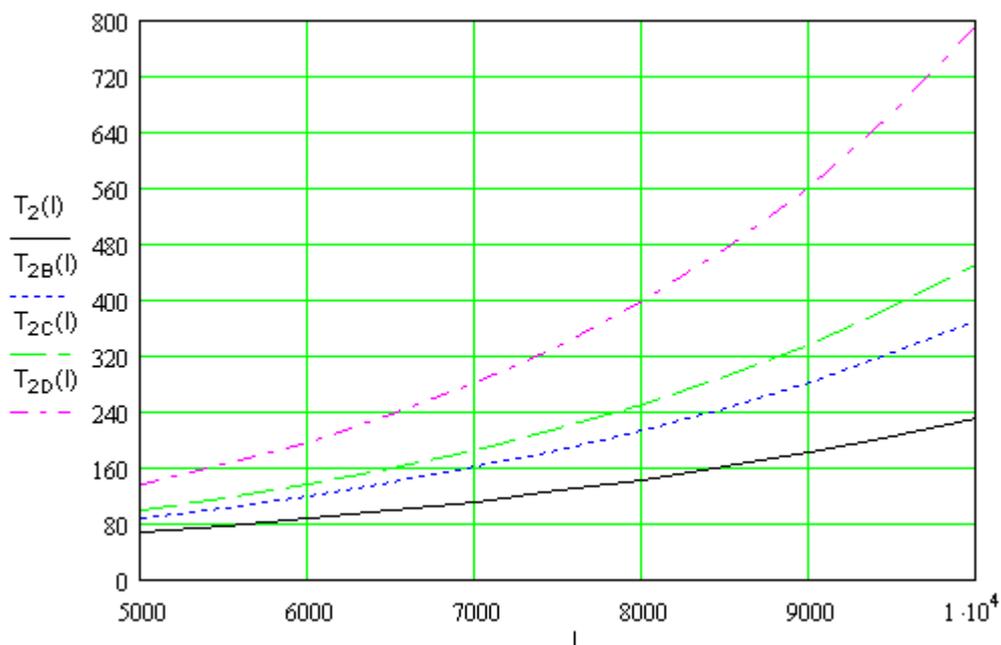


Рисунок В.3 Зависимость конечной температуры для ОКГТ 3 от тока КЗ

T₂ – метод 2/3, T_{2B} – метод 2, T_{2C} – метод 3, T_{2D} – метод 4.

11.1.2 Разница результатов полученных по методам 2 и 3 невелика так как единственное отличие методов состоит в различных значениях

сопротивления для стали. Но следует учитывать, что в случае проведения расчетов для проводника, в котором сечение стали в несколько раз больше сечения алюминия, разница между этими методами может быть значительной и достигать 10-15 %.

Для ГТ (ОКГТ) с площадью сечением стальной составляющей S_s равной $0,5 \cdot S_a$ и выше рекомендуется воспользоваться теми же формулами, что и для методов 2, 3, но при этом в качестве исходных величин α , c , ρ_{dc} , γ использовать значения, соответствующие применяемой марке стали.

11.1.3 Применение метода 5 дает результаты на 3 % - 5 % меньше в сравнении с методом 4, в котором удельная теплоемкость является постоянной величиной. Поскольку результаты расчетов по методу 4 в зависимости от соотношения S_s и S_a являются близкими к методам 2, 3, либо сильно заниженными, то использование метода 5 представляется нецелесообразным.

11.1.4 Для сравнения в Таблице В.1 приведены результаты расчетов по вышеизложенным методам для трех типов ОКГТ с различным соотношением S_s/S_a и для провода марки АС70/72. На рисунках В.1-В.3 приведены графики изменения температуры ОКГТ в зависимости от тока КЗ для трех типов ОКГТ, представленных в Таблице В.1.

Таблица В.1 Результаты расчетов

ОКГТ (данные от производителя) / Метод	Терм. стойкость по Методу 2, $\text{кА}^2\text{с}$	Терм. стойкость по Методу 3, $\text{кА}^2\text{с}$	Терм. стойкость по Методу 4, $\text{кА}^2\text{с}$	Терм. стойкость по Методу 2/3 со значениями соответствующими марке стали, $\text{кА}^2\text{с}$	Терм. стойкость по выражению (В.1), ГОСТ Р 52736, $\text{кА}^2\text{с}$	Терм. стойкость по выражению (В.4), [1], $\text{кА}^2\text{с}$
ОКГТ 1 $S_s=47\text{мм}^2$, $S_a=96\text{мм}^2$, $B=141 \text{кА}^2\text{с}$ $T_1=40 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_2=180 \text{ }^\circ\text{C}$	136	132	125	139	85	100
ОКГТ 2 $S_s=38\text{мм}^2$, $S_a=34\text{мм}^2$, $B=45 \text{кА}^2\text{с}$ $T_1=25 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_2=200 \text{ }^\circ\text{C}$	36	34	30	42	13	19
ОКГТ 3 $S_s=91\text{мм}^2$, $S_a=24\text{мм}^2$, $B=81 \text{кА}^2\text{с}$ $T_1=25 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_2=200 \text{ }^\circ\text{C}$	60	53	37	88	7	18

Окончание табл. В.1

ОКГТ (данные от производителя) / Метод	Терм. стойкость по Методу 2, $\text{кА}^2\text{с}$	Терм. стойкость по Методу 3, $\text{кА}^2\text{с}$	Терм. стойкость по Методу 4, $\text{кА}^2\text{с}$	Терм. стойкость по Методу 2/3 со значениями соответствующими марке стали, $\text{кА}^2\text{с}$	Терм. стойкость по выражению (В.1), ГОСТ Р 52736, $\text{кА}^2\text{с}$	Терм. стойкость по выражению (В.4), [1], $\text{кА}^2\text{с}$
АС 70/72 $S_s=72\text{мм}^2$, $S_a=68\text{мм}^2$ B^1 $T_1=25\text{ }^\circ\text{C}$ $T_2=200\text{ }^\circ\text{C}$	146	142	127	-	55	76

Примечание. ¹ Величина В (термической стойкости) для АС проводов и АЖС тросов отечественного производства не гарантируется производителями и не подтверждается испытаниями, что противоречит требованиям МЭК. Значение термической стойкости этих изделий определяется расчетными методами в соответствии с ГОСТ Р 52736 и [1].

Как видно из Таблицы В.1, полученные результаты расчетов по выражениям (В.1-В.4) являются сильно заниженными по отношению к методам 2, 3, 4, особенно это касается выражения (В.1). Некоторое различие между расчетными величинами и данными производителей ОКГТ обусловлено применением в расчетных формулах для параметров стали и алюминия табличных значений, поскольку точные данные по материалам применяемых при изготовлении того или иного типа ОКГТ известны только производителю.

Для расчетов термической стойкости монометаллического ГТ (ОКГТ) рекомендуется применять метод 1. Для расчетов сталеалюминиевого ГТ (ОКГТ) рекомендуется воспользоваться теми же формулами, что и для методов 2, 3, используя для исходных величин α , c , ρ_{dc} , γ значения, соответствующие применяемой марке стали. Данными методами определения термической стойкости ОКГТ пользуются наиболее крупные мировые производители и результаты расчетов близки к экспериментальным замерам при испытаниях ОКГТ.

Библиография

1. Методические указания по расчету термической устойчивости грозозащитных тросов воздушных линий электропередачи. № 5290 тм-Т1, ВГПИ и НИИ «Энергосетьпроект», Москва, 1976.
2. Расчет распределения тока при коротком замыкании на опоре ВЛ. Электротехника (Германия), 1971, А9, 2 (Berechnung der Nullstromverteilung bei Erdkurzschluss einer Freileitung. Electrotechnz, 1971, А9, 2). Перевод в Экспресс-информации «Электрические станции, сети и системы» № 18. 1971.
3. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 11. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110-750 кВ, М., «Энергия», 1979.
4. Расчет термической устойчивости грозозащитных тросов воздушных линий электропередачи. Богданова О.И., Барабанов Ю.А., Дементьев Ю.А., Механошин Б.И., Сиденков Д.В., Орешкин А.В., Шкалов А.А. М., «Электрические станции», № 8, 2001.
5. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах Ульянов С.А., М-Л, «Энергия», 1964.
6. Правила Устройства Электроустановок (ПУЭ) – 7 издание. Утверждены приказом Минэнерго России от 08.07.2002 № 204.
7. МЭК 60865-1 Токи короткого замыкания. Расчет эффектов. Часть 1. Определения и методы расчета, 2011. (IEC 60865-1 ed.3.0 Short-circuit currents - Calculation of effects - Part 1: Definitions and calculation methods, 2011).
8. Термическое поведение проводов воздушных линий электропередачи. Раздел 4: Математическая модель для оценки температуры провода в адиабатическом состоянии. Электра № 185, стр. 74-87, R. Stephen, M. Gaudry, R. Arteta, F. Jakl, R. Kleveborn, R. Kimata, L. Larsen, G. Mirosevic, Y. Motlis. Y. Ojala, H. Pohlmann, T.O. Seppa, M.J. Tunstall, L. Vagra, M. Vincent., Париж, 1999. (The thermal behaviour of overhead conductors. Section 4: Mathematical model for evaluation of conductor temperature in the adiabatic state, Electra № 185, p. p. 74-87, Paris, 1999).
9. Определение сечений грозозащитных тросов линий электропередачи с учетом их термической устойчивости. Генов Л. и др., М., Электричество, № 4, 1972.