



**ФИЛИАЛ ОАО «РЖД»
ЦЕНТРАЛЬНАЯ ДИРЕКЦИЯ
ИНФРАСТРУКТУРЫ**

**УПРАВЛЕНИЕ
ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ
И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Каланчевская ул. 35, г. Москва, 107174
Тел.: (499) 262-50-33, факс: (499) 262-08-66
E-mail: secretarycdi@center.rzd.ru, www.rzd.ru

16.01.2012 № ЦЭт-2/1

на № _____ от _____

Начальникам служб электрификации и электроснабжения дирекций инфраструктуры железных дорог России (по списку)

Руководителям проектно-изыскательских организаций (по списку)

Генеральному директору ООО "НИИЭФА-ЭНЕРГО"

Директору Проектно-конструкторского бюро по электрификации железных дорог

**ТЕХНИЧЕСКОЕ УКАЗАНИЕ № П-01/12
об утверждении инструкции о порядке расчёта и выбора уставок защиты
тяговой сети постоянного тока**

В целях установления единого порядка выбора уставок защит тяговой сети постоянного тока:

1. Утвердить прилагаемую Инструкцию о порядке расчёта и выбора уставок защиты тяговой сети постоянного тока (далее – Инструкцию).

2. Начальникам служб электрификации и электроснабжения дирекций инфраструктуры железных дорог:

- 1) организовать изучение Инструкции причастным персоналом;
- 2) обеспечить выбор уставок защит тяговой сети постоянного тока в соответствии с Инструкцией.

Приложение: на 96 в 1 экз. (не рассыпается, для тиражирования на дорогах размещено на сайте Департамента по адресу <http://10.248.0.156/>).

Начальник Управления

В.Г.Лосев

Исп. Ранта А.Р., ЦЭ
Тел. (499) 262-40-05

УТВЕРЖДЕНА

техническим указанием

Управления электрификации и электро-
снабжения Центральной дирекции инфра-
структурь – филиала ОАО «РЖД»

от 16 января 2012 г.

№ ЦЭт-2/Г (П-01/12)

ИНСТРУКЦИЯ

о порядке расчета и выбора уставок защиты тяговой сети постоянного тока

2012

Содержание

1 Общие положения.....	3
2 Основные требования к защитам.....	7
2.1 Общие требования.....	7
2.2 Выдержка времени	9
2.3 Показатели устойчивости функционирования	10
3 Расчетные параметры нормального режима.....	14
3.1 Общие положения	14
3.2 Интервалы попутного следования	15
3.3 Число поездов в зоне питания	17
3.4 Пусковые токи поездов	19
3.5 Средние токи присоединений	21
3.6 Границные значения действующих электрических величин	24
4 Схемы питания и расчетные схемы	27
4.1 Схемы питания	27
4.2 Расчетные схемы	30
4.3 Параметры схем замещения	35
4.4 Вычисление параметров короткого замыкания для расчетных схем	46
5 Выбор уставок защит	50
5.1 Общие положения	50
5.2 Максимальная импульсная токовая защита	56
5.3 Токовая отсечка.....	58
5.4 Максимальная токовая защита прямого направления	61
5.5 Максимальная токовая защита обратного направления	68
5.6 Защита минимального напряжения	70
5.7 Дистанционная защита	73
5.8 Защита по скорости нарастания тока	77
5.9 Защита по приращению тока	80
5.10 Квазитепловая защита.....	83
5.11 Выбор уставок защиты при профилактическом подогреве проводов и плавке гололеда	93
6 Особенности защиты при опорах, не соединенных с рельсами	93
Библиография	96

1 Общие положения

1.1 Настоящая Инструкция разработана с учетом требований [1, 2, 3] и распространяется на все устройства, комплекты и полный состав защит от токов короткого замыкания в тяговой сети постоянного тока вне зависимости от их конструктивного выполнения, реагирующих на следующие воздействующие величины: ток, напряжение, отношение напряжения к току (сопротивление), а также скорость нарастания и приращение тока.

Инструкция распространяется на используемые защиты, а также на те, которые в дальнейшем могут использоваться дополнительно:

- максимальная и максимальная импульсная токовые защиты, реализуемые автоматическими быстродействующими выключателями;
- все виды защит, входящие в интеллектуальный терминал присоединения ЦЗАФ-3,3;
- токовая отсечка или максимальная токовая защита, реализуемые с помощью специальных датчиков тока или герконовых реле;
- защита минимального напряжения, реализуемая с помощью датчика напряжения (например, типа ДН-4С производства НИИФА-ЭНЕРГО);
- защита ЗОИР (при опорах, не соединенных с рельсами).

1.2 Уставки защит каждого присоединения следует выбирать по условиям обеспечения требований устойчивости функционирования.

Для селективных защит этими условиями являются:

- а) чувствительность к коротким замыканиям в пределах защищаемой зоны (внутренние короткие замыкания);
- б) отстроенность от режимов нормальной работы защищаемого присоединения;
- в) отстроенность от коротких замыканий за пределами защищаемой зоны (внешние короткие замыкания).

Для неселективных защит условие (в) к защите не предъявляют. В этом случае требуется предусматривать исправление неселективных действий защиты (излишних отключений при внешних коротких замыканиях) с помощью АПВ.

В зависимости от зоны действия конкретных устройств защиты реализация этих условий может осуществляться одним устройством (например, быстродействующим выключателем), комплектом или полным составом защит. Выбор уставок с учетом указанных условий следует выполнять в соответствии с 2.3. Устройство защиты, выполняющее условие (в), может снабжаться выдержкой времени в соответствии с 2.2.

Примечания

1 Под устройством защиты понимают конструктивные элементы или программное обеспечение, выполняющие функции какой-либо одной конкретной защиты (например, токовой отсечки, или максимальной импульсной токовой защиты, или защиты по сопротивлению минимальной, или др.). Устройство защиты может выполняться в виде единой конструкции с автоматическим быстродействующим выключателем, либо в виде отдельной конструкции с воздействием на схему управления этого выключателя.

2 Под комплектом защит понимают конструктивный блок или интеллектуальный тер-

минал присоединения, состоящий из нескольких устройств защиты, исключая защиту, осуществляющую автоматическим быстродействующим выключателем. Комплект защит совместно с защитой, реализуемой автоматическим быстродействующим выключателем, образуют полный состав защит.

3 Под защищаемой зоной понимают требуемую длину участка тяговой сети, в любой точке которой короткие замыкания должны быть обнаружены какой-либо защитой. Длина защищаемой зоны зависит от схемы питания в соответствии с 2.1.2 и не связана со свойствами защиты.

4 Под зоной действия устройства защиты понимают наибольшую длину тяговой сети, начиная от места установки выключателя с рассматриваемой защитой, короткие замыкания в пределах которой данное устройство способно надежно обнаружить. Длина зоны действия устройства защиты, в зависимости от ее свойств, может быть как меньше, так и больше длины защищаемой зоны.

5 В дальнейшем тексте настоящей инструкции для краткости не употребляются определения «автоматический быстродействующий» при слове «выключатель».

1.3 Правила выбора граничных значений воздействующих величин:

а) выбор уставок устройства или полного состава защиты, которые обеспечивают выполнение условий 1.2, следует выполнять для граничных значений воздействующих электрических величин как в нормальном режиме работы так и при коротком замыкании;

б) граничные, т.е. наибольшие (например, ток) или наименьшие (например, напряжение, сопротивление), значения воздействующей электрической величины для каждого из устройств защиты, соответствующие нормальному режиму работы, следует вычислять по 3. Вычисления необходимо выполнять для заданной схемы питания контактной сети и максимального числа поездов, одновременно находящихся в зоне питания данного присоединения в час интенсивных перевозок, причем один из поездов с наибольшим пусковым током находится возле того объекта (тяговая подстанция, пост секционирования, пункт параллельного соединения), уставка защиты на присоединении которого выбирается;

в) граничные значения воздействующей электрической величины для каждого из устройств защиты, соответствующие режиму короткого замыкания, следует вычислять по 4 для расчетной схемы питания контактной сети в соответствии с таблицей 5.2. При вычислении граничного значения воздействующей электрической величины, соответствующей наименьшему току при коротком замыкании в конце защищаемой зоны, необходимо учитывать параметры дуги и сопротивление троса группового заземления (при его наличии) в соответствии с 4.3.3.

1.4 Исходными данными для расчётов, указанных в 1.3, применительно к каждой из межподстанционных зон являются:

- конструктивные данные:

1) схема питания и секционирования контактной сети;
2) план контактной сети, питающих, отсасывающих и шунтирующих линий;

3) сопротивление энергосистемы или мощность короткого замыкания на вводах тяговых подстанций, ограничивающих межподстанционную зону при заданной схеме питания;

4) тип и количество силовых трансформаторов и преобразовательных агрегатов на ограничивающих межподстанционную зону тяговых подстанциях;

5) марка и количество проводов и тросов на каждом из участков контактной сети, питающих, отсасывающих и шунтирующих линий;

6) марка троса группового заземления опор контактной сети (при его наличии), в расчетной точке короткого замыкания вблизи поста (или постов, если их несколько) секционирования и его длина от наиболее удалённой опоры до точки подключения троса группового заземления к рельсу или средней точке дроссель-трансформатора;

7) индуктивность реакторов сглаживающих устройств на ограничивающих межподстанционную зону тяговых подстанциях (необходимо только в случаях использования защиты по скорости нарастания тока);

- эксплуатационные данные:

1) размеры движения и интервал между поездами;

2) доля поездов максимальной массы от общего количества поездов;

3) массы поездов;

4) средняя скорость движения поездов на участке или среднее время прохода поездом рассматриваемой зоны;

5) пусковые токи и токи часового режима для электровозов (электропоездов), обращающихся на участке;

6) наибольшее приращение тока электровоза (электропоезда) при пуске, определяемое по токовой характеристике (только для защиты по скорости нарастания или по приращению тока).

1.5 Предусмотрен следующий порядок расчетов:

- для конкретного участка и рассматриваемого присоединения в соответствии с 2 выбирают основную, резервную и дополнительную защиты по 2.1.4. Для присоединения, на котором быстродействующий выключатель не снабжен дополнительно самостоятельными защитами, резервную и дополнительную защиты не выбирают;

- вычисляют электрические параметры (воздействующие электрические величины), на которые не должна реагировать (быть отстроенной) рассматриваемая защита в нормальном режиме работы присоединения при наибольшей расчетной нагрузке по 1.3 и 3;

- на основе таблицы 5.2 устанавливают номер нормативной расчетной схемы для вычисления параметров (воздействующих электрических величин) короткого замыкания, на которые должна реагировать рассчитываемая защита;

- для каждого устройства защиты вычисляют по разделам 4 и 5 параметры воздействующих электрических величин, на которые она реагирует, при коротком замыкании для требуемых расчетных схем;

- по разделу 2 выбирают уставки защит с соблюдением условий устойчивости функционирования, определяемых нормативными значениями коэффициентов отстройки k_{otc} и чувствительности k_q , а также запаса k_3 , возврата k_v и адаптации k_a (для адаптивных защит).

1.6 Если выбранная защита не удовлетворяет требованиям устойчивости

функционирования по 1.2, то следует рассмотреть возможность использования следующих мер:

- корректировку наибольшего (пикового) значения пускового тока электровоза (электропоезда) I_{tp} с учетом используемых в эксплуатации действительных режимов трогания состава поезда с места;

- применение защит, реагирующих на другие или дополнительные признаки короткого замыкания;

- обеспечение требований 2.23.1, 2.23.11 [2] и 2.1.1, 3.3.2 [3] в части длины и сечения троса группового заземления за счет, например: уменьшения его длины или/и увеличения его сечения, отказ от использования группового заземления, по крайней мере возле поста секционирования и возле тяговых подстанций (в конце зоны защиты) на длине не менее 2 км, и применение в этой зоне только индивидуальных заземлителей опор;

- увеличение сечения проводов контактной сети;

- применение в межподстанционной зоне короткозамыкателей;

- применение пунктов преобразования напряжения системы тягового электроснабжения повышенного напряжения (ППН);

- другие возможные меры.

1.7 Расчёты и выбор уставок защит должны выполняться:

- на стадии проектирования электрификации или реконструкции действующего участка – проектно-изыскательской организацией, участвующей в проектировании;

П р и м е ч а н и е – Такой же порядок применяется в случае реконструкции только части из объектов, влияющих на перечисленные в 1.4 исходные данные для расчётов.

- на стадии эксплуатации действующих участков – персоналом дистанций электроснабжения, дорожных электротехнических лабораторий или дорожных центров диагностики хозяйства электроснабжения (в случае совместного выполнения – в соответствии с распределением обязанностей, установленным начальником службы электрификации и электроснабжения).

1.8 В случае выполнения расчётов и выбора уставок персоналом дистанции электроснабжения для межподстанционных зон, являющихся пограничными между двумя дистанциями электроснабжения:

- расчёты выполняются дистанцией, имеющей на балансе большую по эксплуатационной длине электрифицированных путей часть межподстанционной зоны;

- исходные данные, относящиеся к электроустановкам соседней дистанции электроснабжения, предоставляются этой дистанцией.

1.9 В отношении межподстанционных зон, являющихся пограничными между двумя железными дорогами, обязанности и ответственность распределяются следующим образом:

- расчёты и выбор уставок по главным путям межподстанционных зон Пибаньшур – Чепца, Называевская – обп 2546 км и Нижняя – 19 км выполняются Свердловской железной дорогой;

- расчёты и выбор уставок по главным путям межподстанционных зон Исилькуль – Юнино и Чуга – Колчедан выполняются Южно-Уральской желез-

ной дорогой;

- расчёты и выбор уставок по главным путям межподстанционной зоны Марииинск – 3702 км выполняются Западно-Сибирской железной дорогой;

- расчёты и выбор уставок по главным путям межподстанционных зон Вад – Кустарёвка, Усад – Петушки и Поварово-2 – Крюково (Подсолнечная, по всем ветвям) выполняются Московской железной дорогой;

- расчёты и выбор уставок по главным путям межподстанционной зоны Ерал – Кропачёво выполняются Куйбышевской железной дорогой;

- расчёты и выбор уставок по главным путям межподстанционной зоны Александров – Балакирево выполняются Северной железной дорогой;

- расчёты и выбор уставок по главным путям межподстанционной зоны Курск – Конарево выполняются Юго-Восточной железной дорогой;

- расчёты и выбор уставок по главным путям межподстанционной зоны Черусти – Ильичёв выполняются Горьковской железной дорогой;

- расчёты и выбор уставок по путям, не пересекающим границу железных дорог, выполняются дорогой-балансодержателем соответствующей тяговой подстанции или поста секционирования;

- исходные данные, относящиеся к электроустановкам соседней железной дороги, предоставляются этой дорогой.

1.10 Результатом мероприятий по расчёту и выбору уставок является утверждённая карта уставок защит и автоматики выключателей распределительных устройств напряжением 3,3 кВ постоянного тока по соответствующей дистанции электроснабжения.

2 Основные требования к защитам

2.1 Общие требования

2.1.1 Выбранные уставки полного состава защиты должны обеспечивать надежное отключение выключателя при коротком замыкании в любой точке защищаемой зоны при нормальной схеме питания контактной сети и в случае вывода из работы поста секционирования с требуемыми коэффициентами чувствительности в соответствии с 2.3.

Кроме того, должны быть определены особые (меньшие по току, большие по сопротивлению) уставки, вводимые по приказу энергодиспетчера, соответствующие вынужденной схеме питания контактной сети (отключение одной смежной тяговой подстанции, отключение пункта преобразования напряжения системы тягового электроснабжения постоянного тока повышенного напряжения), при временном ограничении размеров движения (пропуск одного поезда максимальной массы в межподстанционной зоне) в соответствии с 2.11 [1].

Допускается каскадное действие защит, т.е. срабатывание защиты данного выключателя на одном конце защищаемой линии после отключения выключателя на противоположном конце этой линии или/и на пунктах параллельного соединения из-за возрастания тока, протекающего через данный выключатель.

2.1.2 Защищаемая зона для защиты какого-либо присоединения тяговой подстанции должна ограничиваться:

- со стороны тяговой подстанции – выключателем этого присоединения;
- с противоположной стороны:

1) для межподстанционных зон с односторонним питанием без поста секционирования – наиболее удалённой точкой контактной сети;

2) для межподстанционных зон с двухсторонним питанием без поста секционирования – сборными шинами смежной тяговой подстанции;

3) для межподстанционных зон с одно- и двухсторонним питанием с одним постом секционирования – сборными шинами поста секционирования;

4) для межподстанционных зон с двухсторонним питанием с двумя постами секционирования – сборными шинами ближайшего к рассматриваемой тяговой подстанции поста секционирования.

Защищаемая зона для защиты какого-либо присоединения поста секционирования должна ограничиваться:

- со стороны поста секционирования – выключателем этого присоединения;

- с противоположной стороны:

1) для межподстанционных зон с односторонним питанием – наиболее удалённой точкой контактной сети;

2) для межподстанционных зон с двухсторонним питанием и одним постом секционирования – сборными шинами смежной тяговой подстанции;

3) для межподстанционных зон с двухсторонним питанием и двумя постами секционирования – сборными шинами ближайшей к посту секционирования тяговой подстанции, либо сборными шинами соседнего поста секционирования.

Во всех случаях, указанных выше, в расчёт не принимаются посты секционирования, на которых секционированы только ответвления от контактной сети.

2.1.3 Уставку выключателя, не снабженного дополнительно отдельными самостоятельными устройствами защит или их комплектом, следует выбирать по 2.3 и формулам (2.4) или (2.5) и (2.8) с учетом условий (а) и (б) по 1.2 и 2.1.1.

2.1.4 Выключатель совместно с одним или несколькими отдельными самостоятельными устройствами защит или их терминалом (воздействующими на схему управления этого выключателя) образуют многофункциональный и многопараметрический полный состав защит с индивидуальными уставками каждого отдельно взятого устройства защиты, включая и сам выключатель. Для выбора уставок каждого из устройств этих защит следует предварительно установить их назначение по следующим группам:

- основная;
- резервная;
- дополнительная.

2.1.5 Зона действия основной защиты должна полностью перекрывать длину защищаемой зоны, а время действия должно быть меньше чем у других защит, перекрывающих эту же защищаемую зону. Защиты с более высоким быстродействием, но с зоной действия только на части защищаемой зоны, к основной не относятся. Если быстродействующий выключатель дополнительно

снабжен одним или несколькими устройствами самостоятельных защит, зоны действия которых перекрывают всю защищаемую зону, то в качестве основной принимают защиту с наименьшим временем действия.

Уставку основной защиты необходимо выбирать с учетом условий (а) и (б) по 1.2 и 2.3.2. Выдержку времени не используют. При уставке быстродействующего выключателя, выбранной в соответствии с 2.1.3, он и в полном составе защит, как правило, осуществляет основную защиту.

2.1.6 Резервная защита обеспечивает повышение надежности за счет дублирования действия основной защиты (осуществляет ближнее резервирование). Зона ее действия должна быть не меньше, чем длина защищаемой зоны. Уставку резервной защиты необходимо выбирать по 2.3 с учетом требований по 1.2 и 2.1.1. Для выполнения условий 1.2, в устройстве резервной защиты может быть предусмотрена выдержка времени в соответствии с 2.2. Допускается использование резервной защиты без выдержки времени при условии исправления ее излишних действий при внешних коротких замыканиях с помощью АПВ.

В качестве резервной на тяговых подстанциях могут быть использованы дистанционная защита, максимальная токовая защита (если ее уставка отвечает формулам (2.5) и (2.8), т.е. обеспечивает выполнение условий (а) и (б) по 1.2) и защита по приращению тока.

2.1.7 Дополнительная защита является не обязательной, но желательной. Ее следует применять на тяговых подстанциях для улучшения каких-либо показателей основной защиты, например, для повышения надежности и ускорения отключений близких к подстанции коротких замыканий. Зона действия дополнительной защиты меньше защищаемой зоны тяговой сети. В качестве дополнительной защиты могут использоваться токовая отсечка (зона действия от 40 до 70 % длины защищаемой зоны) и защита по скорости нарастания тока (зона действия до 3 км), входящие в состав терминала ЦЗАФ-3,3. Уставку этих защит следует выбирать в соответствии с 2.3.4, 2.3.5 и 5.8.

П р и м е ч а н и е – Если уставка выключателя, выбранная по условию (2.8) отстройки от максимальных нагрузок нормального режима, не удовлетворяет условию (2.4) чувствительности к коротким замыканиям в конце защищаемой зоны, то выключатель с такой уставкой может осуществлять только дополнительную защиту в виде токовой отсечки на части межподстанционной зоны. В этом случае в качестве основной следует использовать дистанционную защиту, при условии что ее уставка в соответствии с 2.3.2 удовлетворяет условиям (2.3) и (2.10).

2.1.8 Запасный выключатель на тяговой подстанции следует оборудовать теми же защитами, что и выключатели других присоединений контактной сети. Уставки защит принимают как для присоединения, имеющего наименьший ток короткого замыкания.

2.2 Выдержка времени

2.2.1 Выдержку времени следует использовать для отстройки селективных устройств защиты от внешних коротких замыканий в соответствии с условием (в) по 1.2. При наличии выдержки времени возрастает время воздействия

электрической дуги тока короткого замыкания на провода контактной сети и вероятность их пережога.

В целях снижения этой вероятности предпочтительно все устройства защиты выполнять без выдержки времени (неселективными). Для исправления возникающих в этом случае излишних действий защиты при внешних (за пределами защищаемой зоны) коротких замыканиях следует предусматривать автоматическое повторное включение (АПВ) с предварительным испытанием контактной сети на наличие короткого замыкания.

2.2.2 Если при использовании защит, которые воздействуют на цепь управления выключателя без выдержки времени, число излишних (при внешних коротких замыканиях) действий признается в условиях эксплуатации слишком большим, то допускается для резервных устройств защиты применить выдержку времени.

Решение о применении выдержки времени в резервных устройствах защиты для рассматриваемой межподстанционной зоны принимает начальник службы электрификации и электроснабжения.

2.2.3 Выдержку времени устройства резервной защиты следует принимать как ближайшую большую из ряда 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30 с при условии, что выбранное значение будет в 2,5 раза превышать паспортное значение полного времени отключения того выключателя, который должен отключаться при внешних коротких замыканиях. Например, для защиты на тяговой подстанции выдержку времени определяют по полному времени отключения выключателя поста секционирования. Если полное время отключения последнего составляет 0,05 с, то выдержка времени резервной защиты на подстанции должна быть не менее $2,5 \cdot 0,05 = 0,125$ с. Ближайшее большее значение из указанного ряда равно 0,15 с.

Допускается принимать выдержку времени на одну ступень больше вычисленной (в приведенном примере это 0,2 с), но в любом случае не более 0,3 с.

2.3 Показатели устойчивости функционирования

2.3.1 Состав защит каждого из выключателей должен обеспечить требования по 1.2.

2.3.2 Чувствительность к коротким замыканиям основных и резервных защит при выборе их уставок подлежит оценке по коэффициенту чувствительности $\kappa_{\text{ч}}$, значение которого, соответственно, для токовых (входная воздействующая величина – ток), минимального напряжения (входная воздействующая величина – напряжение) и дистанционных (входные воздействующие величины – ток и напряжение) защит определяют по формулам:

$$\kappa_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{k,min}}}{I_y}, \quad (2.1)$$

$$\kappa_{\text{ч}} = \frac{U_y}{U_{\text{k,max}}}, \quad (2.2)$$

$$\kappa_{\text{ч}} = \frac{R_y}{R_k}, \quad (2.3)$$

где $I_{k,\min}$ – наименьшее значение тока, протекающего через выключатель с рассматриваемой защитой, при коротком замыкании в конце зоны защиты или зоны резервирования;

$U_{k,\max}$ – наибольшее значение напряжения на шинах, к которым подключен выключатель с рассматриваемой защитой, при коротком замыкании в конце зоны защиты;

R_k – значение отношения напряжения на шинах, к которым подключен выключатель с рассматриваемой защитой, к протекающему через этот выключатель току (сопротивление цепи короткого замыкания) при повреждении в конце защищаемой зоны или зоны резервирования;

I_y , U_y , R_y – уставки защит, реагирующих, соответственно, на возрастание тока, на снижение напряжения, на снижение отношения напряжения к току (сопротивление).

Для защит по скорости нарастания тока dI/dt или приращению тока ΔI в выражении (2.1) вместо $I_{k,\min}$ и I_y используют те соответствующие параметры, на которые реагирует защита, т.е. $(dI/dt)_{k,\min}$ и $(dI/dt)_y$ или $\Delta I_{k,\min}$ и ΔI_y .

Для максимальной токовой защиты, реализуемой выключателями с пониженной чувствительностью к параметрам переходного процесса при приращениях тока (например, ВАБ-43-6300/30), выключателями всех типов с уменьшенным в эксплуатации пакетом пластин на индуктивном шунте или тонкойшине реле РДШ, а также с помощью герконовых, гальваномагнитных или других видов реле тока, коэффициент чувствительности следует определять по выражению (2.1).

Для максимальной импульсной токовой защиты, реализуемой выключателями с индуктивным шунтом или реле РДШ, реагирующей одновременно на ток, его приращение и скорость нарастания, т.е. чувствительной к параметрам переходного процесса короткого замыкания, коэффициент чувствительности $\kappa_{\text{ч}}$ непосредственно не определяют. Соотношение между параметрами I_y и $I_{k,\min}$ для них должно отвечать условию

$$I_y \leq \kappa_{y\vartheta} I_{k,\min}, \quad (2.4)$$

где $\kappa_{y\vartheta}$ – коэффициент усиления при приращениях тока в переходном режиме за счет индуктивного шунта или реле РДШ.

Значения коэффициента усиления $\kappa_{y\vartheta}$ для выключателей тяговых подстанций приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Значение коэффициента усиления k_{y_3} для выключателей тяговых подстанций

Типы выключателей		Коэффициент усиления k_{y_3}
Поляризованные:	АБ-2/3, АБ-2/4 с высотой пакета пластин индуктивного шунта 240 мм;	1,15
	АБ-2/4 с № 10479 (выпуска 1966 г. и позже) с высотой пакета пластин индуктивного шунта 200 мм;	1,05
	ВАБ-43-4000/30-Л	1,05
Неполяризованные с реле РДШ:	РДШ-І	1,15
	РДШ-ІІ, РДШ-3000, РДШ-6000	1,05

Для выключателей всех типов на постах секционирования и пунктах параллельного соединения принимают $k_{y_3}=1$.

Кроме того, для максимальной токовой защиты, реализуемой выключателями с пониженной чувствительностью к параметрам переходного процесса при приращениях тока, например, ВАБ-43-6000, а также выключателями всех типов с уменьшенным в эксплуатации пакетом пластин на индуктивном шунте или тонкойшине реле РДШ, должно выполняться условие, А:

$$I_y < I_{k,\min} - 300. \quad (2.5)$$

2.3.3 Коэффициент чувствительности k_q для основных и резервных защит, вычисленный по формулам (2.1), (2.2) и (2.3), должен быть не менее нормативных значений, указанных в таблице 2.2, при учете в соответствии с 4.3.3 параметров места повреждения.

Таблица 2.2 – Нормативные значения коэффициента чувствительности

Виды защит	Назначение	Место КЗ	k_q
Защиты по току (в том числе для выключателей), по напряжению и сопротивлению	Основная	Конец защищаемой зоны	1,25
То же при наличии резервной селективной ступени	То же	То же	1,15
Защиты, реагирующие на ток, напряжение, сопротивление, их приращение, сочетание, производные или интегральные значения	Резервная, ближнее резервирование	«	1,25
То же	Резервная, дальнее резервирование	Конец смежного элемента, входящего в зону резервирования	1,15

2.3.4 Отстройку от внешних коротких замыканий дополнительных защит, действующих без выдержки времени, осуществляют путем ограничения зоны действия. Для этого уставку I_y токовой отсечки и R_y дистанционной защиты (если она используется как дополнительная) следует вычислять по формулам:

$$I_y \geq \kappa_{\text{отс}} I_{k,\max}, \quad (2.6)$$

$$R_y \leq \kappa_{\text{отс}} R_k, \quad (2.7)$$

где $I_{k,\max}$ – наибольшее значение тока, протекающего через выключатель с рассматриваемой защитой, при коротком замыкании в конце защищаемой зоны;

R_k – наименьшее значение отношения напряжения на шинах, к которым подключен выключатель с рассматриваемой защитой, к протекающему через этот выключатель току (сопротивление цепи короткого замыкания) при коротком замыкании в конце защищаемой зоны;

$\kappa_{\text{отс}}$ – коэффициент отстройки.

Для защит, реагирующих на возрастание значения тока, его производных или интегральных значений, принимают коэффициент отстройки $\kappa_{\text{отс}}$ от 1,2 до 1,3. Если токовая отсечка осуществляется выключателем, то значение $\kappa_{\text{отс}}$ принимают от 1,4 до 1,6. Для защит, реагирующих на снижение значения сопротивления цепи короткого замыкания принимают коэффициент отстройки $\kappa_{\text{отс}}$ от 0,85 до 0,9.

Значения $I_{k,\max}$ вычисляют при металлическом коротком замыкании.

2.3.5 Защита от коротких замыканий должна быть отстроена от максимальных нагрузок нормального режима работы, скачков тока при проследовании проездом секционного изолятора или изолирующего сопряжения, а также от повреждений, отключаемых выключателем локомотива или выключателями смежных участков. Для обеспечения отстройки защит, реагирующих на возрастание тока, снижение напряжения на шинах или сопротивления цепи короткого замыкания от указанных режимов, их уставки должны отвечать следующим условиям:

$$I_y \geq \frac{\kappa_3}{\kappa_B} I_{h,\max}, \quad (2.8)$$

$$U_y \leq \frac{U_{h,\min}}{\kappa_3 \kappa_B}, \quad (2.9)$$

$$R_y \leq \frac{\kappa_a R_{h,\min}}{\kappa_3 \kappa_B} = \frac{\kappa_a U_{h,\min}}{\kappa_3 \kappa_B I_{h,\max}}, \quad (2.10)$$

где $I_{h,\max}$ – наибольшее пиковое значение максимального тока в нормальном режиме, протекающее через тот выключатель, для которого рассчитывается уставка защиты;

$U_{h,\min}$ – наименьшее допустимое напряжение в нормальном режиме на тех шинах, к которым подключен данный выключатель;

$R_{h,\min}$ – отношение наименьшего допустимого напряжения $U_{h,\min}$ к максимальному току $I_{h,\max}$ в нормальном режиме;

κ_3 , κ_B , κ_a – коэффициенты соответственно запаса, возврата и адаптации.

Коэффициент запаса κ_3 для выключателей принимают не менее 1,15, для других защит – не менее чем от 1,1 до 1,3.

Коэффициент возврата κ_B для выключателей и других защит, не имеющих выдержки времени, принимают равным единице. Для защит с выдержкой времени, реагирующих на возрастание воздействующей величины (например, тока) и выполненных на электромагнитном принципе, принимают κ_B от 0,8 до 0,85, для электронных и микропроцессорных защит принимают κ_B от 0,8 до 0,9. Для защит с выдержкой времени, реагирующих на снижение воздействующей величины (например, напряжения, сопротивления) и выполненных на электромагнитном принципе, принимают κ_B от 1,15 до 1,25, а для электронных и микропроцессорных – κ_B от 1,1 до 1,15.

Для дистанционных защит без адаптации к предшествующему режиму принимают $\kappa_a=1$, для защит с адаптацией, осуществляющих автоматическое изменение уставки при больших тяговых токах, наибольшее значение κ_a принимают от 1,2 до 1,3. Для защиты по приращению тока с адаптацией коэффициент κ_a не должен превышать значений от 0,2 до 0,3.

Для защит по скорости нарастания тока dI/dt или приращению тока ΔI в условии (2.8) вместо I_v и $I_{h,max}$ используют соответствующие параметры, на которые реагирует защита, т.е. $(dI/dt)_v$ и $(dI/dt)_{h,max}$ или ΔI_v и $\Delta I_{h,max}$.

2.3.6 Вычисление параметров короткого замыкания, выбор уставок защит и их проверка по условиям устойчивости функционирования должны осуществляться применительно к установленным в настоящей Инструкции расчетным схемам питания межподстанционной зоны, режимам и исходным данным.

3 Расчетные параметры нормального режима

3.1 Общие положения

3.1.1 Для каждого присоединения в зависимости от используемого состава защит должны быть вычислены одно или несколько измеряемых устройствами защит значений расчетных параметров (граничных значений) воздействующих электрических величин в нормальном режиме, к которым относятся:

- для токовых защит – максимальный ток присоединения $I_{h,max}$, определяемый по 3.6.1;
- для защиты минимального напряжения – минимальное напряжение на шинах $U_{h,min}$, определяемое по 3.6.4;
- для дистанционной защиты – отношение минимального напряжения на шинах к максимальному току присоединения (сопротивление, измеряемое защитой присоединения) R_h , определяемое по 3.6.5.

Для защит, реагирующих на переходные процессы (скорость изменения тока или приращение тока) расчетными параметрами в нормальном режиме являются наибольшие значения скорости нарастания тока $(dI/dt)_{h,max}$ и прираще-

ния тока $\Delta I_{h,max}$, определяемые по 5.8 и 5.9.

3.1.2 В качестве расчетных необходимо принимать следующие схемы питания:

- для тяговых подстанций – раздельное питание контактной сети путей с максимальным числом поездов, одновременно находящихся в зоне питания по 3.3.1 рассматриваемого присоединения в интенсивный час, причем один из них с максимальной массой находится в режиме трогания возле данной тяговой подстанции;

- для поста секционирования контактной сети главных путей – схема узлового питания с максимальным числом поездов, одновременно находящихся в зоне питания по 3.3.1 рассматриваемого присоединения в интенсивный час при незагруженных зонах питания остальных присоединений поста, причем один из поездов с максимальной массой находится в режиме трогания возле этого поста;

- для пункта параллельного соединения – схема параллельного питания при одном поезде максимальной массы, находящимся в режиме трогания возле этого пункта.

3.1.3 Максимальное число поездов на одном пути, одновременно находящихся в зоне питания рассматриваемого присоединения в интенсивный час, следует вычислять в соответствии с 3.3 на основании заданных по 3.2 интервалов попутного следования поездов. Для вынужденного режима при отключении тяговой подстанции или пункта преобразования напряжения (ППН), а также для присоединений питающих контактную сеть станций или ее отдельных парков, значение этого числа поездов принимают заданным по 3.3.

В состав максимального числа поездов на одном пути одновременно находящихся в зоне питания рассматриваемого присоединения в интенсивный час, следует включать поезда следующих категорий:

- а) на участках железных дорог преимущественно с грузовым или пассажирским движением – грузовые поезда максимальной массы, число которых определяют по 3.3.2 и 3.3.4, остальные поезда – расчетной массы;

- б) на участках железных дорог при обращении пассажирских поездов со скоростями 161 км/ч и более:

- 1) только пассажирские с указанными скоростями движения;
- 2) поезда по (а);

- в) на участках железных дорог преимущественно с пригородным движением – только пригородные поезда.

Расчетную массу поезда следует определять как среднее арифметическое из массы всех поездов, включая пассажирские, обращающиеся на участке за одни сутки.

3.2 Интервалы попутного следования

3.2.1 Для участков железных дорог преимущественно с грузовым или преимущественно пассажирским движением значение интервала попутного следования θ , определяющего максимальное число поездов в межподстанционной зоне при расчетной схеме питания, следует выбирать по таблицам 3.1 или 3.2.

Таблица 3.1 – Расчетные параметры движения поездов на железнодорожных линиях преимущественно с грузовым движением

Расчетные размеры движения, пар в сутки		Интервал на однопутных и двухпутных участках в направлении с наибольшим электропотреблением, мин*
грузовых	пассажирских и пригородных	
Свыше 65	Свыше 20	5 (8)
	До 20	6 (8)
Свыше 40 до 65 включительно	Свыше 20	6 (8)
	До 20	7 (8)
Свыше 20 до 40 включительно	Свыше 20	8 (10)
	До 20	9 (10)
Свыше 10 до 20 включительно	До 10	12
До 10 включительно	До 10	20

* Интервал в обратном направлении больше в 1,4 раза, но не менее 11 мин.

Примечание – В скобках указан наименьший интервал между грузовыми соединенными поездами максимального веса.

3.2.2 При обращении на участке пассажирских поездов со скоростями 161 км/ч и более интервал попутного следования поездов в зоне питания рассматриваемого присоединения следует определять для следующих режимов движения:

- а) все поезда – пассажирские с указанными скоростями и следуют по данному пути с интервалом 10 мин;
- б) пассажирские поезда в интенсивный час на данном пути отсутствуют, а поезда максимальной и расчетной массы следуют с интервалом, определяемым по таблице 3.1.

Таблица 3.2 – Расчетные параметры движения поездов на железнодорожных линиях преимущественно с пассажирским движением

Расчетные размеры движения, пар в сутки		Интервал на однопутных и двухпутных участках, мин
пассажирских и пригородных	грузовых	
Свыше 65	Свыше 20	5
	До 20	7
Свыше 40 до 65 включительно	Свыше 20	8
	До 20	10
Свыше 20 до 40 включительно	От 10 до 20	12
	До 10	15
До 20 включительно	До 10	20

3.2.3 На участках железных дорог преимущественно с пригородным движением в качестве расчетного интервала попутного следования θ принимают наименьшее значение межпоездного интервала в часы максимального движения.

3.3 Число поездов в зоне питания

3.3.1 Максимальное число поездов (электропоездов) n_3 на одном пути, которое может одновременно находиться в зоне питания рассматриваемого присоединения в интенсивный час, следует вычислять для тяговой подстанции по формуле:

$$n_3 = \frac{\tau_{зп}}{\theta} = \frac{60\ell_{зп}}{\theta V}, \quad (3.1)$$

где $\ell_{зп}$ – длина зоны питания присоединения тяговой подстанции, км;

$\tau_{зп}$ – среднее время прохода поездом зоны питания $\ell_{зп}$, мин;

θ – интервал попутного следования поездов, принимаемый по подразделу 3.2, мин;

V – средняя скорость движения, км/ч.

Для тяговой подстанции, питающей межподстанционную зону без пункта преобразования напряжения системы тягового электроснабжения постоянного тока повышенного напряжения (ППН), в качестве длины зоны питания $\ell_{зп}$ следует принимать расстояние от данной до смежной включенной в работу тяговой подстанции или до конца зоны (при одностороннем питании, если оно принято для нормального режима).

При наличии в межподстанционной зоне ППН следует принимать в качестве расчетного наиболее тяжелый для защиты режим, при котором ППН отключен. Для тяговой подстанции в этом режиме зона питания $\ell_{зп}$ имеет такую же длину, как для межподстанционной зоны без ППН. Максимальное число поездов, вычисляемое по формуле (3.1), следует принимать не более $n_3 = 2$.

Для участков железных дорог преимущественно с грузовым или пассажирским движением значение n_3 вычисляют для интервала попутного следования θ в соответствии с 3.2.1.

Для участков железных дорог при обращении пассажирских поездов со скоростями 161 км/ч и более следует вычислять два значения n_3 для интервалов попутного следования θ в соответствии с 3.2.2 (а) и (б).

Для участков железных дорог преимущественно с пригородным движением значение n_3 вычисляют в соответствии с 3.2.3.

В вынужденном режиме при отключении смежной тяговой подстанции следует принимать $n_3 = 1$.

Примечание – Если вычисленное по формуле (3.1) значение имеет дробную часть не более 0,1, то округление значения n_3 до целого числа производят в меньшую сторону, а в остальных случаях – в большую сторону. Если вычисленное по формуле (3.1) значение оказывается меньше единицы, то принимают $n_3 = 1$.

3.3.2 Для присоединения тяговой подстанции на участке железной дороги преимущественно с грузовым или пассажирским движением число поездов максимальной массы $n_{3,gm}$, входящих составной частью в максимальное число поездов n_3 , вычисляемое по 3.3.1, следует принимать равным:

- одному, если число поездов максимальной массы за сутки составляет менее 5% общего числа поездов;

- двум, если число поездов максимальной массы за сутки составляет от 5 до 25% общего числа поездов;

- трем, если число поездов максимальной массы за сутки составляет более 25% общего числа поездов.

Если определенное по такому правилу число поездов максимальной массы $n_{\text{Э,ГМ}}$ оказывается больше максимального числа поездов $n_{\text{Э}}$, вычисленного по формуле (3.1), то принимают $n_{\text{Э,ГМ}} = n_{\text{Э}}$.

В вынужденном режиме при отключении смежной тяговой подстанции следует принимать $n_{\text{Э,ГМ}} = n_{\text{Э}} = 1$.

Для участков железных дорог при обращении пассажирских поездов со скоростями 161 км/ч и более значение $n_{\text{Э,ГМ}}$ следует принимать:

- для режима движения, соответствующего 3.2.2 (а) – $n_{\text{Э,ГМ}} = 0$;

- для режима движения, соответствующего 3.2.2 (б) – как для участков, преимущественно с грузовым или пассажирским движением.

Для участков железных дорог преимущественно с пригородным движением следует принимать $n_{\text{Э,ГМ}} = 0$.

3.3.3 Максимальное число поездов (электропоездов) $n'_{\text{Э}}$ на одном пути, которое может одновременно находиться в зоне питания рассматриваемого присоединения в интенсивный час, следует вычислять для поста секционирования контактной сети главных путей (вне зависимости от наличия или отсутствия ППН) по формуле:

$$n'_{\text{Э}} = \frac{\tau'_{\text{ЗП}}}{\theta} = \frac{60\ell'_{\text{ЗП}}}{\theta V}, \quad (3.2)$$

где $\ell'_{\text{ЗП}}$ – длина зоны питания присоединения поста секционирования, км;

$\tau'_{\text{ЗП}}$ – среднее время прохода поездом зоны питания $\ell'_{\text{ЗП}}$, мин;

θ – интервал попутного следования поездов, принимаемый по подразделу 3.2, мин;

V – средняя скорость движения, км/ч.

Округление значения $n'_{\text{Э}}$ осуществляют в соответствии с примечанием к 3.3.1.

Для поста секционирования контактной сети главных путей в качестве длины зоны питания $\ell'_{\text{ЗП}}$ следует принимать расстояние от поста секционирования до смежной включенной в работу тяговой подстанции или до конца зоны (при одностороннем питании, если оно принято для нормального режима).

Для участков железных дорог преимущественно с грузовым или пассажирским движением, участков при обращении пассажирских поездов со скоростями 161 км/ч и более и участков преимущественно с пригородным движением вычисление $n'_{\text{Э}}$ по формуле (3.2) следует выполнять для интервалов попутного следования в соответствии с пунктом 3.3.1.

В вынужденном режиме при отключении ППН или смежной тяговой подстанции следует принимать $n_3=1$.

3.3.4 Для присоединения поста секционирования контактной сети главных путей на участке железной дороги преимущественно с грузовым или пассажирским движением число поездов максимальной массы $n'_{\text{э,гм}}$, входящих составной частью в максимальное число поездов n'_3 , вычисляемое по 3.3.3, следует принимать равным:

- одному, если число поездов максимальной массы за сутки не превышает 25% общего числа поездов;

- двум, если число поездов максимальной массы за сутки превышает 25% общего числа поездов.

Если определенное по такому правилу число поездов максимальной массы $n'_{\text{э,гм}}$ оказывается больше максимального числа поездов n'_3 , вычисленного по формуле (3.2), то принимают $n'_{\text{э,гм}}=n'_3$.

В вынужденном режиме при отключении смежной тяговой подстанции следует принимать $n'_{\text{э,гм}}=n'_3=1$.

Для участков железных дорог при обращении пассажирских поездов со скоростями 161 км/ч и более значение $n'_{\text{э,гм}}$ следует принимать:

- для режима движения, соответствующего 3.2.2 (а) – $n'_{\text{э,гм}}=0$;

- для режима движения, соответствующего 3.2.2 (б) – как для участков, преимущественно с грузовым или пассажирским движением.

Для участков железных дорог преимущественно с пригородным движением следует принимать $n'_{\text{э,гм}}=0$.

3.3.5 Для пункта параллельного соединения принимают $n_{\text{э,гм}}=n_3=1$.

3.3.6 Для присоединений, питающих контактную сеть станций или ее отдельных парков, следует принимать $n_3=2$, $n_{\text{э,гм}}=1$.

3.4 Пусковые токи поездов

3.4.1 В качестве пускового тока (тока трогания) электроподвижного состава (ЭПС), для выбора уставок защит следует принимать наибольшее мгновенное (пиковое) значение тока в режиме трогания поезда с места.

Для ЭПС со ступенчатым реостатным регулированием в режиме пуска наибольшие пики тока возникают при переходе на параллельное соединение тяговых электродвигателей и при ослаблении поля. Пусковой ток ЭПС с импульсным регулированием практически не содержит значимых пиков тока, а его наибольшее значение соответствует окончанию режима трогания поезда с места.

Наибольшие значения пускового тока $I_{\text{тр}}$ следует определять по типовым токовым характеристикам (зависимостям тока ЭПС данной серии от скорости его движения) для обращающихся на участке электровозов и электропоездов или по таблице 3.3.

3.4.2 При отсутствии справочных данных допускается наибольшее пиковое значение пускового $I_{\text{тр}}$ тока для ЭПС со ступенчатым реостатным регули-

рованием определять по формуле:

$$I_{\text{тр}} = (1,4 \div 1,6) I_{\text{ч}} = (1,4 \div 1,6) \frac{P_{\text{ч}} \cdot 10^3}{U_{\text{э}} \eta}, \quad (3.3)$$

где $I_{\text{ч}}$ – ток часового режима ЭПС, А;

$P_{\text{ч}}$ – мощность часового режима ЭПС, кВт;

$U_{\text{э}}$ – номинальное напряжение ЭПС, равное 3000 В;

η – коэффициент полезного действия.

Для одного моторного вагона электропоездов приближенное пиковое значение пускового тока следует вычислять по формуле:

$$I_{\text{тр}} = (1,4 \div 1,6) I_{\text{чм}} = (1,4 \div 1,6) \frac{P_{\text{чм}} \cdot n_{\text{пар}} \cdot 10^3}{n_{\text{д}} \cdot U_{\text{д}} \eta}, \quad (3.4)$$

где $I_{\text{чм}}$ – ток часового режима моторного вагона, А;

$P_{\text{чм}}$ – мощность часового режима моторного вагона, кВт;

$U_{\text{д}}$ – номинальное напряжение электродвигателя, В;

$n_{\text{пар}}$ – число параллельных цепей электродвигателей в конце режима пуска;

$n_{\text{д}}$ – число электродвигателей в одном моторном вагоне.

Для ЭПС с импульсным регулированием значение пускового тока следует вычислять по формуле:

$$I_{\text{тр}} = 1,05 \frac{(P_{\text{ч}} + P_{\text{сн}}) \cdot 10^3}{U_{\text{э}}}, \quad (3.4')$$

где $P_{\text{сн}}$ – мощность собственных нужд ЭПС, кВт.

Таблица 3.3 – Параметры электроподвижного состава

Серия ЭПС	Число секций или моторных вагонов	Мощность часового режима $P_{\text{ч}}$, кВт	Мощность длительного режима $P_{\text{дл}}$, кВт	КПД η	Наибольший пик тока трогания $I_{\text{тр}}$, А
ВЛ10, ВЛ10 ^y	2	5360	4600	0,90	2900
ВЛ11, ВЛ11 ^m	2	5360	4600	0,88	2850
	3	8040	6900		4100
ВЛ15	2	9000	8400	0,88	4600
ВЛ15С	3	13500	12600	0,88	6900
ЧС2, ЧС2 ^r	1	4620	4080	0,91	2500
ЧС3	1				1600
ЧС6, ЧС200	2	8400		0,91	4200
ЧС7	2		6160	0,9	3500
ЭП20	2	8750*			3040

Окончание таблицы 3.3

Серия ЭПС	Число секций или моторных вагонов	Мощность часового режима P_q , кВт	Мощность длительного режима $P_{дл}$, кВт	КПД η	Наибольший пик тока трогания $I_{тр}$, А
2ЭС4	2	6400	5920		3100
	2	6440	6000		3200
2ЭС6	3	9660	9000		4800
	4	12880	12000		6400
2ЭС10	2	8800	8400	0,9	
Velaro RUS B1 «Сапсан»	4	9200*			3300
ЭР1, ЭР2	1	800		0,9	
ЭТ2, ЭТ2М, ЭР2Р	1	960		0,9	
ЭТ2Т, ЭТ4, ЭТ4М	1	940		0,9	

* – вместе с мощностью собственных нужд

Примечания

1 Максимальная масса поезда «Сапсан» – 656 т.

2 Максимальная масса электропоездов из 10 вагонов (5 моторных) – 610 т.

3.4.3 В эксплуатации допускается принимать в качестве $I_{тр}$ наибольшее пиковое значение пускового тока, соответствующее реальным условиям принятого режима трогания на данном участке с учетом ограничений по току и сцеплению.

3.4.4 При кратной тяге значение пускового тока $I_{тр}$ принимают равным сумме пусковых токов всех электровозов (моторных вагонов) в составе данного поезда.

3.5 Средние токи присоединений

3.5.1 Средние токи присоединений для питающих линий тяговой подстанции $I_{ср}$ или поста секционирования контактной сети главных путей $I'_{ср}$, как составную часть максимального тока $I_{h,max}$, учитываемого при выборе уставок защит, следует вычислять для числа поездов в зоне питания n_3 (n'_3), определяемых по 3.3, за вычетом одного поезда, находящегося в режиме пуска возле подстанций или поста, т.е. для числа поездов n_3-1 и n'_3-1 . Значения токов $I_{ср}$ и $I'_{ср}$ при максимальном числе поездов в зоне питания n_3-1 и n'_3-1 следует определять для категории поездов и их числа в соответствии с 3.1.3 и 3.3 одним из следующих методов:

- на основании электрических расчетов системы электроснабжения для данных числа поездов и схемы питания;
- по средним токам поездов.

3.5.2 Для вычисления средних токов присоединений $I_{ср}$ и $I'_{ср}$ с помощью электрических расчетов системы электроснабжения для данной межподстанционной зоны необходимо выполнение тяговых расчетов для категории поездов в соответствии с 3.1.3, данных серии электровозов (электропоездов), профиля пу-

ти и длины зоны питания по 3.3 для рассматриваемого присоединения, а также составления графика движения поездов установленных категорий с интервалом попутного следования по 3.2.

Расчеты допускается выполнять с помощью компьютерной программы «КОРТЭС».

3.5.3 Значение средних токов присоединений, определяемое по средним токам поездов, вычисляют для участков железных дорог преимущественно с грузовым или пассажирским движением по формулам:

- для присоединений тяговых подстанций:

$$I_{cp} = \frac{I_{pac}(n_3 - n_{3,gm}) + I_{gm}(n_{3,gm} - 1)}{k}, \quad (3.5)$$

- для присоединений постов секционирования контактной сети главных путей:

$$I'_{cp} = \frac{I_{pac}(n'_3 - n'_{3,gm}) + I_{gm}(n'_{3,gm} - 1)}{k}, \quad (3.6)$$

где I_{pac} – средний по длине зоны питания эффективный ток поезда расчетной массы, А;

I_{gm} – средний по длине зоны питания эффективный ток грузового поезда максимальной массы, А;

n_3 – максимальное число поездов на одном пути в зоне питания по 3.3.1;

$n_{3,gm}$ – то же поездов максимальной массы по 3.3.2;

n'_3 , $n'_{3,gm}$ – значения максимального числа поездов и числа грузовых поездов максимальной массы по 3.3.3 и 3.3.4 в зоне защиты поста секционирования;

k – коэффициент, равный единице при одностороннем питании и равный двум при двухстороннем питании контактной сети.

Если в межподстанционной зоне используется пункт преобразования напряжения (ППН), то вычисление тока I_{cp} по формуле (3.5) для присоединения тяговой подстанции следует выполнять для режима отключенного ППН при $n_3=n_{3,gm}=2$. Для поста секционирования в этом режиме принимают $n'_3=n'_{3,gm}=2$.

Для участков железных дорог при обращении пассажирских поездов со скоростями 161 км/ч и более вычисление токов I_{cp} и I'_{cp} по формулам (3.5) и (3.6) в интенсивный час осуществляют как для режима движения только пассажирских поездов, так и для режима движения грузовых поездов максимальной и расчетной массы. В качестве расчетного принимают наибольшее из полученных значений. Для режима движения только пассажирских поездов следует принимать I_{pac} , равным среднему по длине зоны эффективному току пассажирского поезда, $I_{gm}=0$. Значения n_3 и n'_3 следует вычислять по 3.3.1 и 3.3.4 при интервале попутного следования $\theta=10$ мин, а в формулах (3.5) и (3.6) принять $n_{3,gm}=n'_{3,gm}=0$. Для режима движения грузовых поездов максимальной массы и поездов расчетной массы вычисление токов I_{cp} и I'_{cp} по формулам (3.5) и (3.6)

следует выполнять как для участков преимущественно с грузовым или пассажирским движением.

Для участков железных дорог преимущественно с пригородным движением в формулах (3.5) и (3.6) следует принимать $I_{\text{рас}}$, равным среднему по длине зоны питания эффективному току пригородного поезда, $I_{\text{ГМ}}=0$, $n_{\text{Э,ГМ}}=n'_{\text{Э,ГМ}}=0$. Значения $n_{\text{Э}}$ и $n'_{\text{Э}}$ следует вычислять по формулам (3.1) и (3.2) при интервале попутного следования θ в соответствии с 3.2.3.

3.5.4 Среднее по длине зоны питания эффективное значение тока I поезда расчетной массы ($I = I_{\text{рас}}$) и грузового поезда максимальной массы ($I = I_{\text{ГМ}}$) следует вычислять по формуле:

$$I = \frac{66 A_{3\pi} \kappa_{\text{ЭФ}} \cdot 10^3}{U \tau_{3\pi} \eta} = \frac{1,1 A_{3\pi} V \kappa_{\text{ЭФ}} \cdot 10^3}{U \ell_{3\pi} \eta}, \quad (3.7)$$

где $A_{3\pi}$ – расход электроэнергии на движение поезда, соответственно, расчетной или максимальной массы, или пассажирского по всей зоне питания рассматриваемого присоединения по 3.1.3, кВт·ч;

$\kappa_{\text{ЭФ}}$ – коэффициент эффективности тока поезда;

U – среднее напряжение контактной сети, принимаемое равным 3000 В;

V – средняя скорость движения поезда по зоне питания, км/ч;

$\ell_{3\pi}$ – длина зоны питания рассматриваемого присоединения в соответствии с 3.3.1 и 3.3.2, км;

$\tau_{3\pi}$ – среднее время прохода поездом зоны питания длиной $\ell_{3\pi}$, мин;

η – коэффициент полезного действия (можно принимать для грузовых поездов – 0,9, для пассажирских и электропоездов – 0,83).

Значения $A_{3\pi}$ и $\tau_{3\pi}$ принимают по результатам тягового расчета, выполненного, например, с помощью компьютерной программы «КОРТЭС» для заданного профиля пути, длины зоны питания, серии ЭПС, категории поезда и его массы в соответствии с 3.1.3.

При отсутствии тягового расчета расход электроэнергии $A_{3\pi}$ следует вычислять по формуле, кВт·ч:

$$A_{3\pi} = \eta w Q \ell_{3\pi} \cdot 10^{-3}, \quad (3.8)$$

где w – удельный расход электроэнергии на движение поезда данной категории, Вт·ч/(т·км);

Q – максимальная масса грузового поезда, расчетная масса поезда или масса пассажирского поезда, т.

Длину зоны питания $\ell_{3\pi}$ следует принимать по 3.3.1 и 3.3.2. Значение удельного расхода электроэнергии на движение поезда w принимают по таблице 3.4.

Значение коэффициента эффективности тока поезда $\kappa_{\text{ЭФ}}$ зависит от профиля пути и режима ведения поезда. Для расчетов, используемых при выборе

уставок защит, его усредненное значение следует принимать для грузовых и пассажирских поездов 1,26, для пригородных поездов 1,65.

Таблица 3.4 – Удельный расход электроэнергии

Тип и характер профиля	Удельный расход электроэнергии w на движение, Вт·ч/(т·км), для категории поездов			
	грузовые	пассажирские		пригородные
		какие	со скоростями 161 км/ч и более	
I Равнинный	15	26	70	35
II Холмистый	17	26	70	35
III Холмисто-горный	17	26	70	35
IV Горный	18	26	70	35

3.6 Границные значения действующих электрических величин

3.6.1 Пиковое значение максимального тока присоединений вычисляют по формулам:

- для тяговой подстанции:

$$I_{h,\max} = I_{tp} + I_{cp}; \quad (3.9)$$

- для поста секционирования контактной сети главных путей:

$$I_{h,\max} = \left(I_{tp} + I'_{cp} \right) \left(\frac{m-1}{m} + \frac{\ell_{PB}}{m \ell_{AB}} \right); \quad (3.10)$$

- для пункта параллельного соединения:

$$I_{h,\max} = \frac{m-1}{m} I_{tp}, \quad (3.11)$$

где I_{tp} – пусковой ток поезда, А;

I_{cp} , I'_{cp} – средние токи рассматриваемого присоединения, А;

m – число путей с включенной контактной сетью;

ℓ_{AB} – длина зоны питания присоединения тяговой подстанции по 3.3.1, км;

ℓ_{PB} – длина зоны питания присоединения поста секционирования по подразделу 3.3.2, км.

Пиковые значения пусковых токов I_{tp} поездов следует принимать по 3.4. Вычисление средних по длине эффективных значений токов присоединений тяговой подстанции I_{cp} и поста секционирования I'_{cp} необходимо выполнять по 3.5.2 или 3.5.3 для схем питания по 3.1.2, категорий поездов – по 3.1.3, максимального числа поездов n_3 и n'_3 , в том числе грузовых поездов максимальной массы $n_{3,GM}$ и $n'_{3,GM}$ – по 3.3.

Вычисления максимальных токов присоединений осуществляют в следующей последовательности:

- задаются рассматриваемым присоединением на тяговой подстанции, посту секционирования или пункте параллельного соединения;

- определяют по 3.1.2 расчетную схему питания;
- устанавливают по 3.1.3 категории поездов и их массу Q ;
- определяют по 3.2 интервал попутного следования θ ;
- вычисляют по 3.3 значение максимального числа поездов в зоне рассматриваемого присоединения n_3 и n'_3 , в том числе грузовых поездов максимальной массы $n_{\text{э,гм}}$ и $n'_{\text{э,гм}}$;
- определяют по 3.4 пиковое значение пускового тока поезда $I_{\text{тр}}$;
- вычисляют по 3.5.4 значения средних токов поездов I заданных категорий;
- вычисляют по 3.5.3 средние токи присоединений $I_{\text{ср}}$ и $I'_{\text{ср}}$;
- вычисляют по 3.6.1 пиковые значения максимальных токов присоединений $I_{\text{h,max}}$.

3.6.2 Значение максимального тока $I_{\text{h,max}}$ присоединения, питающего контактную сеть станции или ее отдельных парков, принимают как сумму пускового тока $I_{\text{тр}}$ одного поезда в соответствии с 3.4 и среднего тока $I_{\text{ср}}$ другого поезда, проходящего станцию без остановки, вычисляемого по формуле (3.7) при $k_{\text{эф}}=1$. Допускается принимать $I_{\text{h,max}}=1,5 I_{\text{тр}}$.

3.6.3 Значение максимального тока $I_{\text{h,max}}$ присоединения, питающего локомотивное депо, принимают как сумму токов трех электровозов (электропоездов) двигающихся по деповским путям на маневровых позициях.

3.6.4 Минимальное значение напряжения на шинах тяговой подстанции постоянного тока в нормальном режиме работы принимают 3000 В.

Для постов секционирования и пунктов параллельного соединения в нормальном режиме работы величину этого напряжения принимают 2700 В, а для слабо загруженных участков и в схемах с отключенной тяговой подстанцией – 2400 В.

3.6.5 Значение сопротивления $R_{\text{h,min}}$, измеряемое защитами выключателей подстанций и постов секционирования контактной сети постоянного тока в нормальном режиме работы, вычисляют по формуле:

$$R_{\text{h,min}} = \frac{U_{\text{h,min}}}{I_{\text{h,max}}}. \quad (3.12)$$

Пример 3.1 Вычислить значения чисел поездов в интенсивный час в зоне питания присоединений тяговой подстанции и поста секционирования и средних по длине эффективных токов поездов для двухпутного участка длиной $\ell_{AB}=18$ км при параллельной схеме питания в нормальном режиме. Пост секционирования (без ППН) находится в середине межподстанционной зоны с расстоянием до смежной тяговой подстанции $\ell_{\text{ПВ}}=9$ км.

Суточные размеры движения: грузовых поездов всего $N_{\text{г}}=42$ пары, в том числе максимальной массы $N_{\text{гм}}=6$ пар, пассажирских поездов $N_{\text{п}}=30$ пар. По таблице 3.1 находим интервал попутного следования $\theta=8$ мин.

Грузовые поезда максимальной массы ведутся электровозами ВЛ11^М, остальные грузовые поезда – электровозами ВЛ10. Максимальная масса грузового поезда $Q_{\text{тм}}=6000$ т, масса остальных грузовых поездов $Q_{\text{тр}}=4000$ т, масса пассажирских поездов $Q_{\text{п}}=1200$ т. Средняя скорость движения грузового поезда по межподстанционной зоне $V=50$ км/ч. Профиль пути

– холмисто-горный.

В соответствии с 3.3.1 зона питания присоединения тяговой подстанции A равна расстоянию от этой подстанции до смежной тяговой подстанции B ($\ell_{3п} = \ell_{AB} = 18$ км).

В соответствии с 3.3.4 зона питания присоединения поста секционирования ПС равна расстоянию от этого поста до смежной тяговой подстанции B ($\ell'_{3п} = \ell_{ПВ} = 9$ км).

Находим расчетную массу поезда Q_{pac}

$$Q_{pac} = \frac{Q_{ГМ} + Q_{ГР} + Q_{П}}{3} = \frac{6000 + 4000 + 1200}{3} = 3700 \text{ т.}$$

Определяем процент грузовых поездов максимальной массы

$$N_{ГМ,\%} = \frac{N_{ГМ} \cdot 100}{N_{Г} + N_{П}} = \frac{6 \cdot 100}{42 + 30} = 8,33 \text{ \%}.$$

Поскольку $N_{ГМ,\%}$ оказалось более 5 %, но менее 25 %, то в соответствии с 3.3.2 число грузовых поездов максимальной массы в зоне питания тяговой подстанции в интенсивный час принимаем равным $n_{3,ГМ} = 2$, а в зоне питания присоединения поста секционирования в соответствии с 3.3.4 имеем $n'_{3,ГМ} = 1$.

Определяем по формулам (3.1) и (3.2) значение расчетного числа поездов n_3 в межподстанционной зоне и расчетного числа поездов n'_3 в зоне между постом секционирования ПС и тяговой подстанцией B

$$n_3 = \frac{60\ell_{AB}}{V\theta} = \frac{60 \cdot 18}{50 \cdot 8} = 2,7 \text{ поездов,}$$

$$n'_3 = \frac{60\ell_{ПВ}}{V\theta} = \frac{60 \cdot 9}{50 \cdot 8} = 1,35 \text{ поездов.}$$

Поскольку дробная часть этих чисел больше значения 0,1, то в соответствии с 3.3.1 производим их округление до целого в большую сторону: $n_{3,ГМ} = 3$, $n'_{3,ГМ} = 2$.

Поскольку данные тяговых расчетов не заданы, то средний по зоне ток поездов будем находить на основании расчетного удельного расхода электроэнергии w на тягу поездов в грузовом движении, определяемого по таблице 3.4, $w = 17,0 \text{ Вт}\cdot\text{ч}/(\text{т}\cdot\text{км})$.

По формуле (3.8) находим значение расхода электроэнергии на движение по зоне питания $\ell_{3п} = \ell_{AB} = 18$ км поезда:

- расчетной массы

$$A_{3п} = A_{3п,рас} = \eta w Q_{pac} \ell_{3п} \cdot 10^{-3} = 0,88 \cdot 17 \cdot 3700 \cdot 18 \cdot 10^{-3} = 996,3 \text{ кВт}\cdot\text{ч};$$

- максимальной массы

$$A_{3п} = A_{3п,ГМ} = \eta w Q_{ГМ} \ell_{3п} \cdot 10^{-3} = 0,88 \cdot 17 \cdot 6000 \cdot 18 \cdot 10^{-3} = 1615,7 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

По формуле (3.7) находим средние по длине эффективные значения токов поездов:

- расчетной массы

$$I = I_{pac} = \frac{1,1 A_{3п,рас} V_{К_{ЭФ}} \cdot 10^3}{U \ell_{3п} \eta} = \frac{1,1 \cdot 996,3 \cdot 50 \cdot 1,26 \cdot 10^3}{3000 \cdot 18 \cdot 0,88} = 1450 \text{ А;}$$

- максимальной массы

$$I = I_{ГМ} = \frac{1,1 A_{3п,ГМ} V_{К_{ЭФ}} \cdot 10^3}{U \ell_{3п} \eta} = \frac{1,1 \cdot 1615,7 \cdot 50 \cdot 1,26 \cdot 10^3}{3000 \cdot 18 \cdot 0,88} = 2360 \text{ А.}$$

Пример 3.2 Для двухпутного участка ($m = 2$) с параллельной схемой питания и длиной межподстанционной зоны $\ell_{AB} = 18$ км определить расчетные значения токов и сопротивлений, измеряемых защитами на тяговой подстанции A и на посту секционирования ПС, и ток пункта параллельного соединения ППС в режиме интенсивного движения поездов при нормальной схеме питания. Пост секционирования расположен в середине межподстанционной зоны, расстояние от поста ПС до смежной подстанции B $\ell_{ПВ} = 9$ км. Число грузовых поездов на одном пути в межподстанционной зоне $n_3 = 3$, а в зоне между постом секционирования и

смежной подстанцией $n'_3 = 2$; число грузовых поездов максимальной массы в межподстанционной зоне $n_{3,GM} = 2$ и в зоне питания от поста секционирования до смежной подстанции $n'_{3,GM} = 1$; наибольшее пиковое значение тока трогания поезда с электровозом ВЛ11^М находим по таблице 3.3 $I_{tp} = 4100$ А; средние токи грузовых поездов максимальной и расчетной масс равны, соответственно, $I_{tm} = 2360$ А, $I_{pac} = 1450$ А.

Средний ток присоединения тяговой подстанции (без учета поезда, находящегося возле нее в режиме пуска) находим по формуле (3.5)

$$I_{cp} = \frac{I_{pac}(n_3 - n_{3,GM}) + I_{GM}(n'_{3,GM} - 1)}{k} = \frac{1450(3 - 2) + 2360(2 - 1)}{2} = 1910 \text{ А.}$$

Максимальное пиковое значение тока этого присоединения определяем по формуле (3.9)

$$I_{h,max} = I_{tp} + I_{cp} = 4100 + 1910 = 6010 \text{ А.}$$

Принимая в соответствии с 3.6.4 минимальное напряжение на шинах тяговой подстанции $U_{h,min} = 3000$ В, находим по формуле (3.12) значение минимального сопротивления, измеряемого защитой присоединения на тяговой подстанции в режиме интенсивного движения поездов

$$R_{h,min} = \frac{U_{h,min}}{I_{h,max}} = \frac{3000}{6010} = 0,5 \text{ Ом.}$$

Средний ток присоединения поста секционирования (без учета поезда, находящегося возле него в режиме пуска) находим по формуле (3.6)

$$I'_{cp} = \frac{I_{pac}(n'_3 - n'_{3,GM}) + I_{GM}(n'_{3,GM} - 1)}{k} = \frac{1450(2 - 1) + 2360(1 - 1)}{2} = 725 \text{ А.}$$

Максимальное пиковое значение тока этого присоединения находим по формуле (3.10)

$$I_{h,max} = (I_{tp} + I'_{cp}) \left(\frac{m-1}{m} + \frac{\ell_{PB}}{m\ell_{AB}} \right) = (4100 + 725) \left(\frac{2-1}{2} + \frac{9}{2 \cdot 18} \right) = 3620 \text{ А.}$$

Принимая в соответствии с 3.6.4 на посту секционирования $U_{h,min} = 2700$ В, получаем по формуле (3.12) для защиты поста секционирования ПС

$$R_{h,min} = \frac{U_{h,min}}{I_{h,max}} = \frac{2700}{3620} = 0,75 \text{ Ом.}$$

Максимальное пиковое значение тока выключателя пункта параллельного соединения находим по формуле (3.11)

$$I_{h,max} = \frac{m-1}{m} I_{tp} = \frac{2-1}{2} 4100 = 2050 \text{ А.}$$

4 Схемы питания и расчетные схемы

4.1 Схемы питания

4.1.1 Параметры коротких замыканий для выбора уставок каждой из защит вычисляют для установленных расчетных схем. В расчетной схеме место короткого замыкания соответствует наиболее удаленной точке зоны основной защиты или зоны резервирования, а положение выключателей (включен или отключен) в межподстанционной зоне для данной схемы питания соответствует наиболее сложным условиям для рассматриваемой защиты.

4.1.2 Основные схемы питания, для которых рассматриваются режимы короткого замыкания в межподстанционной зоне для m -путного участка, на ко-

тором n путей имеют контактную сеть, находящуюся под напряжением, приведены на рисунках 4.1 и 4.2. На этих схемах приняты следующие обозначения:

A, B, C – тяговые подстанции, соответственно, A, B и C ;

$\text{ПС}, \text{ПС}1, \text{ПС}2$ – посты секционирования;

$\text{ППС}1, \text{ППС}2, \text{ППС}3, \text{ППС}4$ – пункты параллельного соединения;

$Q_{A1}, \dots, Q_{An}, Q_{B1}, \dots, Q_{Bn}$ – выключатели присоединений контактной сети на тяговых подстанциях соответственно A и B ;

$Q_{\Pi A1}, \dots, Q_{\Pi An}, Q_{\Pi B1}, \dots, Q_{\Pi Bn}, Q_{\Pi 1A1}, \dots, Q_{\Pi 1An}, Q_{\Pi 1C1}, \dots, Q_{\Pi 1Cn}, Q_{\Pi 2C1}, \dots, Q_{\Pi 2Cn}, Q_{\Pi 2B1}, \dots, Q_{\Pi 2Bn}$ – выключатели на постах секционирования;

$\ell_{\phi A}, \ell_{\phi B}$ – длины питающих линий соответственно на подстанциях A и B , км;

ℓ_1, \dots, ℓ_7 – длины соответствующих участков контактной сети между смежными узловыми точками, км;

ℓ_K – расстояние от подстанции A до места короткого замыкания K , км;

ℓ'_3, ℓ''_3 – расстояния от точки короткого замыкания K до ближайших левой и правой узловых точек, соответственно, км;

I_A, I_B – токи соответствующих тяговых подстанций A и B , А.

4.1.3 При расчете параметров короткого замыкания для выбора уставок защиты тяговой сети 3,3 кВ при наличии пунктов преобразования напряжения системы тягового электроснабжения постоянного тока повышенного напряжения (ППН) следует рассматривать наиболее тяжелый для защиты режим, при котором ППН отключен. В этом случае схема питания межподстанционной зоны принимает вид одной из схем, показанных на рисунке 4.1.

4.1.4 Вычисление параметров короткого замыкания для всех расчетных схем питания осуществляется на основе схем замещения. Любая схема замещения тяговой сети при питании от одной или двух тяговых подстанций может быть приведена к Т-образному виду. Значения результирующих сопротивлений такой расчетной схемы вычисляют по формулам, Ом

$$\begin{aligned} R_A &= R_{\pi A} + R_{tcA}; \\ R_B &= R_{\pi B} + R_{tcB}; \\ R_{AB} &= R_{tcAB} + R_{tgz}, \end{aligned} \quad (4.1)$$

где $R_{\pi A}, R_{\pi B}$ – сопротивления тяговых подстанций в межподстанционной зоне ℓ_{AB} , вычисляемые по 4.3.2;

R_{tgz} – сопротивление троса группового заземления, вычисляемое по 4.3.3;

R_{tcA} – сопротивление части схемы замещения тяговой сети (контактной сети и рельсов), по которой протекает ток I_A тяговой подстанции A ;

R_{tcB} – сопротивление части схемы замещения тяговой сети (контактной сети и рельсов), по которой протекает ток I_B тяговой подстанции B ;

R_{tcAB} – сопротивление части схемы замещения тяговой сети, по которой протекает сумма токов $I_A + I_B$.

Значения сопротивлений R_{tcA} , R_{tcB} , R_{tcAB} вычисляют по формулам, приведенным в таблицах 4.1 и 4.2.

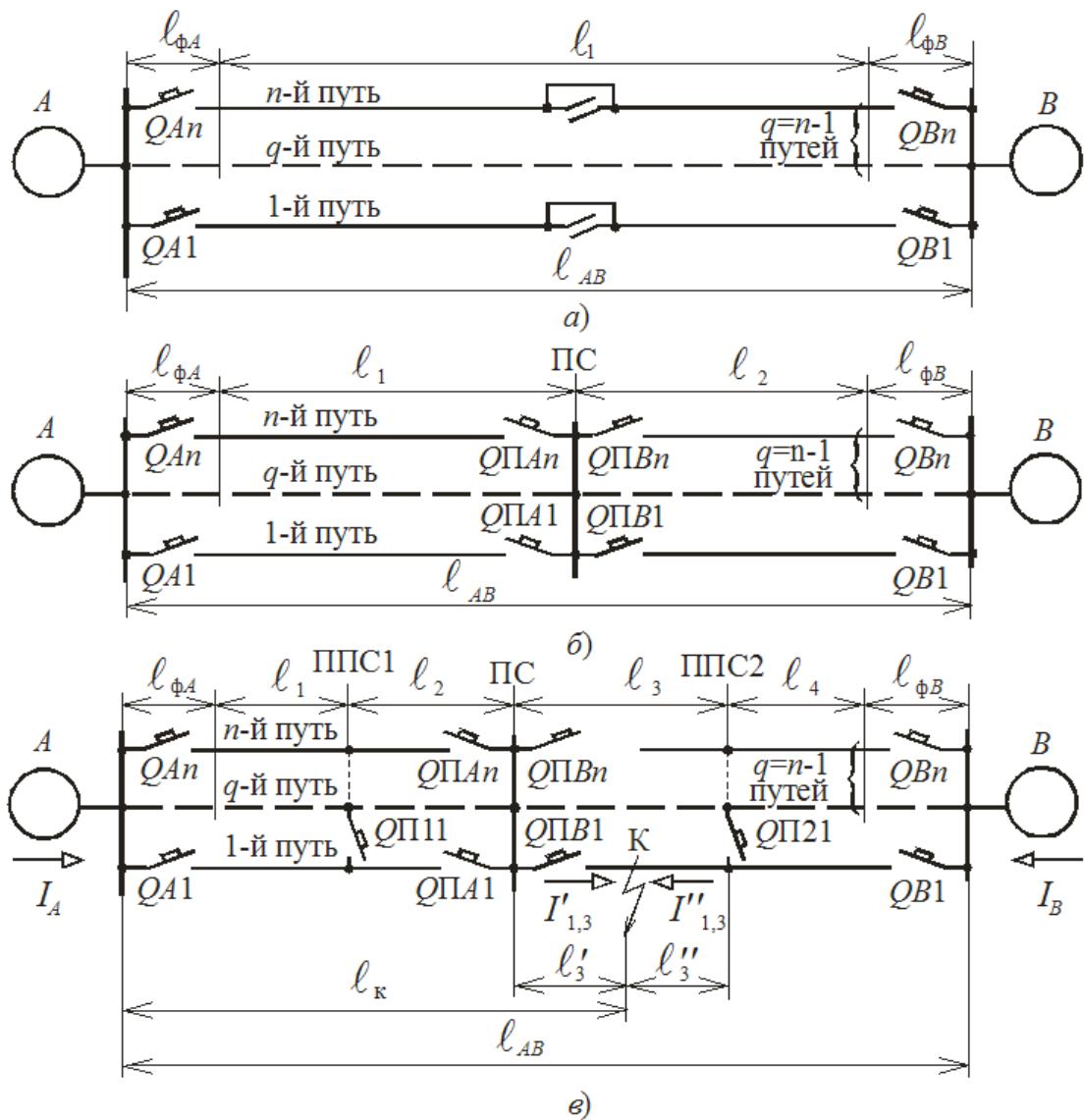


Рисунок 4.1 – Основные схемы питания
а) раздельная, б) узловая, в) параллельная

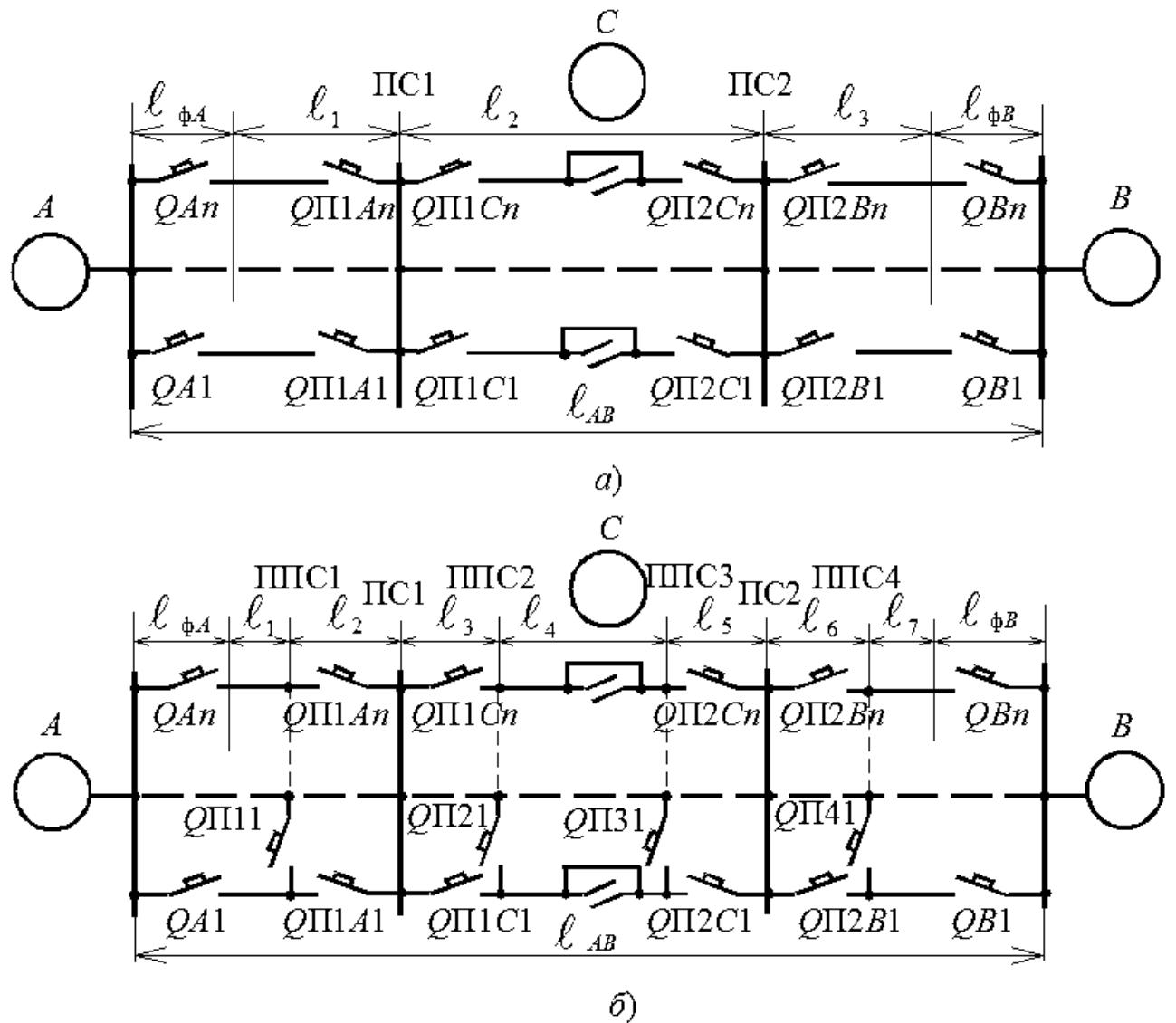


Рисунок 4.2 – Схемы питания при отключении промежуточной подстанции С

- узловая при отключении промежуточной тяговой подстанции С,
- параллельная при отключении промежуточной тяговой подстанции С

4.2 Расчетные схемы

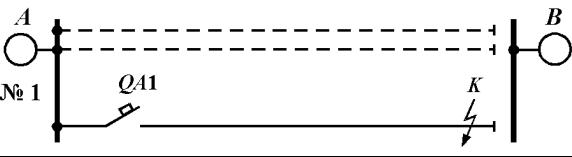
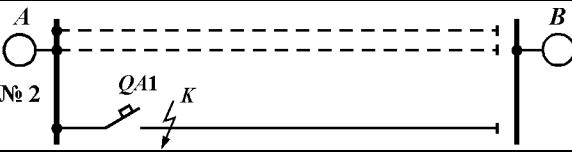
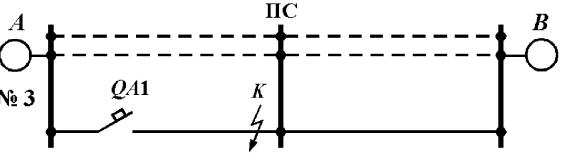
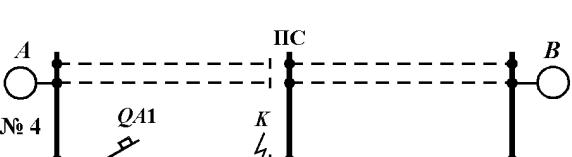
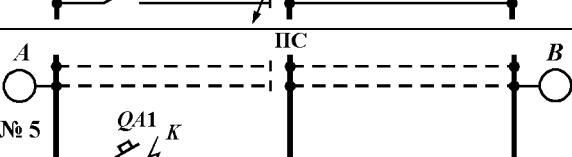
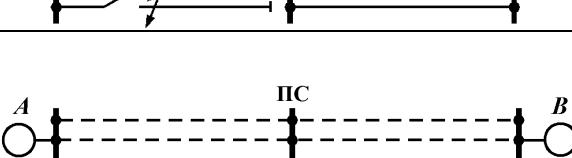
4.2.1 Расчетные схемы питания используются для выбора уставок защиты от коротких замыканий и анализа возможных или наступивших нештатных ситуаций в виде отказа защит при фиксированном расположении места короткого замыкания возле узловых точек. Эти схемы приведены в графе 1 таблицы 4.1 (нормальные схемы питания) и таблицы 4.2 (вынужденные схемы питания), на них указан выключатель, для которого определяются параметры короткого замыкания. Приведенным в графе 1 таблиц 4.1 и 4.2 упрощенным схемам соответствуют подробные схемы и обозначения, показанные на рисунках 4.1 и 4.2.

В схемах, приведенных в таблицах 4.1 и 4.2 указаны только те выключатели, на которых уставка защиты подлежит расчету. Ток I_Q , протекающий через выключатель, указанный в графе 1 таблиц, может быть определен через то-

ки I_A , I_B соответствующих тяговых подстанций A и B , и число путей n на соответствующем i -м участке, контактные сети которых находятся под напряжением. Формулы для определения тока I_Q в каждой из схем приведены в графе 2 таблиц 4.1 и 4.2.

Так, например, для схемы № 1 таблицы 4.1 имеем $I_Q = I_{QA1} = I_A$, для схемы № 6 этой же таблицы $I_Q = I_{QA1} = I_A/n_1$, где n_1 – число путей на участке ℓ_1 (рисунок 4.1, δ), контактная сеть которых находится под напряжением, а для схемы № 17 $I_Q = I_{Q\text{П21}} = I_A + I_B - I_B/n_4$, где n_4 – число путей на участке ℓ_4 (рисунок 4.1, ϵ), контактная сеть которых находится под напряжением.

Таблица 4.1 – Расчетные схемы короткого замыкания при нормальной схеме питания межподстанционной зоны

Расчетная схема	Расчетные формулы
	$I_{QA1} = I_A,$ $R_{TcA} = r_p \ell_{AB}, \quad R_{TcB} = \infty,$ $R_{AB} = r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_k \ell_{AB} + r_{\phi B} \ell_{\phi B} + R_{TG3}$
	$I_{QA1} = I_A,$ $R_{TcA} = 0, \quad R_{TcB} = \infty,$ $R_{AB} = 0$
	$I_{QA1} = I_A/n_1,$ $R_{TcA} = (r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_k \ell_1)/n_1 + r_p \ell_1,$ $R_{TcB} = (r_{\phi B} \ell_{\phi B} + r_k \ell_2)/n_2 + r_p \ell_2,$ $R_{AB} = R_{TG3}$
	$I_{QA1} = I_A,$ $R_{TcA} = r_p \ell_1, \quad R_{TcB} = \infty,$ $R_{AB} = r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_k \ell_1 + R_{TG3}$
	$I_{QA1} = I_A,$ $R_{TcA} = 0, \quad R_{TcB} = \infty,$ $R_{AB} = 0$
	$I_{QA1} = I_A/n_1,$ $I_{Q\text{ПB1}} = I_A + I_B$ $R_{TcA} = (r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_k \ell_1)/n_1 + r_p \ell_{AB},$ $R_{TcB} = (r_{\phi B} \ell_{\phi B} + r_k \ell_2)/(n_2 - 1),$ $R_{AB} = r_{\phi B} \ell_{\phi B} + r_k \ell_2 + R_{TG3}$

Продолжение таблицы 4.1

Расчетная схема	Расчетные формулы
<p>№ 7</p>	$I_{QA1} = I_A/n_1,$ $I_{QPIB1} = I_A/n_2,$ $R_{TC A} = (r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_K \ell_1)/n_1 + (r_{\phi B} \ell_{\phi B} + r_K \ell_2)/n_2 + r_p \ell_{AB},$ $R_{TC B} = 0, R_{AB} = R_{TG3}$
<p>№ 8</p>	$I_{QPIB1} = I_A,$ $R_{TC A} = (r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_K \ell_1)/n_1 + r_p \ell_{AB},$ $R_{TC B} = \infty, R_{AB} = r_{\phi B} \ell_{\phi B} + r_K \ell_2 + R_{TG3}$
<p>№ 9</p>	$I_{QPIB1} = I_A,$ $R_{TC A} = (r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_K \ell_1)/n_1 + r_p \ell_1,$ $R_{TC B} = \infty, R_{AB} = R_{TG3}$
<p>№ 10</p>	$I_{QA1} = I_A/n_1,$ $R_{TC A} = (r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_K \ell_1)/n_1 + r_K \ell_2/n_2 + r_p(\ell_1 + \ell_2),$ $R_{TC B} = (r_K \ell_4 + r_{\phi B} \ell_{\phi B})/n_4 + r_K \ell_3/n_3 + r_p(\ell_3 + \ell_4),$ $R_{AB} = R_{TG3}$
<p>№ 11</p>	$I_{QA1} = I_A/n_1,$ $I_{QPII1} = I_A + I_B - I_A/n_1,$ $R_{TC A} = (r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_K \ell_1)/n_1 + r_p(\ell_1 + \ell_2),$ $R_{TC B} = (r_K \ell_4 + r_{\phi B} \ell_{\phi B})/n_4 + r_K \ell_3/n_3 + r_K \ell_2/(n_2-1) + r_p(\ell_3 + \ell_4)$ $R_{AB} = r_K \ell_2 + R_{TG3}$
<p>№ 12</p>	$I_{QA1} = I_A + I_B$ $R_{TC A} = r_p(\ell_1 + \ell_2),$ $R_{TC B} = (r_K \ell_4 + r_{\phi B} \ell_{\phi B})/n_4 + r_K \ell_3/n_3 + r_K \ell_2/(n_2-1) + (r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_K \ell_1)/(n_1-1) + r_p(\ell_3 + \ell_4),$ $R_{AB} = r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_K (\ell_1 + \ell_2) + R_{TG3}$
<p>№ 13</p>	$I_{QPIB1} = I_A/n_3,$ $R_{TC A} = (r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_K \ell_1)/n_1 + r_K \ell_2/n_2 + r_K \ell_3/n_3 + r_p \ell_{AB},$ $R_{TC B} = 0, R_{AB} = R_{TG3}$

Окончание таблицы 4.1

Расчетная схема	Расчетные формулы
	$I_{QPIB1} = I_A/n_3,$ $I_{QPI21} = I_A + I_B - I_A/n_3,$ $R_{TC_A} = (r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_K \ell_1)/n_1 + r_K \ell_2/n_2 + r_K \ell_3/n_3 + r_p \ell_{AB},$ $R_{TC_B} = (r_K \ell_4 + r_{\phi B} \ell_{\phi B})/(n_4 - 1),$ $R_{AB} = r_K \ell_4 + r_{\phi B} \ell_{\phi B} + R_{TG3}$
	$I_{QPIB1} = I_A + I_B,$ $R_{TC_A} = (r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_K \ell_1)/n_1 + r_K \ell_2/n_2 + r_p \ell_{AB},$ $R_{TC_B} = (r_K \ell_4 + r_{\phi B} \ell_{\phi B})/(n_4 - 1) + r_K \ell_3/(n_3 - 1),$ $R_{AB} = r_K (\ell_3 + \ell_4) + r_{\phi B} \ell_{\phi B} + R_{TG3}$
	$I_{QPI21} = I_A - I_A/n_3,$ $R_{TC_A} = (r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_K \ell_1)/n_1 + r_K \ell_2/n_2 + r_K \ell_3/n_3 + r_p \ell_{AB},$ $R_{TC_B} = \infty, \quad R_{AB} = r_K \ell_4 + r_{\phi B} \ell_{\phi B} + R_{TG3}$
	$I_{QPI21} = I_A + I_B - I_B/n_4,$ $R_{TC_A} = (r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_K \ell_1)/n_1 + r_K \ell_2/n_2 + r_K \ell_3/(n_3 - 1) + r_p(\ell_1 + \ell_2),$ $R_{TC_B} = (r_K \ell_4 + r_{\phi B} \ell_{\phi B})/n_4 + r_p(\ell_3 + \ell_4),$ $R_{AB} = r_K \ell_3 + R_{TG3}$

Таблица 4.2 – Расчетные схемы короткого замыкания при вынужденных схемах питания межподстанционной зоны

Расчетная схема	Расчетные формулы
	$I_{QA1} = I_A,$ $R_{TC_A} = r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_{\phi B} \ell_{\phi B} + 0,5r_K \ell_{AB} + r_p \ell_{AB},$ $R_{TC_B} = 0, \quad R_{AB} = R_{TG3}$
	$I_{QA1} = I_A + I_B,$ $R_{TC_A} = r_p(\ell_1 + \ell_2),$ $R_{TC_B} = r_K(\ell_3/n_3 + \ell_4/n_4 + \ell_5/n_5 + \ell_6/n_6) + (r_K \ell_7 + r_{\phi B} \ell_{\phi B})/n_7 + r_p(\ell_3 + \ell_4 + \ell_5 + \ell_6 + \ell_7),$ $R_{AB} = r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_K(\ell_1 + \ell_2) + R_{TG3}$

Окончание таблицы 4.2

Расчетная схема	Расчетные формулы
<p>№ 20</p>	$I_{Q\text{III}1\text{C}1} = I_A + I_B,$ $R_{\text{TC}A} = (r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_K \ell_1)/n_1 + r_K \ell_2/n_2 + r_p (\ell_1 + \ell_2 + \ell_3 + \ell_4 + \ell_5),$ $R_{\text{TC}B} = r_K [\ell_3/(n_3 - 1) + \ell_4/(n_4 - 1) + \ell_5/(n_5 - 1)] + r_K \ell_6/n_6 + (r_K \ell_7 + r_{\phi B} \ell_{\phi B})/n_7 + r_p (\ell_6 + \ell_7),$ $R_{AB} = r_K (\ell_3 + \ell_4 + \ell_5) + R_{\text{TR}3}$
<p>№ 21</p>	$I_{Q\text{III}2\text{B}1} = I_A + I_B,$ $R_{\text{TC}A} = (r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_K \ell_1)/n_1 + r_K (\ell_2/n_2 + \ell_3/n_3 + \ell_4/n_4 + \ell_5/n_5) + r_p \ell_{AB},$ $R_{\text{TC}B} = r_K \ell_6/(n_6 - 1) + (r_{\phi B} \ell_{\phi B} + r_K \ell_7)/(n_7 - 1),$ $R_{AB} = r_K (\ell_6 + \ell_7) + r_{\phi B} \ell_{\phi B} + R_{\text{TR}3}$
<p>№ 22</p>	$I_{Q\text{III}11} = I_A + I_B - I_A/n_1,$ $R_{\text{TC}A} = (r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_K \ell_1)/n_1 + r_p (\ell_1 + \ell_2),$ $R_{\text{TC}B} = r_K \ell_2/(n_2 - 1) + r_K (\ell_3/n_3 + \ell_4/n_4 + \ell_5/n_5 + \ell_6/n_6) + (r_K \ell_7 + r_{\phi B} \ell_{\phi B})/n_7 + r_p (\ell_3 + \ell_4 + \ell_5 + \ell_6 + \ell_7),$ $R_{AB} = r_K \ell_2 + R_{\text{TR}3}$
<p>№ 23</p>	$I_{Q\text{III}21} = I_A + I_B - I_A/n_3,$ $R_{\text{TC}A} = (r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_K \ell_1)/n_1 + r_K (\ell_2/n_2 + \ell_3/n_3) + r_p (\ell_1 + \ell_2 + \ell_3 + \ell_4 + \ell_5),$ $R_{\text{TC}B} = r_K [\ell_4/(n_4 - 1) + \ell_5/(n_5 - 1)] + r_K \ell_6/n_6 + (r_K \ell_7 + r_{\phi B} \ell_{\phi B})/n_7 + r_p (\ell_6 + \ell_7),$ $R_{AB} = r_K (\ell_4 + \ell_5) + R_{\text{TR}3}$
<p>№ 24</p>	$I_{Q\text{III}41} = I_A + I_B - I_A/n_6,$ $R_{\text{TC}A} = (r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_K \ell_1)/n_1 + r_K (\ell_2/n_2 + \ell_3/n_3 + \ell_4/n_4 + \ell_5/n_5 + \ell_6/n_6) + r_p \ell_{AB},$ $R_{\text{TC}B} = (r_K \ell_7 + r_{\phi B} \ell_{\phi B})/(n_7 - 1),$ $R_{AB} = r_{\phi B} \ell_{\phi B} + r_K \ell_7 + R_{\text{TR}3}$

В таблицах 4.1 и 4.2 приведены формулы для вычисления значений $R_{\text{TC}A}$, $R_{\text{TC}B}$, R_{AB} , входящих в выражения (4.1).

В этих формулах:

$r_{\phi A}$, $r_{\phi B}$ – сопротивление 1 км питающих линий смежных тяговых подстанций A и B , соответственно, Ом/км;

r_k – сопротивление 1 км контактной сети одного пути, Ом/км;

r_p – сопротивление 1 км рельсовой цепи всех путей, Ом/км;

ℓ_{AB} – расстояние между тяговыми подстанциями A и B , км;

n_1 , n_2 , ..., n_7 – число путей соответственно на участках ℓ_1 , ℓ_2 , ..., ℓ_7 (см. рисунки 4.1 и 4.2), контактная сеть на которых находится под напряжением.

Номера расчетных схем, используемых при выборе уставок защит, указаны в таблице 5.2. Остальные расчетные схемы могут использоваться для определения параметров коротких замыканий при анализе поведения релейных защит в нештатных ситуациях.

4.3 Параметры схем замещения

4.3.1 Сопротивление проводов контактной сети

Величины погонных электрических сопротивлений проводов, используемых для питающих и отсасывающих линий, несущих тросов, а также усиливающих проводов, приведены в таблице 4.3 для температуры 20 °С. При расчетах параметров короткого замыкания эти сопротивления должны быть приведены к расчетной температуре окружающей среды. Приведение осуществляется по формуле:

$$r = r_{20} \frac{1 + \beta_r t_p}{1 + \beta_r 20}, \quad (4.2)$$

где r – погонное сопротивление одного провода при расчетной температуре t_p , Ом/км;

r_{20} – погонное сопротивление этого провода при 20°С Ом/км;

β_r – температурный коэффициент сопротивления, 1/°С.

Значения β_r приведены в таблице 5.7. В упрощенных расчетах для медных бронзовых, сталемедных, алюминиевых и стальалюминиевых проводов допускается принимать $\beta_r = 0,004$ 1/°С. В качестве расчетной температуры принимают $t_p = 40$ °С. При этом $r = 1,074 \cdot r_{20}$.

Величины погонных электрических сопротивлений контактных проводов при различной степени износа указаны в таблице 4.4 для температуры 20°C. Сопротивление контактных проводов определяется с учетом их фактического износа по формуле:

$$r_{из} = \frac{100r}{100 - u}, \quad (4.3)$$

где $r_{из}$ – погонное сопротивление изношенного контактного провода, Ом/км;

r – погонное сопротивление нового (без износа) контактного провода,

Ом/км;

u – износ провода, %.

При отсутствии данных об износе сопротивление контактного провода принимают по таблице 4.4, соответствующее износу 15 %.

Таблица 4.3 – Погонное сопротивление проводов

Марка провода	Погонное электрическое сопротивление, Ом/км, при температуре 20 °C	Марка провода	Погонное электрическое сопротивление, Ом/км, при температуре 20 °C
М95	0,194	A95	0,311
М120	0,156	A120	0,246
ПБСМ1-70	0,660	A150	0,194
ПБСМ2-70	0,880	A185	0,157
ПБСМ1-95	0,509	AC35/6.2	0,777
ПБСМ2-95	0,679	AC50/8.0	0,595
ПБСА50/70	0,550	AC70/11	0,422
MCH-70	0,487	AC95/16	0,301
MCH-95	0,378	AC 120/19	0,244
MCH120	0,301	AC150/19	0,205
A70	0,413	AC185/24	0,154

Таблица 4.4 – Погонное сопротивление контактных проводов

Марка провода	Износ, %	Погонное электрическое сопротивление, Ом/км, при температуре 20 °C для номинальных сечений, мм ²			
		85	100	120	150
МФ	0	0,207	0,176	0,147	0,117
	15	0,244	0,207	0,173	0,138
	30	0,296	0,251	0,210	0,167
НЛОлФ	0	0,218	0,185	0,154	0,123
	15	0,256	0,218	0,181	0,145
	30	0,311	0,264	0,220	0,176
БрЦрФ	0	0,235	0,200	0,167	0,133
	15	0,276	0,235	0,196	0,156
	30	0,336	0,286	0,239	0,190
БрКдФ	0	0,241	0,205	0,171	0,137
	15	0,284	0,241	0,201	0,161
	30	0,344	0,293	0,244	0,196
БрМгЦрФ	0	0,253	0,215	0,179	0,143
	15	0,298	0,253	0,211	0,168
	30	0,361	0,307	0,256	0,204
БрМгФ	0	0,259	0,220	0,183	0,147
	15	0,305	0,259	0,215	0,173
	30	0,370	0,314	0,261	0,210
БрЖФ	0	0,312	0,265	0,221	0,177
	15	0,367	0,312	0,260	0,208
	30	0,446	0,378	0,316	0,253

Погонное сопротивление пучка, состоящего из нескольких параллельно соединенных проводов, вычисляют с использованием формулы:

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \dots + \frac{1}{r_i} + \dots + \frac{1}{r_q} = \sum_{i=1}^q \frac{1}{r_i}, \quad (4.4)$$

где r – погонное сопротивление пучка, Ом/км;

$r_1, r_2, \dots, r_i, \dots, r_q$ – погонные сопротивления соответственно 1-го, 2-го, ..., i -го, ..., q -го проводов, Ом/км;

q – число проводов в пучке.

Если все q проводов в пучке имеют одну марку (одинаковое сопротивление), то погонное сопротивление пучка вычисляют по формуле, Ом/км:

$$r = \frac{r_1}{q}, \quad (4.5)$$

где r_1 – погонное сопротивление одного провода, Ом/км.

Погонное сопротивление r_k контактной сети одного пути, состоящей из несущих тросов, контактных и усиливающих проводов, находят по формуле:

$$\frac{1}{r_k} = \frac{q_t}{r_t} + \frac{q_n}{r_n} + \frac{q_y}{r_y}, \quad (4.6)$$

где q_t, q_n, q_y – соответственно число несущих тросов, число контактных проводов и число усиливающих проводов;

r_t, r_n, r_y – погонные сопротивления соответственно одного несущего троса, одного контактного провода и одного усиливающего провода, Ом/км.

Таблица 4.5 – Погонное сопротивление контактной сети

Марки проводов	Погонное сопротивление контактной сети, Ом/км, при температуре, °C	
	20	40
ПБСМ1-70+МФ85	0,158	0,170
ПБСМ1-70+МФ100	0,140	0,150
ПБСА50/70+МФ100	0,134	0,144
M95+МФ85	0,100	0,107
M120+МФ100	0,083	0,089
M120+МФ100 15% изн.)	0,088	0,094
M120+2МФ100	0,057	0,061
M120+2МФ100 15% изн.)	0,062	0,067
M120+2МФ100+A185	0,044	0,047
M120+2МФ100+2A185	0,035	0,038
МФ120+2МФ100+3A185	0,028	0,030
M120+НЛОлФ100	0,085	0,091
M120+НЛОлФ100 15% изн.)	0,090	0,097
M120+2НЛОлФ100	0,058	0,062
M120+2НЛОлФ100 (15% изн.)	0,063	0,068
M120+2НЛОлФ100+A185	0,045	0,048
M120+2НЛОлФ100+2A185	0,036	0,039
M120+2НЛОлФ100+3A185	0,029	0,031

Продолжение таблицы 4.5

Марки проводов	Погонное сопротивление контактной сети, Ом/км, при температуре, °C	
	20	40
ПБСМ70+МФ85	0,1580	0,1700
ПБСМ70+МФ100	0,1400	0,1504
ПБСА50/70+МФ100	0,1340	0,1439
M95+МФ100	0,0916	0,0984
M95+МФ100 (15 % изн.)	0,0983	0,1056
M95+МФ100 (30 % изн.)	0,1041	0,1118
M95+МФ100+A185	0,0578	0,0621
M95+МФ100+2A185	0,0422	0,0453
M95+МФ100+3A185	0,0333	0,0358
M95+2МФ100	0,0602	0,0647
M95+2МФ100 (15 % изн.)	0,0662	0,0711
M95+2МФ100 (30 % изн.)	0,0715	0,0768
M95+2МФ100+A185	0,0435	0,0467
M95+2МФ100+2A185	0,0341	0,0366
M95+2МФ100+3A185	0,0280	0,0301
M120+МФ100	0,0830	0,0891
M120+МФ100 (15 % изн.)	0,0880	0,0945
M120+МФ100 (30 % изн.)	0,0920	0,0988
M120+2МФ100	0,0570	0,0612
M120+2МФ100 (15 % изн.)	0,0611	0,0656
M120+2МФ100 (30 % изн.)	0,0660	0,0709
M120+2МФ100+A185	0,0440	0,0473
M120+2МФ100+2A185	0,0327	0,0351
M120+2МФ100+3A185	0,0270	0,0290
M120+НЛЮлФ100	0,0840	0,0902
M120+НЛЮлФ100 (15 % изн.)	0,0893	0,0959
M120+НЛЮлФ100 (30 % изн.)	0,0939	0,1009
M120+2НЛЮлФ100	0,0578	0,0621
M120+2НЛЮлФ100 (15 % изн.)	0,0629	0,0676
M120+2НЛЮлФ100 (30 % изн.)	0,0675	0,0725
M120+2НЛЮлФ100+A185	0,0422	0,0453
M120+2НЛЮлФ100+2A185	0,0333	0,0358
M120+2НЛЮлФ100+3A185	0,0275	0,0295
M120+2МФ120	0,0498	0,0535
M120+2МФ120 (15 % изн.)	0,0546	0,0586
M120+2МФ120 (30 % изн.)	0,0590	0,0633
M120+2МФ120+A185	0,0378	0,0406
M120+2МФ120+2A185	0,0305	0,0328
M120+2МФ120+3A185	0,0255	0,0274
M120+2НЛЮлФ120	0,0513	0,0551
M120+2НЛЮлФ120 (15 % изн.)	0,0562	0,0604
M120+2НЛЮлФ120 (30 % изн.)	0,0607	0,0652
M120+2НЛЮлФ120+A185	0,0387	0,0416
M120+2НЛЮлФ120+2A185	0,0310	0,0333
M120+2НЛЮлФ120+3A185	0,0259	0,0278
M120+МФ150	0,0665	0,0714

Окончание таблицы 4.5

Марки проводов	Погонное сопротивление контактной сети, Ом/км, при температуре, °C	
	20	40
M120+МФ150 (15 % изн.)	0,0718	0,0771
M120+МФ150 (30 % изн.)	0,0765	0,0822
M120+МФ150+A185	0,0467	0,0502
M120+МФ150+2A185	0,0360	0,0387
M120+МФ150+3A185	0,0293	0,0315
M120+2БрФ100	0,0633	0,0680
M120+2БрФ100 (15 % изн.)	0,0685	0,0736
M120+2БрФ100 (30 % изн.)	0,0733	0,0787
M120+2БрФ100+A185	0,0451	0,0484
M120+2БрФ100+2A185	0,0350	0,0376
M120+2БрФ100+3A185	0,0286	0,0307

Значения погонных сопротивлений контактной сети для некоторых типов проводов приведены в таблице 4.5.

При наличии усиливающих проводов износ контактных проводов на общее сопротивление контактной сети влияет мало.

Сопротивление R отдельных проводов или пучка параллельно соединенных проводов заданной длины вычисляют по формуле, Ом:

$$R = r \ell, \quad (4.7)$$

где r – погонное сопротивление рассматриваемого провода (или пучка проводов), приведенное к расчетной температуре, Ом/км;

ℓ – длина провода, км.

4.3.2 Параметры тяговых подстанций

Параметры смежных тяговых подстанций A и B учитывают в схеме замещения их сопротивлением $R_{\text{п}A}$, $R_{\text{п}B}$ и расчетным напряжением $U_{A,\text{рас}}$, $U_{B,\text{рас}}$ на шинах выпрямленного тока.

Сопротивление тяговой подстанции $R_{\text{п}}$ вычисляют по формуле, Ом:

$$R_{\text{п}} = \rho + R_{\text{с}y} + R_{\text{o}\phi}, \quad (4.8)$$

где ρ – внутреннее сопротивление подстанции, Ом;

$R_{\text{с}y}$ – сопротивление сглаживающего устройства, Ом;

$R_{\text{o}\phi}$ – сопротивление отсасывающей линии, Ом.

Внутреннее сопротивление подстанции вычисляют по формуле:

$$\rho = \frac{AX_*U_{\text{H}}}{(1 - AX_*)n_{\text{T}}I_{\text{H}}}, \quad (4.9)$$

где A – коэффициент относительного наклона внешней характеристики преобразовательного агрегата;

U_{H} – номинальное напряжение на шинах выпрямленного тока, В;

I_{H} – номинальный ток одного выпрямительного агрегата, А;

n_{T} – число включенных в работу выпрямительных агрегатов;

X_* – суммарное индуктивное сопротивление, включенное в каждый из линейных проводов вторичных обмоток преобразовательного агрегата, выраженное в относительных единицах.

Коэффициент A принимают равным для шестипульсовых выпрямителей 0,5, а для двенадцатипульсовых выпрямителей 0,26. Номинальное напряжение U_{H} принимают равным 3300 В. Величину X_* вычисляют по формуле:

$$X_* = \frac{S_{\text{T}} n_{\text{T}}}{S_{\text{c}}} + \frac{(1 \pm \alpha_3) u_{\text{кпп}} S_{\text{T}} n_{\text{T}}}{100 S_{\text{п}} n_{\text{п}}} + \frac{(1 \pm \alpha_3) u_{\text{кт}}}{100}, \quad (4.10)$$

где S_{T} , $S_{\text{п}}$ – номинальные мощности первичных обмоток соответственно тягового (преобразовательного) и силового (понижающего) трансформаторов, МВ·А;

S_{c} – мощность короткого замыкания на вводах в тяговую подстанцию, МВ·А;

$u_{\text{кт}}$, $u_{\text{кпп}}$ – напряжения короткого замыкания соответственно тягового и понижающего трансформаторов, %;

α_3 – заводской допуск на величину напряжения короткого замыкания;

$n_{\text{п}}$ – число включенных в работу понижающих трансформаторов.

Мощность короткого замыкания S_{c} задается энергосистемой. Если параметры энергосистемы заданы не мощностью короткого замыкания, а сопротивлением X_{c} , Ом, приведенным к напряжению U_6 , кВ, то мощность S_{c} вычисляют по формуле, МВ·А:

$$S_{\text{c}} = \frac{U_6^2}{X_{\text{c}}}. \quad (4.11)$$

Номинальные мощности и напряжения короткого замыкания трансформаторов, а также величину номинального тока преобразовательного агрегата принимают по справочным данным. Для тяговых (преобразовательных) трансформаторов инверторов используются параметры выпрямительного режима. Данные для некоторых типов трансформаторов приведены в таблицах 4.6 и 4.7, в которых обозначения В, С, Н относятся к обмоткам соответственно высшего, среднего и низшего напряжений, а U_{tc} – номинальное напряжение сетевой обмотки преобразовательного трансформатора.

Для сглаживающего устройства тяговых подстанций допускается принимать $R_{\text{cy}} = 0,02$ Ом.

Сопротивление отсасывающей линии вычисляют в соответствии с п.4.3.1. При отсутствии данных об отсасывающей линии допускается принимать $R_{\text{oф}} = 0,02$ Ом.

Расчетное напряжение $U_{\text{рас}}$ тяговой подстанции вычисляют по формуле, В:

$$U_{\text{pac}} = \frac{(1 \pm \alpha_h)}{1 - AX_*} U_h - \kappa_{\text{пп}} n_T I_h R_{\text{п}}, \quad (4.12)$$

где α_h – допуск на величину отклонения напряжения на вводах в тяговую подстанцию;

$\kappa_{\text{пп}}$ – коэффициент загрузки неповрежденных путей.

Таблица 4.6 – Характеристики понижающих трансформаторов

Тип трансформатора	Электрические характеристики понижающих трансформаторов					
	$S_{\text{п}},$ МВ·А	U_h, kV			$u_{\text{кп}, \text{в-н}}, \%$	
		В	С	Н	макс.	ср.
ТДТН-25000/220	25	230	38,5	6,6; 11	22,3	20
ТДТН-40000/220-70У1	40	230	38,5	11	23,1	22
ТДТН-10000/110-70	10	115	38,5	6,6	18,9	17
ТДТН-10000/110-70	10	115	38,5	11	11,7	10,5
ТДТН-10000/110-76У1	10	115	38,5	6,6; 11	18,9	17
ТДТН-16000/110-66	16	115	38,5	6,6; 10,5	18,9	17
ТДТН-16000/110-66	16	115	38,5	6,3; 11	11,1	10,5
ТДТН-25000/110-66	25	115	38,5	6,6; 11	18,1	17
ТДТН-25000/110-76У1	25	115	38,5	6,6; 11	18,1	17
ТДТН-40000/110-67У1	40	115	38,5	6,6	19	17
ТДТН-40000/110-67У1	40	115	38,5	11	11,1	10,5
ТДТН-40000/110-76У1	40	115	38,5	6,6; 11	19	17
ТД-10000/35-74У1	10	38,5	–	6,3; 11	8,3	7,5
ТД-16000/35-74У1	16	38,5	–	6,3; 10,5	7,3	8,0
						8,8

Таблица 4.7 – Характеристики преобразовательных трансформаторов

Тип трансформатора	Электрические характеристики преобразовательных трансформаторов			
	$S_t, \text{МВ·А}$	U_{tc}, kV	$u_{kt}, \%$	I_h, A
УТМРУ-6300/35Ж	3,7	6,3; 10,5	7,7	1000
	3,7	35	8,2	1000
ТМП-6300/35 ИУ1	4,66	6; 10; 35	8,6	1250
ТМПУ-6300/35ЖУ1	4,64	6	6,7	1250
	4,64	10	7,2	1250
	4,64	35	9,5	1250
ТМПУ-16000/10 ЖУ1	11,84	6; 10	6,7	3200
ТМРУ-16000/10-1	11,1	6; 10	7,0	3000
ТМРУ-16000/10 Ж	11,84	6; 10	7,35	3200
ТДП-12500/10 ЖУ1	11,8	6; 10	7,0	3200
ТДП-12500/10 ИУ1	11,9	6; 10	8,2	3150
ТДП-16000/10 ЖУ1	11,6	10,5	7,5	3200
ТДПУ-20000/10 Ж	11,9	10,5	8,2	3200
ТДПУ-20000/10 ИУ	11,9	10,5	7,48	3200
ТДПУ-20000/35 Ж	11,3	35	7,6	3000
ТДРУ-20000/10 И	11,83	6,3; 10,5	7,5	3200
ТРДП-12500/10 ЖУ1	11,4	6; 10	7,5	3150

Окончание таблицы 4.7

Тип трансформатора	Электрические характеристики преобразовательных трансформаторов			
	S_T , МВ·А	U_{Tc} , кВ	u_{kT} , %	I_h , А
ТРДП-16000/35 ЖУ1	13,4	35	8,6	3150
ТРДТП-20000/35(10) ИУ1	11,0	6;10;35	8,0	3150
ТРДТП-12500/110 ИУ1	12,7	115	8,0*	2500
ТРДТП-16000/10 ЖУ1	16,04	115	8,2*	3150
ТРДТП-20000/110 ИУ1	17,95	115	8,0*	3150
ТДРУНГ-20000/110	12,5	110	12,6	3000

* Для конкретных подстанций значение подлежит уточнению по паспортным данным трансформатора

Допустимое отклонение напряжения принимают равным $\alpha_h = 0,05$ со знаком плюс для режима максимума и со знаком минус для режима минимума энергосистемы. Для однопутного участка принимают $k_{hp} = 0,5$, для многопутных k_{hp} принимают от 0,75 до 1.

Значение сопротивления R_p и напряжение U_{pac} зависят от режима работы энергосистемы: максимального «макс» или минимального «мин».

В режиме «макс» принимают: мощность короткого замыкания на вводах в тяговую подстанцию S_c или сопротивление энергосистемы X_c – соответствующими режиму максимума энергосистемы, заводской допуск α_3 (среднее значение) на величину напряжения короткого замыкания – со знаком «минус», напряжение короткого замыкания u_{kp} понижающего трансформатора с автоматическим регулированием напряжения под нагрузкой – соответствующее минимальному паспортному значению.

В режиме «мин» принимают: значение S_c или X_c – соответствующими режиму минимума энергосистемы, значение α_3 – со знаком «плюс», значение u_{kp} – соответствующее максимальному значению.

Если не заданы другие условия, то при вычислении сопротивления R_p и расчетного напряжения U_{pac} подстанций по формулам (4.8) и (4.12) для различных режимов энергосистемы используют данные, указанные в таблице 4.8. Если параллельная работа двух понижающих трансформаторов ни в одном из режимов не предусмотрена, то для всех режимов принимают $n_p = 1$.

Таблица 4.8 – Исходные данные для формул (4.8) и (4.12)

Режим энергосистемы	Значения величин						
	S_c , МВ·А	u_{kp} , %	n_p	n_t	α_3	α_h	k_{hp}
Минимальный	500	макс	1	1	+0,05	-0,05	от 0,5 до 1
Средний	1000	ср	1	1	0	0	от 0,5 до 1
Максимальный	1500	мин	2	2	-0,05	+0,05	0

Параметр k_{hp} используется в формуле (4.12) для вычисления расчетного напряжения U_{pac} тяговой подстанции. В режиме «макс» его принимают равным нулю, в режиме «мин» – в соответствии с пояснениями к формуле (4.12).

Для приближенных расчетов допускается принимать сопротивление тяговых подстанций $R_{\text{п}}=0,14 \text{ Ом}$, $U_{\text{pac}}=3250 \text{ В}$.

Пример 4.1 Вычислить сопротивление и расчетное напряжение двухагрегатной тяговой подстанции с понижающим трансформатором типа ТДТН-25000/110-76У1 и шестипульсовым преобразовательным агрегатом ВИПЭ-2УЗ с тяговым (преобразовательным) трансформатором ТДП-12500/10-ЖУ1 в режиме минимума энергосистемы, сопротивление которой, приведенное к напряжению $U_0=115 \text{ кВ}$, равно $X_c=22 \text{ Ом}$.

Отсасывающая линия длиной $\ell_{\text{оф}}=0,5 \text{ км}$ состоит из шести проводов АС185/24.

По формуле (4.11) находим мощность короткого замыкания на вводах в подстанцию:

$$S_c = \frac{U_0^2}{X_c} = \frac{115^2}{22} = 601 \text{ МВ·А.}$$

По таблице 4.6 для понижающего трансформатора в режиме минимума энергосистемы находим: $S_{\text{п}}=25 \text{ МВ·А}$, $u_{\text{кп}}=18,1 \%$. По таблице 4.7 для преобразовательного трансформатора находим:

$$S_T = 11,8 \text{ МВ·А}, \quad u_{\text{кт}}=7\%, I_H = 3200 \text{ А.}$$

По формуле (4.10) вычисляем:

$$X_* = \frac{11,8 \cdot 1}{601} + \frac{(1+0,05) \cdot 18,1 \cdot 11,8 \cdot 1}{100 \cdot 25 \cdot 1} + \frac{(1+0,05) \cdot 7}{100} = 0,183.$$

По формуле (4.9) находим:

$$\rho = \frac{AX_* U_H}{(1 - AX_*) \cdot n_T I_H} = \frac{0,5 \cdot 0,183 \cdot 3300}{(1 - 0,5 \cdot 0,183) \cdot 1 \cdot 3200} = 0,104 \text{ Ом.}$$

Принимаем $R_{\text{cy}}=0,02 \text{ Ом}$.

По таблице 4.3 для провода АС185/24 находим $r_{1,20}=0,154 \text{ Ом/км}$.

По формуле (4.2) приводим это сопротивление к температуре 40°C:

$$r_1 = 0,154 \frac{1+0,004 \cdot 40}{1+0,004 \cdot 20} = 0,165 \text{ Ом/км.}$$

Погонное сопротивление отсасывающей линии, состоящего из шести проводов, вычисляем по формуле (4.5)

$$r_{\text{оф}} = 0,165/6 = 0,028 \text{ Ом/км.}$$

По формуле (4.7) находим сопротивление отсасывающей линии

$$R_{\text{оф}} = 0,028 \cdot 0,5 = 0,014 \text{ Ом.}$$

Сопротивление подстанции находим по формуле (4.8)

$$R_{\text{п}} = \rho + R_{\text{cy}} + R_{\text{оф}} = 0,104 + 0,020 + 0,014 = 0,138 \text{ Ом.}$$

Расчетное напряжение вычисляем по формуле (4.12)

$$U_{\text{pac}} = \frac{(1-0,05) \cdot 3300}{1-0,5 \cdot 0,183} - 0,75 \cdot 1 \cdot 3200 \cdot 0,138 = 3120 \text{ В.}$$

4.3.3 Параметры места повреждения

Параметры места повреждения контактной сети в режиме короткого замыкания следует учитывать при выборе уставок защит:

- максимальной импульсной токовой;
- максимальной токовой;
- по приращению тока;
- минимального напряжения;
- дистанционной.

При выборе уставок защит место повреждения изоляции контактной сети характеризуются двумя параметрами: сопротивлением троса группового зазем-

ления $R_{\text{тгз}}$ и падением напряжения в дуге $U_{\text{д}}$. При анализе нештатных ситуаций с обрывом и падением провода на шпальную решетку или землю принимают $U_{\text{д}} = 0$, но в цепь короткого замыкания вместо $R_{\text{тгз}}$ включают переходное сопротивление «контактная сеть-земля» R_3 .

Учет параметров места повреждения $R_{\text{тгз}}$ и $U_{\text{д}}$ необходимо осуществлять путем включения их значений в формулы для вычисления:

- наименьших токов I_A, I_B смежных тяговых подстанций (по 4.4.2);
- наименьших токов $I_{\text{k,min}}$ рассматриваемых присоединений (по 5.4);
- сопротивлений R_{k} , измеряемых защитой присоединений (по 5.7).

При вычислении наибольшего значения $I_{\text{k,max}}$ тока короткого замыкания параметры места повреждения $R_{\text{тгз}}$ и $U_{\text{д}}$ не учитывают.

Сопротивление троса группового заземления вычисляют в соответствии с 4.3.1. Погонное сопротивление троса принимают по таблице 4.3 и пересчитывают по формуле (4.2) для расчетной температуры 40 °C. Сопротивление троса группового заземления вычисляют по формуле (4.7). Конструктивная длина троса группового заземления регламентируется [3]. В качестве расчетной длины троса группового заземления $\ell = \ell_{\text{тгз}}$ принимают расстояние от точки присоединения заземляющего спуска до наиболее удаленного его конца: для металлических опор $\ell_{\text{тгз}} = 0,3$ км, для железобетонных опор $\ell_{\text{тгз}} = 0,6$ км. В соответствии с [2, 3] длина и сечение троса группового заземления не должны ограничивать нормальную работу защиты от токов короткого замыкания.

Величину падения напряжения в дуге $U_{\text{д}}$ вычисляют по формуле, В:

$$U_{\text{д}} = 1350L_{\text{v}}n_{\text{из}}b, \quad (4.13)$$

где L_{v} – длина пути утечки по поверхности одного изолятора, м;

$n_{\text{из}}$ – число изоляторов в гирлянде;

b – коэффициент, учитывающий возможность развития дуги по наикратчайшему пути в воздухе.

Длину пути утечки принимают в соответствии с типом используемых в контактной сети изоляторов на основании справочных данных. При их отсутствии допускается принимать эту длину равной для тарельчатых изоляторов от 0,26 до 0,37 м, а для тарельчатых грязестойких изоляторов – от 0,45 до 0,48 м.

Коэффициент b принимают равным от 0,5 до 0,8. Если применяются защиты с выдержкой времени от 0,2 до 0,3 с (для двойного контактного провода), то значение коэффициента b следует увеличить в полтора - два раза за счет эффекта растягивания дуги ветром, конвекции воздуха и электродинамических усилий.

Величину переходного сопротивления R_3 «контактная сеть-земля» при падении провода на землю или шпальную решетку принимают равной от 3,5 до 4,5 Ом. В эту величину входит и сопротивление дуги.

4.3.4 Сопротивление рельсовой цепи

Все рельсы на однопутном и многопутном участках считают электриче-

ски соединенными параллельно. Значения погонного сопротивления рельсов одного пути при температуре 20 °C приведены в таблице 4.9.

Погонное сопротивление r_p рельсов многопутного участка вычисляют по формуле, Ом/км:

$$r_p = r_{p1}/m, \quad (4.14)$$

где r_{p1} – погонное сопротивление рельсов одного пути, Ом/км;
 m – число путей.

Сопротивление рельсовой цепи R_p на участке от тяговой подстанции до точки короткого замыкания вычисляют по формуле:

$$R_p = r_p \ell, \quad (4.15)$$

где ℓ – расстояние от подстанции до точки короткого замыкания, км.

Шунтирующее влияние земли оказывает незначительное влияние на параметры короткого замыкания, поэтому им пренебрегают (в запас прочности).

Таблица 4.9 – Сопротивление рельсов одного пути

Тип рельсов	Погонное сопротивление r_{p1} рельсов однопутного участка, Ом/км, при длине рельсов между стыками, м		
	12,5	25	800
P43	0,022	0,020	0,018
P50	0,019	0,018	0,016
P65	0,015	0,014	0,013
P75	0,013	0,012	0,011

Пример 4.2 Для схемы узлового питания (рисунок 4.1, б) вычислить параметры результирующей схемы замещения для расчетных схем №№ 3, 4, 7, 8 (таблица 4.1). Участок трехпутный ($n_1=n_2=3$), контактная сеть на всех путях М120+2МФ100+А185. Расстояние от тяговой подстанции А до поста секционирования ПС $\ell_1 = 7$ км, расстояние от поста секционирования ПС до тяговой подстанции В $\ell_2 = 8$ км. Питающие линии выполнены проводами 4×А185; их длина у подстанции А равна $\ell_{\phi\pi}=\ell_{\phi A}=2$ км, у подстанции В $\ell_{\phi\pi}=\ell_{\phi B}=0,5$ км. Рельсы Р65 с длиной звеньев 25 м. Сопротивление троса группового заземления $R_{tr3}=0,197$ Ом, $R_3=0$. Сопротивления подстанций $R_{\pi A}=R_{\pi B}=R_\pi=0,139$ Ом.

Погонное сопротивление питающей линии, состоящей из четырех проводов марки А185 равно 0,157 Ом/км (см. таблицу 4.3). Погонное сопротивление питающей линии, состоящей из 4-х проводов марки А185 при температуре 40°C находим по формулам (4.2) и (4.5)

$$r_\phi = \frac{0,157}{4} \cdot 1,074 = 0,042 \text{ Ом/км.}$$

Погонное сопротивление контактной сети при температуре 40°C находим по таблице 4.4: $r_k=0,047$ Ом/км. Погонное сопротивление рельсов находим по таблице 4.9 и формуле (4.14): $r_p=r_{p1}/m=0,014/3=0,005$ Ом/км.

По формулам, приведенным в таблице 4.1 для расчетной схемы № 3, находим ($\ell_1=\ell_{\phi\pi}$, $\ell_2=\ell_{\pi B}$)

$$R_{tcA} = (r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_k \ell_1)/n_1 + r_p \ell_1 = (0,042 \cdot 2 + 0,047 \cdot 7)/3 + 0,005 \cdot 7 = 0,173 \text{ Ом,}$$

$$R_{tcB} = (r_{\phi B} \ell_{\phi B} + r_k \ell_2)/n_2 + r_p \ell_2 = (0,042 \cdot 0,5 + 0,047 \cdot 8)/3 + 0,005 \cdot 8 = 0,172 \text{ Ом,}$$

$$R_{AB} = R_{\text{тгз}} = 0,197 \text{ Ом.}$$

По формулам (4.1) вычисляем

$$R_A = R_{\text{пA}} + R_{\text{tcA}} = 0,139 + 0,173 = 0,312 \text{ Ом,}$$

$$R_B = R_{\text{пB}} + R_{\text{tcB}} = 0,139 + 0,172 = 0,311 \text{ Ом.}$$

$$R_{AB} = R_{\text{tcAB}} + R_{\text{тгз}} = 0 + 0,197 = 0,197 \text{ Ом.}$$

Для расчетной схемы № 4 по таблице 4.1 находим

$$R_{\text{tcA}} = r_p \ell_1 = 0,005 \cdot 7 = 0,035 \text{ Ом. } R_{\text{tcB}} = \infty,$$

$$R_{AB} = r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_k \ell_1 + R_{\text{тгз}} = 0,042 \cdot 2 + 0,047 \cdot 7 + 0,197 = 0,610 \text{ Ом.}$$

По формулам (4.1) вычисляем

$$R_A = R_{\text{пA}} + R_{\text{tcA}} = 0,139 + 0,035 = 0,174 \text{ Ом,}$$

$$R_B = R_{\text{пB}} + R_{\text{tcB}} = R_{\text{пB}} + \infty = \infty.$$

Для расчетной схемы № 7 по формулам, приведенным в таблице 4.1 находим

$$\begin{aligned} R_{\text{tcA}} &= (r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_k \ell_1)/n_1 + (r_{\phi B} \ell_{\phi B} + r_k \ell_2)/n_2 + r_p \ell_{AB} = \\ &= (0,042 \cdot 2 + 0,047 \cdot 7)/3 + (0,042 \cdot 0,5 + 0,047 \cdot 8)/3 + 0,005 \cdot (7+8) = 0,345 \text{ Ом,} \end{aligned}$$

$$R_{\text{tcB}} = 0, \quad R_{AB} = 0,197 \text{ Ом.}$$

По формулам (4.1) находим для расчетной схемы № 7

$$R_A = R_{\text{пA}} + R_{\text{tcA}} = 0,139 + 0,345 = 0,484 \text{ Ом,}$$

$$R_B = R_{\text{пB}} + R_{\text{tcB}} = 0,139 + 0 = 0,139 \text{ Ом.}$$

Для расчетной схемы № 8 по таблице 4.1 находим

$$R_{\text{tcA}} = (r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_k \ell_1)/n_1 + r_p \ell_{AB} = (0,042 \cdot 2 + 0,047 \cdot 7)/3 + 0,005 \cdot (7+8) = 0,213 \text{ Ом,}$$

$$R_{\text{tcB}} = \infty,$$

$$R_{AB} = r_{\phi B} \ell_{\phi B} + r_k \ell_2 + R_{\text{тгз}} = 0,042 \cdot 0,5 + 0,047 \cdot 8 + 0,197 = 0,594 \text{ Ом.}$$

По формулам (4.1) для расчетной схемы № 8 получаем:

$$R_A = R_{\text{пA}} + R_{\text{tcA}} = 0,139 + 0,213 = 0,352 \text{ Ом,}$$

$$R_B = R_{\text{пB}} + R_{\text{tcB}} = R_{\text{пB}} + \infty = \infty.$$

4.4 Вычисление параметров короткого замыкания для расчетных схем

4.4.1 Методы вычислений

Для каждого из выключателей Q тяговой сети в зависимости от рассматриваемого вида устройства защиты, уставку которой надлежит выбрать, необходимо определить расчетное значение одного из следующих параметров короткого замыкания при расчетной схеме питания, указанной в таблице 5.1:

I_O – ток выключателя Q ;

U_O – напряжение на шинах, к которым подключен выключатель Q ;

R_O – сопротивление цепи короткого замыкания, измеряемое защитой на выключателе Q .

Для минимальных значений тока используется обозначение $I_O = I_{k,\min}$, для максимальных значений тока, напряжения и сопротивления используются обозначения, соответственно, $I_O = I_{k,\max}$, $U_O = U_{k,\max}$, $R_O = R_{k,\max}$.

Вычисление указанных параметров следует выполнять одним из следующих методов:

- с использованием программного комплекса «КОРТЭС»;
- по формулам, приведенным в настоящей Инструкции.

В обоих случаях расчетные схемы питания и исходные данные следует использовать в соответствии с 4.2 и 4.3.

4.4.2 Токи в расчетной схеме

Для схем питания (рисунки 4.1 и 4.2), а также для расчетных схем, приведенных в таблицах 4.1 и 4.2, токи I_A , I_B смежных подстанций и ток I_k в месте короткого замыкания вычисляют по формулам, А:

$$I_A = \frac{\left(U_{A,\text{рас}} - U_d\right) \left(1 + \frac{R_{AB}}{R_B}\right) - \left(U_{B,\text{рас}} - U_d\right) \frac{R_{AB}}{R_B}}{R_A + R_{AB} \left(1 + \frac{R_A}{R_B}\right)}, \quad (4.16)$$

$$I_B = \frac{\left(U_{B,\text{рас}} - U_d\right) \left(1 + \frac{R_{AB}}{R_A}\right) - \left(U_{A,\text{рас}} - U_d\right) \frac{R_{AB}}{R_A}}{R_B + R_{AB} \left(1 + \frac{R_B}{R_A}\right)}, \quad (4.17)$$

$$I_k = I_A + I_B, \quad (4.18)$$

где $U_{A,\text{рас}}$, $U_{B,\text{рас}}$ – расчетные напряжения смежных тяговых подстанций A и B , определяемые в соответствии с 4.3.2, В;

U_d – падение напряжения в дуге, вычисляемое в соответствии с 4.3.3, В;

R_A , R_B , R_{AB} – результирующие сопротивления схемы замещения межподстанционной зоны при заданных схеме питания и месте короткого замыкания, определяемые по формулам (4.1) и по формулам, приведенным в таблице 4.1, в соответствии с 4.3, Ом.

Допускается принимать расчетные напряжения $U_{A,\text{рас}}$, $U_{B,\text{рас}}$ смежных подстанций A и B одинаковыми $U_{A,\text{рас}} = U_{B,\text{рас}} = U_{\text{рас}}$. В этом случае токи подстанций вычисляют по формулам:

$$I_A = \frac{U_{\text{рас}} - U_d}{R_A + R_{AB} \left(1 + \frac{R_A}{R_B}\right)}, \quad (4.19)$$

$$I_B = \frac{U_{\text{рас}} - U_d}{R_B + R_{AB} \left(1 + \frac{R_B}{R_A}\right)}, \quad (4.20)$$

Ток выключателя I_Q в расчетных схемах ($I_Q = I_{Q41}$, $I_Q = I_{QPB1}$, ...) определяют по формулам, приведенным в таблицах 4.1 и 4.2 для соответствующих схем.

Для всех схем используют следующую последовательность расчетов:

- вычисляют значения сопротивлений R_{nA} , R_{nB} и расчетных напряжений $U_{A,\text{рас}}$, $U_{B,\text{рас}}$ тяговых подстанций по 4.3.2;
- задаются расчетной схемой (таблицы 4.1 и 4.2);

- для выбранной расчетной схемы вычисляют значения сопротивлений R_{tcA} , R_{tcB} , R_{AB} в соответствии с 4.3.1 – 4.3.4;
- вычисляют значения R_A , R_B по формулам (4.1);
- вычисляют токи I_A и I_B по формулам (4.16), (4.17) или (4.19), (4.20);
- вычисляют ток выключателя I_Q в расчетной схеме по формуле, приведенной в таблицах 4.1 или 4.2 для заданной схемы.

Пример 4.3 Для исходных данных, приведенных в примерах 4.1 и 4.2 определить ток $I_{Q41}=I_{k,min}$ выключателя $QA1$ тяговой подстанции A в расчетной схеме № 3 таблицы 4.1.

В примере 4.1. вычислены сопротивление и напряжение тяговой подстанции :

$$R_{nA} = 0,138 \text{ Ом}, \quad U_{A,pac} = 3120 \text{ В.}$$

Падение напряжения в дуге при двух изоляторах в гирлянде находим по формуле (4.13)

$$U_d = 1350L_y n_{iz} b = 1350 \cdot 0,26 \cdot 2 \cdot 0,76 = 535 \text{ В.}$$

По формулам, приведенным в таблице 4.1 для схемы № 3, в примере 4.2 вычислены:

$$R_{tcA} = 0,173 \text{ Ом}, \quad R_{tcB} = 0,172 \text{ Ом}, \quad R_{AB} = R_{trz} = 0,197 \text{ Ом.}$$

По формулам (4.1) находим

$$\begin{aligned} R_A &= R_{nA} + R_{tcA} = 0,138 + 0,173 = 0,311 \text{ Ом,} \\ R_B &= R_{nB} + R_{tcB} = 0,138 + 0,172 = 0,310 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

По формулам (4.19) находим

$$I_A = \frac{U_{pac} - U_d}{R_A + R_{AB} \left(1 + \frac{R_A}{R_B} \right)} = \frac{3120 - 535}{0,311 + 0,197 \left(1 + \frac{0,311}{0,310} \right)} = 3660 \text{ А.}$$

По формуле, приведенной в таблице 4.1 для схемы № 3, находим ток выключателя $QA1$

$$I_{Q41} = I_A / n_1 = I_{k,min} = 3660 / 3 = 1220 \text{ А.}$$

4.4.3 Напряжения в узловых точках

Напряжения на шинах подстанций A и B вычисляют по формулам:

$$U_A = U_{A,pac} - I_A R_{nA}, \quad U_B = U_{B,pac} - I_B R_{nB}. \quad (4.21)$$

Напряжение U_{vt} в узловой точке (на шинах поста секционирования ПС, а также на пунктах параллельного соединения ППС) для расчетных схем, приведенных в таблицах 4.1 и 4.2, вычисляют по формуле:

$$U_{vt} = U - I R, \quad (4.22)$$

в которой значения входящих в нее величин принимают по таблице 4.10.

Если в формулах (4.21) и (4.22) значения токов I_A , I_B , I вычислены с учетом падения напряжения в дуге U_d и сопротивления троса группового заземления R_{trz} , то для полученных значений U_A , U_B , U_{vt} при выборе уставок следует использовать обозначения $U_{k,max}$.

4.4.4 Сопротивление, измеряемое защитой выключателя

Сопротивление R_Q петли короткого замыкания, измеряемое защитой выключателя Q , вычисляют по формуле:

$$R_O = U_{\text{yt}}/I_O, \quad (4.23)$$

где I_O – ток, протекающий через выключатель Q , А; U_{yt} – напряжение той узловой точки, к которой подключен выключатель Q , В.

Если в формуле (4.23) значения U_{yt} и I_O , вычисленные с учетом падения напряжения в дуге U_d и сопротивления троса группового заземления $R_{\text{тгз}}$, то для полученного значения R_O , при выборе уставок следует использовать обозначения $R_{k,\max}$.

Таблица 4.10 – Составляющие формулы (4.22)

Номер схемы ¹⁾	Шифр узловой точки	Значения составляющих		
		U	I	R
3	ПС	U_B	I_B	$(r_{\phi B} \ell_{\phi B} + r_k \ell_2)/n_2 + r_p \ell_2$
6, 7, 8	ПС	U_A	I_A	$(r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_k \ell_1)/n_1 + r_p \ell_1$
9	ПС	U_A	I_A	$(r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_k \ell_1)/n_1 + r_p \ell_1$
10, 11,	ППС1	U_A	I_A	$(r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_k \ell_1)/n_1 + r_p \ell_1$
12	ПС	U_B	I_B	$r_{\phi B} \ell_{\phi B}/n_4 + r_k(\ell_3/n_3 + \ell_4/n_4) + r_p(\ell_3 + \ell_4)$
	ППС2	U_B	I_B	$(r_{\phi B} \ell_{\phi B} + r_k \ell_4)/n_4 + r_p \ell_4$
13, 14,	ППС1	U_A	I_A	$(r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_k \ell_1)/n_1 + r_p \ell_1$
15, 16	ПС	U_A	I_A	$r_{\phi A} \ell_{\phi A}/n_1 + r_k(\ell_1/n_1 + \ell_2/n_2) + r_p(\ell_1 + \ell_2)$
	ППС2	U_A	I_A	$r_{\phi A} \ell_{\phi A}/n_1 + r_k(\ell_1/n_1 + \ell_2/n_2 + \ell_3/n_3) + r_p(\ell_1 + \ell_2 + \ell_3)$
17	ППС1	U_A	I_A	$(r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_k \ell_1)/n_1 + r_p \ell_1$
	ПС	U_A	I_A	$r_{\phi A} \ell_{\phi A}/n_1 + r_k(\ell_1/n_1 + \ell_2/n_2) + r_p(\ell_1 + \ell_2)$
	ППС2	U_B	I_B	$(r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_k \ell_1)/n_1 + r_p \ell_1$
19, 22	ППС1	U_B	I_B	$r_{\phi B} \ell_{\phi B}/n_7 + r_k[\ell_7/n_7 + \ell_6/n_6 + \ell_5/n_5 + \ell_4/n_4 + \ell_3/n_3 + \ell_2/(n_2 - 1)] + r_p(\ell_7 + \ell_6 + \ell_5 + \ell_4 + \ell_3)$
	ПС1	U_B	I_B	$r_{\phi B} \ell_{\phi B}/n_7 + r_k(\ell_7/n_7 + \ell_6/n_6 + \ell_5/n_5 + \ell_4/n_4 + \ell_3/n_3) + r_p(\ell_7 + \ell_6 + \ell_5 + \ell_4 + \ell_3)$
	ППС2	U_B	I_B	$r_{\phi B} \ell_{\phi B}/n_7 + r_k(\ell_7/n_7 + \ell_6/n_6 + \ell_5/n_5 + \ell_4/n_4) + r_p(\ell_7 + \ell_6 + \ell_5 + \ell_4)$
	ППС3	U_B	I_B	$r_{\phi B} \ell_{\phi B}/n_7 + r_k(\ell_7/n_7 + \ell_6/n_6 + \ell_5/n_5) + r_p(\ell_7 + \ell_6 + \ell_5)$
	ПС2	U_B	I_B	$r_{\phi B} \ell_{\phi B}/n_7 + r_k(\ell_7/n_7 + \ell_6/n_6) + r_p(\ell_7 + \ell_6)$
20, 23	ПС1	U_A	I_A	$r_{\phi A} \ell_{\phi A}/n_1 + r_k(\ell_1/n_1 + \ell_2/n_2) + r_p(\ell_1 + \ell_2)$
	ППС2	U_B	I_B	$r_{\phi B} \ell_{\phi B}/n_7 + r_k[\ell_7/n_7 + \ell_6/n_6 + \ell_5/n_5 + \ell_4/(n_4 - 1)] + r_p(\ell_7 + \ell_6)$
	ППС3	U_B	I_B	$r_{\phi B} \ell_{\phi B}/n_7 + r_k[\ell_7/n_7 + \ell_6/n_6 + \ell_5/(n_5 - 1)] + r_p(\ell_7 + \ell_6)$
	ПС2	U_B	I_B	$r_{\phi B} \ell_{\phi B}/n_7 + r_k(\ell_7/n_7 + \ell_6/n_6) + r_p(\ell_7 + \ell_6)$
21, 24	ПС2	U_A	I_A	$r_{\phi A} \ell_{\phi A}/n_1 + r_k(\ell_1/n_1 + \ell_2/n_2 + \ell_3/n_3 + \ell_4/n_4 + \ell_5/n_5) + r_p(\ell_1 + \ell_2 + \ell_3 + \ell_4 + \ell_5)$
	ППС4	U_B	I_B	$(r_{\phi B} \ell_{\phi B} + r_k \ell_7)/(n_7 - 1)$

¹⁾ По таблицам 4.1 и 4.2

5 Выбор уставок защит

5.1 Общие положения

5.1.1 Особенности и области применения защит с опорами, заземленными на рельсы – в соответствии с таблицей 5.1.

5.1.2 Выбор уставок защит производится на основе сравнения параметров нормального режима при максимальных нагрузках и установившегося режима короткого замыкания в заданной точке тяговой сети. В основе выбора лежат нормативные требования по обеспечению показателей устойчивости функционирования защиты от коротких замыканий, приведенные в 2.3. Параметры нормального режима, в том числе при наличии пунктов преобразования напряжения (ППН), определяются в соответствии с разделом 3.

При расчете параметров короткого замыкания для каждого из видов защиты, в зависимости от места ее установки, заданными (обязательными для использования в расчетах) являются схема питания межподстанционной зоны и место повреждения контактной сети, режим (максимальный или минимальный), параметры места повреждения и нормативные значения коэффициентов, обеспечивающие требования устойчивости функционирования защиты (особые условия).

5.1.3 Общая сводка условий для выбора уставок защит МИЗ, ТО, МТЗ, ЗС, ЗМН и их проверки на соответствие нормативным требованиям приведены в таблице 5.2.

В графе 1 этой таблицы приведен шифр видов защиты в соответствии с таблицей 5.1.

В этой же графе в необходимых случаях указано назначение защиты: (осн) – основная, (рез) – резервная, (особ) – особая уставка для вынужденных режимов в соответствии с 2.1.2.

В графе 2 таблицы 5.2 приведены формулы для выбора уставок и их проверки на соответствие нормативным требованиям. В этих формулах использованы следующие обозначения:

$I_{y,\text{МИЗ}}$, $I_{y,\text{ТО}}$, $I_{y,\text{МТЗ}}$ – уставки по току для защит соответственно МИЗ, ТО, МТЗ;

$I_{h,\max}$ – максимальный ток нормального режима, протекающий через тот выключатель Q , для которого рассчитывается уставка защиты;

$I_{k,\min}$ – наименьшее значение тока выключателя Q с рассматриваемой защитой при коротком замыкании в конце зоны защиты или зоны резервирования;

I_Q – ток короткого замыкания, протекающий через тот выключатель Q , для которого рассчитывается защита, в заданных условиях;

Таблица 5.1 – Особенности и области применения защит

Наименование защиты (в скобках – сокращённое наименование, используемое в подстрочных элементах формул, приводимых в настоящей Инструкции)	Воздействующая величина	Назначение ¹⁾ .	Структурный элемент настоящей Инструкции, в котором приведены требования к выбору уставки	Выдержка времени, с	Действие на:		Применение на выключателях:		
					отключение или сигнал	блокировку АПВ	тяговых подстанций:	постов секционирования	пунктов параллельного соединения
Максимальная импульсная токовая защита (МИЗ) ²⁾	Ток защищаемого присоединения, скорость нарастания и приращение тока	осн. или доп. ³⁾	5.2	нет	отк	нет	+	+	+
Токовая отсечка (ТО)	Ток защищаемого присоединения	доп.	5.3	нет	отк	да	+	+	+
Максимальная токовая защита прямого направления (МТЗ)	то же	рез.	5.4	нет	отк	нет	+	+	+
Максимальная токовая защита обратного направления (МТЗО) ⁴⁾	«	рез.	5.5	от 0,1 до 0,2	отк	нет	+	-	-
Защита минимального напряжения (ЗМН) ⁵⁾	Напряжение на сборных шинах	рез.	5.6	по 2.2	отк	да	+	-	+
Защита максимального напряжения (ЗПН) ⁷⁾	тоже	доп.	-	от 0,1 до 0,15	отк	нет	+	-	-
Направленная дистанционная защита (ДЗ)	Входное сопротивление тяговой сети, фиксируемое измерительным органом защиты	рез. (осн.) ³⁾	5.7	по 5.7.1.4 и 5.7.2.2	отк	нет	+	-	+

Продолжение таблицы 5.1

Направленная защита по скорости нарастания тока (ЗСНТ)	Скорость нарастания тока защищаемого присоединения	доп.	5.8	нет		нет	+	-	-	-
Направленная защита по приращению тока(ЗПТ)	Приращение тока защищаемого присоединения за заданное время	рез.	5.9	по 2.2	отк	нет	+	-	-	-
Квазитепловая защита (КВТЗ)	Ток защищаемого присоединения и температура окружающей среды	доп.	5.10	нет	сигн отк ⁸⁾	да	+	-	-	-

¹⁾ Назначение защиты (по 2.1.4 - 2.1.7): основная – «косн.», резервная – «рез.», дополнительная – «доп.».

²⁾ Максимальная импульсная токовая защита реализуется за счет свойств автоматического выключателя. Все остальные защиты, приводимые в настоящей Инструкции, реализуются за счёт функций дополнительных схем и/или устройств, в частном случае – входят в состав функций интеллектуальных терминалов присоединения (например, ЦЗАФ-3,3), и действуют на цепь оперативного отключения выключателя.

³⁾ Если выключатели оборудованы интеллектуальными терминалами присоединения, то максимальная импульсная токовая защита может выполнять роль дополнительной защиты, но только в том случае, если при выбранной уставке зона ее действия оказывается меньше длины защищаемой зоны, т.е. не выполняются одновременно условия (2.4) и (2.8), а дистанционная защита защищаемую зону перекрывает полностью с коэффициентом чувствительности не менее указанного в таблице 2.2. В этом случае дистанционная защита выполняет роль основной. Если же для максимальной импульсной токовой защиты выполняются одновременно условия (2.4) и (2.8), то она во всех случаях выполняет функции основной. Для пунктов параллельного соединения максимальная импульсная токовая защита может использоваться только при неполяризованных выключателях. См. также примечание к 2.1.7.

⁴⁾ Максимальная токовая защита обратного направления используется только при неполяризованных выключателях для предотвращения подпитки от смежных подстанций короткого замыкания в распределительном устройстве 3,3 кВ. Защита приходит в действие после срабатывания короткозамыкателя, который, в свою очередь, включается под действием земляной защиты.

⁵⁾ За исключением поляризованных выключателей, на которых данная защита не может использоваться.

⁶⁾ На пунктах параллельного соединения защита минимального напряжения должна применяться без выдержки времени.

⁷⁾ Защиту максимального напряжения следует применять на тяговых подстанциях, если возникает возможность повышения напряжения на шинах свыше 4000 В (при рекуперации). Рекомендуется уставку по напряжению принимать – 4400 В, выдержку времени устанавливать от 0,1 до 0,15 с.

⁸⁾ Действие квазитепловой защиты является комбинированным: при достижении температурой провода уставки предупреждения защита действует на сигнал, а при дальнейшем возрастании температуры до уставки отключения – действует на отключение.

Таблица 5.2 – Общая сводка условий для выбора уставок защит и их проверки на соответствие нормативным требованиям

Вид защиты	Расчетные формулы	№№ расчетных схем по таблицам 4.1 и 4.2			Режимы, при которых необходимо вычислять указанные параметры ¹⁾	Особые условия
		ТП ²⁾	ПС ²⁾	ППС ²⁾		
МИЗ	<i>Выбор</i> $I_{y,\text{МИЗ}} \geq \kappa_3 I_{h,\text{max}}$	–	–	–	норм	$\kappa_3 \geq 1,15$
	<i>Проверка</i> $I_{y,\text{МИЗ}} \leq \kappa_{\text{ЭУ}} I_{k,\text{min}}$ (для ПС: $I_{y,\text{МИЗ}} \leq I_{k,\text{min}}$)	1, 4, 12	8, 15	11, 14, 17	мин	$\kappa_{\text{ЭУ}}$ по 2.3.2
	$I_{y,\text{МИЗ}} \leq I_{k,\text{min}} - 300$	1, 3, 4 12	8, 15	11, 14, 17	мин	ВАБ-43-6300
МИЗ (особ)	<i>Выбор</i> $I_{y,\text{МИЗ}} \geq \kappa_3 I_{h,\text{max}}$	–	–	–	вынужд	$\kappa_3 \geq 1,15$
	<i>Проверка</i> как для МИЗ (осн)	18, 19	20, 21	22, 23, 24	мин	как для МИЗ (осн)
ТО	<i>Выбор</i> $I_{y,\text{ТО}} \geq \kappa_{\text{отс}} I_{k,\text{max}}$	1, 3	7	–	макс	$\kappa_{\text{отс}} = 1,2-1,6$
	<i>Проверка</i> $\kappa_q = I_{k,\text{min}} / I_{y,\text{ТО}}$	2, 5	9	–	мин	$\kappa_q \geq 1,2$
	$I_{y,\text{ТО}} \geq \kappa_3 I_{h,\text{max}}$	–	–	–	норм	$\kappa_3 = 1,1-1,3$
МТЗ	<i>Выбор</i> $I_{y,\text{МТЗ}} \geq \kappa_3 I_{h,\text{max}}$	–	–	–	норм	$\kappa_3 = 1,1-1,3$
	<i>Проверка</i> $\kappa_q = I_{k,\text{min}} / I_{y,\text{МТЗ}}$	1, 4, 12	8, 15	11, 14, 17	мин	$\kappa_q \geq 1,25$ (осн) $\kappa_q \geq 1,15$ (рез)
МТЗ (особ)	<i>Выбор</i> $I_{y,\text{МТЗ}} \geq \kappa_3 I_{h,\text{max}}$	–	–	–	вынужд	$\kappa_3 = 1,1-1,3$
	<i>Проверка</i> $\kappa_q = I_{k,\text{min}} / I_{y,\text{МТЗ}}$	18, 19	20, 21	22, 23, 24	мин	$\kappa_q \geq 1,25$
ЗМН	<i>Выбор</i> $U_{y,\text{ЗМН}} \leq U_{h,\text{min}} / \kappa_3$	–	–	–	мин	$\kappa_3 = 1,1-1,3$
	<i>Проверка</i> $\kappa_q = U_{y,\text{ЗМН}} / U_{yt}$	5	6	11, 14	мин	$\kappa_q \geq 1,25$
ЗМН (особ)	<i>Выбор</i> $U_{y,\text{ЗМН}} \leq U_{h,\text{min}} / \kappa_3$	–	–	–	мин	$\kappa_3 = 1,1-1,3$
	<i>Проверка</i> $\kappa_q = U_{y,\text{ЗМН}} / U_{yt}$	–	20, 21	22, 23, 24	мин	$\kappa_q \geq 1,25$

Продолжение таблицы 5.2

Вид защиты	Расчетные формулы	№№ расчетных схем по таблицам 4.1 и 4.2			Режимы, при которых необходимо вычислять указанные параметры ¹⁾	Особые условия
		ТП ²⁾	ПС ²⁾	ППС ²⁾		
ДЗ	<i>Выбор</i> $R_{y,DZ} \geq k_q R_k$	1, 4	8, 15	—	мин	$k_q = 1,25$
	<i>Проверка</i> $R_{y,DZ} \leq \frac{k_a U_{h,min}}{k_3 I_{h,max}}$	—	—	—	норм	$k_3 = 1,1-1,3$
ДЗ (особ)	<i>Выбор</i> $R_{y,DZ} \geq k_q R_k$	18, 19	20, 21	—	мин	$k_q = 1,15$
	<i>Проверка</i> $R_{y,DZ} \leq \frac{k_a U_{h,min}}{k_3 I_{h,max}}$	—	—	—	вынужд	$k_3 = 1,1-1,3$

¹⁾ Обозначения режимов:
макс – максимальный режим (таблица 4.8);
мин – минимальный режим (таблица 4.8);
норм – режим нормальной работы с максимальными рабочими токами;
вынужд – вынужденный режим при отключении одной тяговой подстанции и отсутствии короткого замыкания, соответствующий проследованию по межподстанционной зоне одного грузового поезда средневзвешенной массы.

²⁾ Аббревиатуры ТП, ПС и ППС соответствуют месту расположения рассчитываемой защиты: ТП – тяговая подстанция; ПС – пост секционирования; ППС – пункт параллельного соединения.

П р и м е ч а н и я

1 При вычислении $I_{k,min}$, R_k , $U_{yt}=U_{k,max}$ для всех указанных в таблице защит на ТП, ПС и ППС следует учитывать параметры места повреждения изоляции контактной сети в соответствии с 4.3.3.

2 При использовании в качестве расчетных схем № 3 и № 7 для защит МТЗ, МИЗ и ЗС возможны излишние отключения выключателей присоединений смежных путей при коротком замыкании в конце зоны защиты.

3 При выборе уставок защит МТЗ, МИЗ и ЗС для расчетных схем №№ 4, 8, 15 возможно каскадное отключение выключателя при коротком замыкании в конце защищаемой зоны.

$U_{y,ZMN}$ – уставка защиты по напряжению минимальной ЗМН;

$U_{yt}=U_{k,max}$ – напряжение в узловой точке тяговой сети, где расположена защита, при коротком замыкании в заданных условиях.

$U_{h,min}$ – минимальное напряжение нормального режима в узловой точке тяговой сети (шины тяговой подстанции или поста секционирования, пункт параллельного соединения), где расположена защита, для которой рассчитывается уставка;

$R_{y,DZ}$ – уставка по сопротивлению защиты ЗС;

R_Q – сопротивление при коротком замыкании, измеряемое защитой того выключателя Q , для которого рассчитывается эта защита, в заданных условиях в соответствии с 4.4.4.

В заголовке граф 3, 4 и 5 шифр ТП, ПС и ППС соответствует месту расположения рассчитываемой защиты:

ТП – тяговая подстанция;
 ПС – пост секционирования;
 ППС – пункт параллельного соединения.

В графах 3, 4 и 5 указан номер расчетных схем (таблицы 4.1 и 4.2) для вычисления параметров короткого замыкания применительно к виду защит, указанных в графе 1.

В графике 6 приведены обозначения режимов, при которых необходимо вычислять указанные в графике 2 параметры:

макс – максимальный режим (таблица 4.8);

мин – минимальный режим (таблица 4.8);

норм – режим нормальной работы с максимальными рабочими токами;

вынужд – вынужденный режим при отключении одной промежуточной тяговой подстанции и отсутствии короткого замыкания, соответствующий проезду по межподстанционной зоне одного грузового поезда средневзвешенной массы.

Результатирующие параметры (воздействующие на защиту величины) коротких замыканий I_k , U_k , R_k , для заданных в таблице 5.2 расчетных схем и режимов следует вычислять при соответствующих параметрах тяговых подстанций, указанных в 4.3.2.

Для всех, указанных в таблице 5.2 защит параметры короткого замыкания $I_{k,min}$, $U_{k,max}$, $R_{k,max}$ следует определять с учетом падения напряжения в дуге U_d (или сопротивления дуги R_d) и сопротивление троса группового заземления R_{tgz} по формулам, приведенным в 5.2-5.7. При вычислении значения $I_{k,max}$ параметры дуги и троса группового заземления R_{tgz} не учитывают.

5.1.4 При использовании расчетных схем для выбора уставок следует руководствоваться следующими положениями.

При нормальной схеме питания для токовой отсечки ТО многопутного участка в качестве основных следует принимать схемы № 3 и № 7.

Для максимальной импульсной токовой, максимальной токовой и дистанционной защит в качестве основных на тяговой подстанции и посту секционирования многопутных участков при нормальной схеме питания следует принимать схемы №№ 4, 8, 12, 15, при которых обеспечивается селективность действия защит в межподстанционной зоне и их наибольшая чувствительность к коротким замыканиям. Однако использование этих схем предполагает, что при коротком замыкании в конце защищаемой зоны отключение выключателей будет происходить каскадно: сначала отключается выключатель в конце зоны (возле которого произошло замыкание), затем – выключатель пункта параллельного соединения, затем – выключатель рассматриваемого присоединения на тяговой подстанции или на посту секционирования. Процесс каскадного действия происходит естественно за счет перераспределения токов в схеме питания при отключении соответствующего выключателя. При каскадном отключении возрастают время горения дуги в месте повреждения изоляции.

На слабо загруженных участках железных дорог, если обеспечиваются требования устойчивости функционирования по 2.3, допускается использовать

для максимальной импульсной токовой, максимальной токовой и дистанционной защит присоединений тяговых подстанций и постов секционирования расчетные схемы №№ 3, 7, 10, 13, при которых отключение выключателей тяговой подстанции и поста секционирования происходит не каскадно, а одновременно. Время горения дуги сокращается. Однако при коротком замыкании в конце защищаемой зоны будут происходить излишние неселективные отключения выключателей присоединений смежных путей.

5.2 Максимальная импульсная токовая защита

5.2.1 Уставку максимальной импульсной токовой защиты $I_v = I_{v,\text{МИЗ}}$ для присоединения тяговой подстанции выбирают по условию (2.8) при $\kappa_v = 1$, т. е.

$$I_{v,\text{МИЗ}} \geq \kappa_3 I_{h,\text{max}}, \quad (5.1)$$

в котором коэффициент запаса κ_3 принимают не менее 1,15. Значение тока $I_{h,\text{max}}$ вычисляют в соответствии с 3.

Выбранная уставка проверяется по наименьшему значению $I_{k,\text{min}}$ при коротком замыкании в конце зоны защиты по выражению:

$$I_{v,\text{МИЗ}} \leq \kappa_{v_3} I_{k,\text{min}}, \quad (5.2)$$

в котором значение κ_{v_3} принимают по 2.3.2.

Кроме того, для выключателей с пониженной чувствительностью к переходным процессам при приращении тока (например, ВАБ-43-6300/30-Л, а также выключателей с уменьшенным в эксплуатации пакетом пластин индуктивного шунта или реле РДШ) необходимо соблюдение условия (2.5).

Если одновременное соблюдение условий (2.5), (5.1) и (5.2) не обеспечивается, то руководствуются 1.6.

5.2.2 Уставку $I_{v,\text{МИЗ}}$ выключателей на постах секционирования и пунктах параллельного соединения следует выбирать по условию (5.1). Выбранная уставка проверяется по условию:

$$I_{v,\text{МИЗ}} \leq I_{k,\text{min}}. \quad (5.3)$$

Значения токов $I_{h,\text{max}}$ и $I_{k,\text{min}}$, необходимые для выбора уставки защиты и проверке ее на чувствительность, определяют как для максимальной токовой защиты (подраздел 5.4) с учетом 5.1.4.

5.2.3 При выборе уставок по условию (5.1) выключателей тяговой подстанции значение тока $I_{h,\text{max}} = I_O = I_{OA1}$ вычисляют по формуле (3.9), для выключателей поста секционирования значение $I_{h,\text{max}} = I_O = I_{OPB1}$ определяют по формуле (3.10), для выключателя пункта параллельного соединения значение $I_{h,\text{max}} = I_O = I_{OP11}$ или $I_{h,\text{max}} = I_O = I_{OP21}$ вычисляют по формуле (3.11).

5.2.4 Выбранную уставку $I_{v,\text{МИЗ}}$ следует проверять на выполнение условий (2.4) и (2.5), в которых значение тока $I_{k,\text{min}}$ в режиме минимума энергосистемы вычисляют для расчетных схем, указанных в таблице 5.2 с учетом 5.1.4. Для выключателя тяговой подстанции в зависимости от схемы питания использу-

зуются расчетные схемы №№ 1, 4, 12, для выключателя поста секционирования – расчетные схемы №№ 8, 15, для выключателя пункта параллельного соединения – расчетные схемы №№ 11, 14, 17. Выполнение условий проверки уставки $I_{y,\text{МИЗ}}$ для расчетных схем №№ 8, 15 означает, что отключение выключателя на посту секционирования $QPB1$ при коротком замыкании в конце защищаемой зоны может произойти каскадно.

5.2.5 Значение тока $I_{k,\min} = I_O = I_{OA1}$ для выключателя на тяговой подстанции в расчетных схемах №№ 1, 3, 4, 12 вычисляют по формулам соответственно (5.9), (5.10), (5.11), (5.12).

5.2.6 Значение тока $I_{k,\min} = I_O = I_{OPB1}$ для выключателя поста секционирования в расчетных схемах №№ 8, 15 вычисляют по формулам соответственно (5.14), (5.15).

5.2.7 Значение тока $I_{k,\min} = I_O = I_{OP11}$ или $I_{k,\min} = I_O = I_{OP21}$ для выключателя пункта параллельного соединения в расчетных схемах №№ 11, 14, 17 вычисляют по формулам соответственно (5.16), (5.17), (5.18).

В условия (2.4) и (2.5) подставляют наименьшее значение $I_{k,\min}$ из вычисленных для этих трех схем.

5.2.8 Выбор особых уставок $I_{y,\text{МИЗ}}$ осуществляют по формуле (2.8) при коэффициенте возврата $\kappa_B = 1$, в которой ток $I_{h,\max}$ определяют в соответствии с 5.4.6 Для выбранных уставок проверяется выполнение условий (2.4) и (2.5), в которых значения $I_{k,\min}$ вычисляют для соответствующих расчетных схем как в 5.4.6, 5.4.7.

Пример 5.1 Для узловой схемы питания трехпутного участка (рисунок 4.1, б) рассчитать параметры основной максимальной импульсной токовой защиты МИЗ для выключателей тяговой подстанции и поста секционирования. На подстанции установлены выключатели ВАБ-43-4000, на посту секционирования АБ 2/4.

Контактная сеть на всех путях М120+2МФ100+A185. Расстояние от тяговой подстанции A до поста секционирования ПС $\ell_1 = 7$ км, расстояние от поста секционирования ПС до тяговой подстанции B $\ell_2 = 8$ км. Питающие линии выполнены проводами $4 \times A185$; их длина у подстанции A равна $\ell_{\phi\pi} = \ell_{\phi A} = 2$ км, у подстанции B $\ell_{\phi\pi} = \ell_{\phi B} = 0,5$ км. Рельсы Р65 с длиной звеньев 25 м.

Параметры тяговых подстанций $R_{nA} = R_{nB} = R_n = 0,138$ Ом, $U_{A,\text{pac}} = U_{B,\text{pac}} = U_{\text{pac}} = 3120$ В. Трос группового заземления на железобетонных опорах выполнен проводом AC95/16 с сопротивлением 0,306 Ом/км (таблица 4.3). С учетом длины троса 0,6 км и приведения сопротивления к температуре 40°C по формуле (4.2) получаем $R_{\text{тр}} = 1,074 \cdot 0,306 \cdot 0,6 = 0,197$ Ом.

Максимальный ток нагрузки присоединения тяговой подстанции равен $I_{h,\max} = 3000$ А, присоединения поста секционирования $I_{h,\max} = 2300$ А.

Падение напряжения в дуге при двух изоляторах в гирлянде находим по формуле (4.13)

$$U_d = 1350L_y n_{iz} b = 1350 \cdot 0,26 \cdot 2 \cdot 0,6 = 420 \text{ В.}$$

Выбираем уставку для защиты МИЗ в соответствии с таблицей 5.2. Для выключателя QA1 на тяговой подстанции A (рисунок 4.1, б) имеем: $I_{y,\text{МИЗ}} \geq \kappa_3 I_{h,\max} = 1,15 \cdot 3000 = 3450$ А. Принимаем $I_{y,\text{МИЗ}} = 3500$ А.

Для выключателя QPB1 поста секционирования получаем: $I_{y,\text{МИЗ}} \geq \kappa_3 I_{h,\max} = 1,15 \cdot 2300 = 2650$ А. Принимаем $I_{y,\text{МИЗ}} = 2700$ А.

Проверка выбранных уставок в соответствии с таблицей 5.2 производится для выключ-

чателя $QA1$ по расчетной схеме № 4, а для выключателя $QPB1$ – по расчетной схеме № 8. Параметры результирующей схемы замещения для этих случаев вычислены в примере 4.2.

Проверяем выбранную уставку выключателя $QA1$ на чувствительность для расчетной схемы № 4. По формуле (5.11) находим

$$I_{k,min} = I_{QA1} = \frac{U_{pac} - U_d}{R_{pA} + r_{\phi A}\ell_{\phi A} + (r_k + r_p)\ell_1 + R_{tgz}} = \\ = \frac{3120 - 420}{0,138 + 0,042 \cdot 2 + (0,047 + 0,005)7 + 0,197} = 3448 \text{ A.}$$

Для выключателя $QA1$ типа ВАБ-43-4000 условие проверки по формуле (2.4) и таблице 2.1 имеет вид: $I_{y,MIZ} \leq 1,05 I_Q$, т.е. $I_{y,MIZ} \leq 1,05 \cdot 3448 \text{ A}$ или $I_{y,MIZ} \leq 3620 \text{ A}$. Поскольку принято $I_{y,MIZ} = 3500 \text{ A}$, то условия проверки (2.4) выполняются.

Проверяем уставку выключателя $QPB1$ на посту секционирования (расчетная схема № 8 по таблице 4.1) на чувствительность к коротким замыканиям. По формулам, приведенным в таблице 4.1, для схемы № 8 вычисляем

$$R_{tcA} = (r_{\phi A}\ell_{\phi A} + r_k\ell_1)/n_1 + r_p\ell_{AB} = (0,042 \cdot 2 + 0,047 \cdot 7)/3 + 0,005 \cdot (7+8) = 0,213 \text{ Ом,} \\ R_{tcB} = \infty,$$

$$R_{AB} = r_{\phi B}\ell_{\phi B} + r_k\ell_2 = 0,042 \cdot 0,5 + 0,047 \cdot 8 = 0,397 \text{ Ом.}$$

По формуле (5.11) находим

$$I_{k,min} = I_{QPB1} = \frac{U_{pac} - U_d}{R_{pA} + R_{tcA} + r_k\ell_2 + r_{\phi B}\ell_{\phi B} + R_{tgz}} = \\ = \frac{3120 - 420}{0,138 + 0,213 + 0,047 \cdot 8 + 0,042 \cdot 0,5 + 0,197} = 2857 \text{ A.}$$

Для поста секционирования ПС условие чувствительности в соответствии с выражением (5.3) имеет вид $I_{y,MIZ} \leq I_Q$. Поскольку было принято для поста секционирования $I_{y,MIZ} = 2700 \text{ A}$, $I_{k,min} = 2857 \text{ A}$, то условие (5.3) выполняется. Поэтому выключатель $QPB1$ будет отключаться при коротком замыкании в любой точке зоны защиты, но, если это замыкание происходит в конце зоны, то отключение выключателя $QPB1$ будет каскадным, т.е. после отключения выключателя $QB1$ на смежной подстанции B .

5.3 Токовая отсечка

5.3.1 Уставку токовой отсечки ТО $I_{y,TO}$ выбирают по условию (2.6), в котором $I_{k,max}$ – ток, протекающий через рассматриваемый выключатель при металлическом («глухом») коротком замыкании в конце зоны защиты. Значение коэффициента отстройки k_{otc} принимают в соответствии с 2.3.4.

При вычислении этого тока сопротивление троса группового заземления и падение напряжения в дуге не учитывается.

Значение тока $I_{k,max} = I_Q$ выключателя Q ($QA1$ или $QPB1$ – в соответствии с таблицей 4.1) в условии (2.6) вычисляют по 4.4.2 или по формулам:

- для схемы № 1 (раздельное питание):

$$I_{k,max} = I_Q = I_{QA1} = \frac{U_{pac}}{R_{pA} + r_{\phi A}\ell_{\phi A} + (r_k + r_p)\ell_{AB} + r_{\phi B}\ell_{\phi B}}; \quad (5.4)$$

- для схемы № 3 (присоединение на подстанции при узловом и параллельном питании):

$$I_{k,\max} = I_Q = I_{QA1} = \frac{U_{\text{pac}}}{n_1(R_{\text{пA}} + r_p \ell_1) + r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_k \ell_1}; \quad (5.5)$$

для схемы № 7 (присоединение на посту секционирования):

$$I_{k,\max} = I_Q = I_{QPB1} = \frac{U_{\text{pac}}}{n_2(R_{\text{пA}} + r_p \ell_{AB}) + \frac{n_2}{n_1}(r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_k \ell_1) + r_{\phi B} \ell_{\phi B} + r_k \ell_2}, \quad (5.6)$$

где n_1, n_2 – число путей с включенной в работу контактной сетью на участке соответственно ℓ_1 от тяговой подстанции A до поста секционирования ПС и на участке ℓ_2 от поста секционирования ПС до тяговой подстанции B (см. рисунок 4.1, б).

Выбранная уставка $I_{y,\text{TO}}$ должна быть проверена по чувствительности к близким коротким замыканиям и отстроена от нормальных режимов.

5.3.2 Проверка по чувствительности осуществляется по формуле (2.1), в которой $I_{k,\min}$ – это ток, протекающий через рассматриваемый выключатель при коротком замыкании вблизи места его установки в режиме минимума энергосистемы, а I_y – это выбранная уставка $I_{y,\text{TO}}$. Для выполнения требований чувствительности коэффициент чувствительности k_c должен быть не менее 1,2.

При проверке выбранной уставки $I_{y,\text{TO}}$ по условию (2.1) значения тока $I_{k,\min} = I_Q$ вычисляют по 4.4.2 или по формулам:

- для схем № 2 (раздельное питание) и № 5 (узловое и параллельное питание):

$$I_{k,\min} = I_Q = I_{QA1} = \frac{U_{\text{pac}} - U_d}{R_{\text{пA}} + R_{\text{тг3}}}; \quad (5.7)$$

- для схемы № 9 (присоединение на посту секционирования):

$$I_{k,\min} = I_Q = I_{QPB1} = \frac{n_1(U_{\text{pac}} - U_d)}{n_1(R_{\text{пA}} + r_p \ell_1 + R_{\text{тг3}}) + r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_k \ell_1}. \quad (5.8)$$

В приведенных формулах значение $R_{\text{пA}}$ вычисляют по выражению (4.8), сопротивление r_k контактной сети одного пути на длине 1 км принимают в соответствии с 4.3.1, сопротивление r_p рельсовой цепи всех путей на длине 1 км принимают в соответствии с 4.3.4, падение напряжения в дуге U_d и сопротивление троса группового заземления $R_{\text{тг3}}$ вычисляют в соответствии с 4.3.3. При вычислении токов считают, что до момента возникновения короткого замыкания контактная сеть всех путей, оборудованных контактной сетью (на участке ℓ_1 число таких путей n_1 , на участке ℓ_2 число таких путей n_2), была включена в работу.

5.3.3 Отстроенность от максимальных токов нормального режима требуется проверять по формуле (2.8), в которой принимают $I_y = I_{y,TO}$, $\kappa_B = 1$.

При проверке выбранной уставки по условию (2.8) значение тока $I_{h,max} = I_O = I_{QA1}$ для тяговых подстанций вычисляют по формуле (3.5), значение тока $I_{h,max} = I_O = I_{QPB1}$ для поста секционирования – по формуле (3.6).

5.3.4 Выдержку времени не используют.

Пример 5.2 Выбрать на тяговой подстанции и на посту секционирования уставку двунаправленной максимальной токовой защиты для прямого направления тока, выполняющей функцию токовой отсечки, при узловой схеме питания (рисунок 4.1, б) трехпутного участка ($n_1=n_2=3$) с контактной сетью М120+2МФ100+Ф185 и рельсами Р65. Расстояния: $\ell_{\phi A}=2$ км, $\ell_1=7$ км, $\ell_2=8$ км, $\ell_{\phi B}=0,5$ км. Сопротивления элементов схемы: $R_{\pi A}=R_{\pi B}=0,138$ Ом, $r_k=-0,047$ Ом/км, $r_{\phi A}=r_{\phi B}=0,042$ Ом/км, $r_p=0,005$ Ом/км, $R_{tg3}=0,197$ Ом.

Расчетное напряжение $U_{pac}=3120$ В, падение напряжения в дуге $U_d=420$ В. Ток нагрузки присоединения контактной сети на тяговой подстанции $I_{h,max}=3000$ А, присоединение на посту секционирования $I_{h,max}=2300$ А. Выдержка времени не используется.

Тяговая подстанция

Рассматриваем защиту ТО на выключателе $QA1$ тяговой подстанции A (рисунок 4.1, б). Определяем значение тока $I_{k,max}$ для этого выключателя по формуле (5.5) при коротком замыкании на посту секционирования

$$I_{k,max} = I_{QA1} = \frac{U_{pac}}{n_1(R_{\pi A} + r_p \ell_1) + r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_k \ell_1} = \\ = \frac{3120}{3(0,138 + 0,005 \cdot 7) + 0,042 \cdot 2 + 0,047 \cdot 7} = 3350 \text{ А.}$$

По условию (2.6) выбираем уставку

$$I_y \geq \kappa_{otc} I_{k,max} = 1,3 \cdot 3350 = 4352 \text{ А.}$$

Принимаем $I_y = I_{y,TO} = 4400$ А.

Проверяем условие отстроенности от нормальных режимов по формуле (2.8)

$$I_y \geq \frac{\kappa_3}{\kappa_B} I_{h,max} \quad \text{или} \quad 4400 > \frac{1,2}{1} 3000 = 3600 \text{ А.}$$

Условие отстройки выполняется.

Проверяем по формуле (2.1) чувствительность при близких коротких замыканиях. Находим по формуле (5.7) значение $I_{k,min}$

$$I_{k,min} = I_{QA1} = \frac{U_{pac} - U_d}{R_{\pi A} + R_{tg3}} = \frac{3120 - 420}{0,138 + 0,197} = 8060 \text{ А.}$$

По формуле (2.1) вычисляем

$$\kappa_q = \frac{I_{k,min}}{I_y} = \frac{8060}{4400} = 1,83.$$

Полученное значение κ_q больше указанного в таблице 2.2, поэтому условие чувствительности выполняется.

Пост секционирования

Рассматриваем защиту ТО на выключателе $QPB1$ поста секционирования ПС (рисунок 4.1, б). Определяем значение тока $I_{k,max}$ для этого выключателя по формуле (5.6) при коротком замыкании на шинах смежной тяговой подстанции

$$I_{k,\max} = I_{QPB1} = \frac{U_{\text{pac}}}{n_2(R_{\text{пA}} + r_p \ell_{AB}) + \frac{n_2}{n_1}(r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_k \ell_1) + r_{\phi B} \ell_{\phi B} + r_k \ell_2} =$$

$$= \frac{3120}{3(0,138 + 0,005 \cdot 15) + \frac{3}{3}(0,042 \cdot 2 + 0,047 \cdot 7) + 0,042 \cdot 0,5 + 0,047 \cdot 8} = 2150 \text{ A.}$$

Принимаем $I_y = I_{y,\text{TO}} = 2500 \text{ A.}$

Проверяем условие отстроенности от нормальных режимов по формуле (2.8)

$$I_y \geq \frac{\kappa_3}{\kappa_B} I_{h,\max} \quad \text{или} \quad 2500 < \frac{1,2}{1} 2300 = 2760 \text{ A.}$$

Условие отстройки не выполняется, поэтому увеличиваем значение уставки до $I_y = I_{y,\text{TO}} = 2800 \text{ A,}$ при котором условие (2.8) выполняется.

Проверяем выполнение условия чувствительности при близких коротких замыканиях. Находим по формуле (5.8) значение $I_{k,\min}$

$$I_{k,\min} = I_{QPB1} = \frac{n_1(U_{\text{pac}} - U_d)}{n_1(R_{\text{пA}} + r_p \ell_1 + R_{\text{тг3}}) + r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_k \ell_1} =$$

$$= \frac{3(3120 - 420)}{3(0,138 + 0,005 \cdot 7 + 0,197) + 0,042 \cdot 2 + 0,047 \cdot 7} = 5318 \text{ A.}$$

По формуле (2.1) вычисляем

$$\kappa_q = \frac{I_{k,\min}}{I_y} = \frac{5318}{2800} = 1,90.$$

Сравнивая полученное значение с требованиями по таблице 2.2, устанавливаем, что условие чувствительности выполняется.

5.4 Максимальная токовая защита прямого направления

5.4.1 Уставку максимальной токовой защиты МТЗ $I_{y,\text{MTZ}} (I_{y,\text{ст}})^*$ следует выбирать по условию (2.8), в котором для автоматических быстродействующих выключателей и защит без выдержки времени принимают $\kappa_B = 1.$

В условии (2.8) значение тока $I_{h,\max} = I_O = I_{OA1}$ для тяговых подстанций вычисляют по формуле (3.9), значение тока $I_{h,\max} = I_O = I_{OPB1}$ для поста секционирования – по формуле (3.10), а значение тока $I_{h,\max} = I_O = I_{OP11}$ или $I_{h,\max} = I_Q = I_{QP21}$ для пункта параллельного соединения – по формуле (3.11).

5.4.2 Выбранную уставку следует проверить на чувствительность к коротким замыканиям в конце зоны защиты по формуле (2.1). Коэффициент чувствительности при этом должен быть не менее указанных в таблице 2.2 значений в зависимости от назначения защиты.

5.4.3 При проверке выбранной уставки $I_y = I_{y,\text{MTZ}}$ защиты МТЗ присоединения тяговой подстанции на выполнение требований чувствительности по условию (2.1), значение тока $I_{k,\min} = I_O = I_{OA1}$ для МТЗ, действующей как основная защита в зоне до поста секционирования, определяют в зависимости от схемы питания по 4.4.2 или по формулам:

* В скобках здесь и далее указаны нестандартные обозначения параметров срабатывания защит, использованные в Руководстве по эксплуатации 1СР.251.208-01РЭ «Устройство цифровых защит и автоматики фидеров ЦЗАФ-3,3».

- для схемы № 1 (раздельное питание):

$$I_{k,min} = I_Q = I_{QA1} = \frac{U_{pac} - U_d}{R_{pA} + r_{\phi A} \ell_{\phi A} + (r_k + r_p) \ell_{AB} + r_{\phi B} \ell_{\phi B} + R_{tg3}}; \quad (5.9)$$

- для схемы № 3 (узловое и параллельное питание):

$$I_{k,min} = I_Q = I_{QA1} = \frac{U_{pac} - U_d}{n_1 \left[R_{pA} + R_{tcA} + R_{tg3} \left(1 + \frac{R_{pA} + R_{tcA}}{R_{pB} + R_{tcB}} \right) \right]}, \quad (5.10)$$

в формуле (5.10) отношение $(R_{pA} + R_{tcA})/(R_{pB} + R_{tcB})$ можно принять равным 1;

- для схемы № 4 (узловое питание, каскадное действие):

$$I_{k,min} = I_Q = I_{QA1} = \frac{U_{pac} - U_d}{R_{pA} + r_{\phi A} \ell_{\phi A} + (r_k + r_p) \ell_1 + R_{tg3}}; \quad (5.11)$$

для схемы № 12 (параллельное питание, каскадное действие):

$$\begin{aligned} I_{k,min} &= I_Q = I_{QA1} = I_A + I_B = \\ &= \frac{U_{pac} - U_d}{\frac{(R_{pA} + R_{tcA})(R_{pB} + R_{tcB})}{R_{pA} + R_{tcA} + R_{pB} + R_{tcB}} + r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_k (\ell_1 + \ell_2) + R_{tg3}}. \end{aligned} \quad (5.12)$$

В формулах (5.10), (5.11) и последующих вычисляют значения R_{tcA} и R_{tcB} по выражениям, приведенным в таблицах 4.1 и 4.2 для соответствующих номеров расчетных схем, значения сопротивлений подстанций R_{pA} и R_{pB} вычисляют в соответствии с 4.3.2, сопротивление троса группового заземления R_{tg3} принимают по 4.3.3, сопротивления питающих линий $r_{\phi A}$, $r_{\phi B}$ и контактной сети r_k принимают в соответствии с 4.3.1.

5.4.4 При проверке выбранной уставки $I_v = I_{v,MTZ}$ на присоединении поста секционирования на соответствие требованиям чувствительности по условию (2.1), значение тока $I_{k,min} = I_Q$ определяют по 4.4.2 или по формулам:

- для схемы № 7 (присоединение поста секционирования):

$$I_{k,min} = I_Q = I_{QPB1} = \frac{U_{pac} - U_d}{n_2 \left[R_{pA} + R_{tcA} + R_{tg3} \left(1 + \frac{R_{pA} + R_{tcA}}{R_{pB}} \right) \right]}; \quad (5.13)$$

- для схемы № 8 (каскадное действие):

$$I_{k,min} = I_Q = I_{QPB1} = \frac{U_{pac} - U_d}{R_{nA} + R_{tcA} + r_k \ell_2 + r_{\phi B} \ell_{\phi B} + R_{tg3}}; \quad (5.14)$$

для схемы № 15 (каскадное действие):

$$\begin{aligned} I_{k,min} &= I_Q = I_{QPB1} = I_A + I_B = \\ &= \frac{U_{pac} - U_d}{\frac{(R_{nA} + R_{tcA})(R_{nB} + R_{tcB})}{R_{nA} + R_{tcA} + R_{nB} + R_{tcB}} + r_k(\ell_3 + \ell_4) + r_{\phi B} \ell_{\phi B} + R_{tg3}}. \end{aligned} \quad (5.15)$$

Схема № 8 является расчетной для узлового питания контактной сети (рисунок 4.1, б).

Схема № 15 является расчетной для параллельного питания путей (рисунок 4.1, в) при каскадном отключении выключателя $QPB1$ после отключения выключателей $QB1$ и $QPB1$.

5.4.5 При проверке выбранной уставки $I_y = I_{y,MTZ}$ защиты на выключателе пункта параллельного соединения по коэффициенту чувствительности используют расчетные схемы №№ 11, 14, 17. В схеме № 11 предусмотрено каскадное отключение выключателя $QP11$ после отключения выключателя $QPA1$. В схемах № 14 и № 17 предусматривается каскадное отключение выключателя $QP21$ после отключения соответственно выключателя $QB1$ или $QPB1$. Проверка на соответствие требованиям чувствительности должна выполняться для всех трех указанных схем по условию (2.1), значение тока $I_{k,min} = I_O$ в которой определяют по 4.4.2 или по формулам:

- для схемы № 11:

$$\begin{aligned} I_{k,min} &= I_Q = I_{QP11} = \frac{n_1 - 1}{n_1} I_A + I_B = \\ &= \frac{(U_{pac} - U_d)[n_1(R_{nA} + R_{tcA}) + (n_1 - 1)(R_{nB} + R_{tcB})]}{n_1[(R_{nA} + R_{tcA})(R_{nB} + R_{tcB}) + (r_k \ell_2 + R_{tg3})(R_{nA} + R_{tcA} + R_{nB} + R_{tcB})]}; \end{aligned} \quad (5.16)$$

- для схемы № 14:

$$\begin{aligned} I_{k,min} &= I_Q = I_{QP21} = \frac{n_3 - 1}{n_3} I_A + I_B = \\ &= \frac{(U_{pac} - U_d)[n_3(R_{nA} + R_{tcA}) + (n_3 - 1)(R_{nB} + R_{tcB})]}{n_3[(R_{nA} + R_{tcA})(R_{nB} + R_{tcB}) + (r_k \ell_4 + R_{tg3})(R_{nA} + R_{tcA} + R_{nB} + R_{tcB})]}; \end{aligned} \quad (5.17)$$

- для схемы № 17

$$I_{k,min} = I_Q = I_{Q\pi 21} = \frac{n_4 - 1}{n_4} I_A + I_B = \\ = \frac{(U_{pac} - U_{\Delta})[n_4(R_{\pi A} + R_{tcA}) + (n_4 - 1)(R_{\pi B} + R_{tcB})]}{n_4[(R_{\pi A} + R_{tcA})(R_{\pi B} + R_{tcB}) + (r_k \ell_3 + R_{tg3})(R_{\pi A} + R_{tcA} + R_{\pi B} + R_{tcB})]}. \quad (5.18)$$

Значения R_{tcA} и R_{tcB} для каждой из расчетных схем вычисляют по формулам, приведенным в таблице 4.1. Значения $R_{\pi A}$ и $R_{\pi B}$ следует находить по 4.3.2.

5.4.6 Выбор особых уставок $I_{y,MTZ}$ защиты МТЗ осуществляется по формуле (2.8), в которой ток $I_{h,max}$ для выключателей на присоединениях тяговой подстанции, поста секционирования и пункта параллельного соединения определяют, соответственно, по формулам (3.9), (3.10) и (3.11) с учетом размеров движения при выведении из работы поста секционирования или отключении тяговой подстанции (см. 3.1).

Если пост секционирования выведен из работы, а его продольные разъединители замкнуты, обеспечивая раздельное двухстороннее питание контактной сети, то зона действия защиты выключателя на тяговой подстанции должна доходить до шин смежной тяговой подстанции. В этом случае одновременное выполнение условий (2.1) и (2.8) становится возможным лишь при ограничении пика пускового тока поезда максимальной массы и размеров движения. Значение $I_{h,max}$ вычисляют по формуле (3.9), в которой I_{cp} определяют по формуле (3.5) при $n_3=n_{\vartheta,GM}=1$, $k=2$.

В том случае, если продольные разъединители поста секционирования разомкнуты, зона действия защиты присоединения на тяговой подстанции не изменяется. Значение $I_{h,max}$ вычисляют по формуле (3.9), в которой I_{cp} определяют по формуле (3.5) при $k=1$. Значение n_3 вычисляют в соответствии с 3.3.1 по формуле (3.1), в которой ℓ_{3p} принимают равным расстоянию от тяговой подстанции до поста секционирования, а значение $n_{\vartheta,GM}$ – в соответствии с 3.3.4.

При отключении одной тяговой подстанции вычисление тока $I_{h,max}$ следует осуществлять по формулам (3.9) и (3.10), в которых значение I_{cp} находят по формулам (3.5) и (3.6) при $n_3=n_{\vartheta,GM}=1$, $n'_3=n'_{\vartheta,GM}=1$, $k=2$.

Выбранные уставки $I_y = I_{y,MTZ}$ необходимо проверить по условию (2.1) на выполнение требований чувствительности для заданных расчетных схем при токе $I_{k,min}$.

При выведении из работы поста секционирования ток $I_{k,min}$ выключателя $QA1$ тяговой подстанции A определяют по формуле (5.9) для расчетной схемы № 1 (если продольные разъединители поста секционирования замкнуты) или по формуле (5.11) для расчетной схемы № 4 (если эти разъединители отключены). Расчеты для схемы № 18 выполняют в эксплуатации, если такая схема питания принята дорогой для использования. При отключении промежуточной тяговой подстанции C расчетной для выключателя $QA1$ является схема № 19.

При отключении тяговой подстанции C расчетной для выключателя $Q\text{П}1\text{C}1$ поста секционирования ПС1 при определении $I_{k,\min}$ является схема №20, а для выключателя $Q\text{П}2\text{B}1$ на посту секционирования ПС2 – схема № 21.

Для выбора уставки защиты на выключателе $Q\text{П}11$ пункта параллельного соединения ППС1 используют расчетную схему № 22, для выключателя $Q\text{П}21$ пункта параллельного соединения ППС2 – расчетную схему № 23, а для выключателя $Q\text{П}41$ пункта параллельного соединения ППС4 – расчетную схему № 24.

5.4.7 В условии (2.1) значение тока $I_{k,\min} = I_O$ для вынужденных режимов вычисляют по 4.4.2 или по формулам:

- для схемы № 18:

$$I_{k,\min} = I_Q = I_{QA1} = \frac{U_{\text{pac}} - U_{\Delta}}{R_{\text{пA}} + R_{\text{tcA}} + R_{\text{тг3}} \left(1 + \frac{R_{\text{пA}} + R_{\text{tcA}}}{R_{\text{пB}}} \right)}; \quad (5.19)$$

- для схемы № 19:

$$\begin{aligned} I_{k,\min} &= I_Q = I_{QA1} = I_A + I_B = \\ &= \frac{U_{\text{pac}} - U_{\Delta}}{(R_{\text{пA}} + R_{\text{tcA}})(R_{\text{пB}} + R_{\text{tcB}}) + r_{\phi A}\ell_{\phi A} + r_k(\ell_1 + \ell_2) + R_{\text{тг3}}} ; \end{aligned} \quad (5.20)$$

- для схемы № 20:

$$I_{k,\min} = I_Q = I_{Q\text{П}1\text{C}1} = I_A + I_B = \frac{U_{\text{pac}} - U_{\Delta}}{(R_{\text{пA}} + R_{\text{tcA}})(R_{\text{пB}} + R_{\text{tcB}}) + r_k(\ell_3 + \ell_4 + \ell_5) + R_{\text{тг3}}}; \quad (5.21)$$

- для схемы № 21:

$$\begin{aligned} I_{k,\min} &= I_Q = I_{Q\text{П}2\text{B}1} = I_A + I_B = \\ &= \frac{U_{\text{pac}} - U_{\Delta}}{(R_{\text{пA}} + R_{\text{tcA}})(R_{\text{пB}} + R_{\text{tcB}}) + r_k(\ell_6 + \ell_7) + r_{\phi B}\ell_{\phi B} + R_{\text{тг3}}} ; \end{aligned} \quad (5.22)$$

- для схемы № 22:

$$\begin{aligned} I_{k,\min} &= I_Q = I_{Q\text{П}11} = \frac{n_1 - 1}{n_1} I_A + I_B = \\ &= \frac{(U_{\text{pac}} - U_{\Delta})[n_1(R_{\text{пA}} + R_{\text{tcA}}) + (n_1 - 1)(R_{\text{пB}} + R_{\text{tcB}})]}{n_1[(R_{\text{пA}} + R_{\text{tcA}})(R_{\text{пB}} + R_{\text{tcB}}) + (r_k\ell_2 + R_{\text{тг3}})(R_{\text{пA}} + R_{\text{tcA}} + R_{\text{пB}} + R_{\text{tcB}})]} ; \end{aligned} \quad (5.23)$$

- для схемы № 23:

$$I_{k,\min} = I_Q = I_{Q\Pi21} = \frac{n_3 - 1}{n_3} I_A + I_B = \\ = \frac{(U_{\text{pac}} - U_d)[n_3(R_{\text{пA}} + R_{\text{tcA}}) + (n_3 - 1)(R_{\text{пB}} + R_{\text{tcB}})]}{n_3 \{(R_{\text{пA}} + R_{\text{tcA}})(R_{\text{пB}} + R_{\text{tcB}}) + [r_k(\ell_4 + \ell_5) + R_{\text{тг3}}](R_{\text{пA}} + R_{\text{tcA}} + R_{\text{пB}} + R_{\text{tcB}})\}}; \quad (5.24)$$

- для схемы № 24:

$$I_{k,\min} = I_Q = I_{Q\Pi21} = \frac{n_6 - 1}{n_6} I_A + I_B = \\ = \frac{(U_{\text{pac}} - U_d)[n_6 R_A + (n_6 - 1) R_B]}{n_6 [R_A R_B + (r_k \ell_7 + r_{\phi B} \ell_{\phi B} + R_{\text{тг3}})(R_A + R_B)]}. \quad (5.25)$$

Значения R_A и R_B следует определять по формулам (4.1). Значения R_{tcA} и R_{tcB} для каждой из расчетных схем вычисляют по формулам, приведенным в таблице 4.1. Значения $R_{\text{пA}}$ и $R_{\text{пB}}$ следует находить по 4.3.2.

Пример 5.3 Выбрать на тяговой подстанции и на посту секционирования уставку максимальной токовой защиты, реализуемой быстродействующим выключателем с пониженной чувствительностью к переходным процессам или герконовым, гальваномагнитным а также другими видами реле тока, в том числе терминала ЦЗАФ-3,3, при узловой схеме питания (рисунок 4.1, б) трехпутного участка ($n_1=n_2=3$) с контактной сетью М120+2МФ100+Ф185 и рельсами Р65. Расстояния: $\ell_{\phi A}=2$ км, $\ell_1=7$ км, $\ell_2=8$ км, $\ell_{\phi B}=0,5$ км. Сопротивления элементов схемы: $R_{\text{пA}}=R_{\text{пB}}=0,138$ Ом, $r_k=0,047$ Ом/км, $r_{\phi A}=r_{\phi B}=0,042$ Ом/км, $r_p=0,005$ Ом/км, $R_{\text{тг3}}=0,197$ Ом.

Расчетное напряжение $U_{\text{pac}}=3120$ В, падение напряжения в дуге $U_d=420$ В. Ток нагрузки присоединения контактной сети на тяговой подстанции $I_{h,\max}=3000$ А, на посту секционирования $I_{h,\max}=2300$ А. Выдержка времени не используется.

Тяговая подстанция

Рассматриваем защиту МТЗ на выключателе $QA1$ тяговой подстанции A (рисунок 4.1, б). Выбираем уставку по условию (2.8)

$$I_y \geq \frac{k_3}{k_B} I_{h,\max} = \frac{1,15}{1} 3000 = 3450 \text{ А.}$$

Принимаем $I_y = I_{y,MTZ} = 3500$ А.

По таблице 4.1 для схемы № 3 находим

$$R_{\text{tcA}} = (r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_k \ell_1) / n_1 + r_p \ell_1 = (0,042 \cdot 2 + 0,047 \cdot 7) / 3 + 0,005 \cdot 7 = 0,173 \text{ Ом.}$$

Вычисляем значение тока $I_{k,\min}$ по формуле (5.10) при коротком замыкании возле поста секционирования при сопротивлении троса группового заземления $R_{\text{тг3}}=0,197$ Ом (провод АС95/16 длиной от любого конца до точки заземления 0,6 км)

$$I_{k,\min} = I_{QAl} = \frac{U_{\text{pac}} - U_d}{n_1 \left[R_{\text{пA}} + R_{\text{tcA}} + R_{\text{тг3}} \left(1 + \frac{R_{\text{пA}} + R_{\text{tcA}}}{R_{\text{пB}} + R_{\text{tcB}}} \right) \right]} = \\ = \frac{3120 - 420}{3[0,138 + 0,173 + 0,197(1+1)]} = 1280 \text{ А.}$$

Полученное значение 1280 А меньше уставки 3500 А, следовательно при схеме питания № 3 защита МТЗ к короткому замыканию возле поста секционирования вообще не чув-

ствительна.

Рассмотрим возможность использования защиты МТЗ при каскадном действии (после отключения выключателя $QPB1$ на посту секционирования ПС). Этому случаю соответствует (с запасом) расчетная схема № 4 (таблица 4.1). По формуле (5.11) находим для схемы № 4

$$I_{k,min} = I_{QA1} = \frac{U_{pac} - U_d}{R_{pA} + r_{\phi A} \ell_{\phi A} + (r_k + r_p) \ell_1 + R_{tgz}} = \\ = \frac{3120 - 420}{0,138 + 0,042 \cdot 2 + (0,047 + 0,005)7 + 0,197} = 3450 \text{ A.}$$

Полученное значение меньше уставки 3500 А, следовательно, и в этом случае чувствительность к короткому замыканию в конце зоны (возле поста секционирования) не обеспечивается.

Уменьшим вдвое длину, а, следовательно, и сопротивление троса группового заземления: $R_{tgz}=0,099$ Ом. По формуле (5.11) получим

$$I_{k,min} = I_{QA1} = \frac{U_{pac} - U_d}{R_{pA} + r_{\phi A} \ell_{\phi A} + (r_k + r_p) \ell_1 + R_{tgz}} = \\ = \frac{3120 - 420}{0,138 + 0,042 \cdot 2 + (0,047 + 0,005)7 + 0,099} = 3942 \text{ A.}$$

Находим по формуле (2.1)

$$\kappa_q = \frac{I_{k,min}}{I_y} = \frac{3942}{3500} = 1,13.$$

Поскольку полученное значение меньше требуемого 1,25, то чувствительность защиты недостаточна.

Если по обе стороны от поста секционирования на длине около 2 км вместо группового заземления использовать индивидуальные заземления опор, то в формуле (5.11) $R_{tgz}=0$.

Тогда

$$I_{k,min} = I_{QA1} = \frac{U_{pac} - U_d}{R_{pA} + r_{\phi A} \ell_{\phi A} + (r_k + r_p) \ell_1 + R_{tgz}} = \\ = \frac{3120 - 420}{0,138 + 0,042 \cdot 2 + (0,047 + 0,005)7 + 0} = 4607 \text{ A.}$$

Коэффициент чувствительности находим по формуле (2.1)

$$\kappa_q = \frac{I_{k,min}}{I_y} = \frac{4607}{3500} = 1,32.$$

Требуемая чувствительность ($\kappa_q \geq 1,25$) обеспечивается при каскадном отключении выключателя $QA1$ и замене возле поста секционирования группового заземления опор на индивидуальные. В расчетной схеме № 12 коэффициент чувствительности будет еще больше.

Пост секционирования

Рассматривается защита МТЗ на выключателе $QPB1$ поста секционирования ПС (рисунок 4.1, б). Выбираем уставку по условию (2.8)

$$I_y \geq \frac{\kappa_3}{\kappa_B} I_{h,max} = \frac{1,15}{1} 2300 = 2645 \text{ A.}$$

Принимаем $I_y = I_{y,MTZ} = 2700$ А.

В соответствии с таблицей 5.2 для защиты МТЗ на посту секционирования расчетной является схема № 8. Рассмотрим поведение защиты при каскадном действии после отключения выключателя $QB1$ на смежной тяговой подстанции B (рисунок 4.1, б) применительно к расчетной схеме № 8 (таблица 4.1). Для этой схемы по таблице 4.1 находим

$$R_{tcA} = (r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_k \ell_1) / n_1 + r_p \ell_{AB} = (0,042 \cdot 2 + 0,047 \cdot 7) / 3 + 0,005 \cdot 15 = 0,213 \text{ Ом.}$$

По формуле (5.14) вычисляем

$$\begin{aligned} I_{k,\min} &= I_{QPB1} = \frac{U_{\text{pac}} - U_{\Delta}}{R_{nA} + R_{tCA} + r_k \ell_2 + r_{\phi B} \ell_{\phi B} + R_{tg3}} = \\ &= \frac{3120 - 420}{0,138 + 0,213 + 0,047 \cdot 8 + 0,042 \cdot 0,5 + 0,197} = 2857 \text{ A.} \end{aligned}$$

Находим значение коэффициента чувствительности по формуле (2.1)

$$k_q = \frac{I_{k,\min}}{I_y} = \frac{2857}{2700} = 1,06.$$

Это значение ниже минимально необходимого 1,25 (таблица 2.2), поэтому чувствительность защиты МТЗ на посту секционирования не обеспечивается.

Ограничение нормальной работы защиты происходит из-за большого сопротивления троса группового заземления, не обеспечивающего выполнение п.п. 2.1.1 и 3.3.2 [3]. Следовательно, в данном случае необходимо увеличить сечение и уменьшить длину троса группового заземления, либо на длине не менее 2 км возле тяговых подстанций вместо группового использовать индивидуальное заземление опор. В последнем случае имеем $R_{tg3}=0$ и значение тока $I_{k,\min}$, вычисленное по формуле (5.14), будет равно 3610 А. Коэффициент чувствительности возрастает до $k_q=3610/2700=1,33$, что выше минимально необходимого 1,25 (таблица 2.2). Следовательно, защита обеспечит требования чувствительности. В расчетной схеме № 6 значение коэффициента чувствительности будет еще больше.

5.5 Максимальная токовая защита обратного направления

5.5.1 Уставку максимальной токовой защиты обратного направления $I_y = I_{y,MTZ0}$ выбирают по условию (2.8), в котором принимают в качестве $I_{h,max}$ – наибольшее значение тока присоединения при рекуперации, коэффициент запаса k_3 принимают от 1,1 до 1,2, коэффициент возврата $k_b=0,9$.

При отсутствии рекуперации значение $I_{h,max}$ принимают не менее 500 А.

5.5.2 Выбранная уставка проверяется на чувствительность по условию (2.1). Расчетной точкой короткого замыкания являются шины подстанции. Значение тока присоединения $I_{k,min} = I_{OA1}$ для схемы узлового питания (рисунок 4.1, б) вычисляют по 4.4.2 или по формуле:

$$I_{k,\min} = \frac{U_{\text{pac}} - U_{\Delta}}{r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_k \ell_1 + \left(\frac{r_{\phi B} \ell_{\phi B} + r_k \ell_2}{n_2} + r_p \ell_{AB} + R_{nB} \right) n_1}, \quad (5.26)$$

а для параллельного питания – по формуле:

$$I_{k,\min} = \frac{U_{\text{pac}} - U_{\Delta}}{r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_k \ell_1 + \left(\frac{r_k \ell_2}{n_2} + \frac{r_k \ell_3}{n_3} + \frac{r_{\phi B} \ell_{\phi B} + r_k \ell_4}{n_4} + r_p \ell_{AB} + R_{nB} \right) n_1}, \quad (5.27)$$

обозначения в которых соответствуют 4.1.4.

На многопутных участках рекомендуется принимать значения n_2 в формуле (5.28) и n_3, n_4 в формуле (5.27) исходя из условия, что контактная сеть одного из путей отключена.

На выключателе $QPB1$ поста секционирования (рисунок 4.1) уставка защиты $I_y = I_{y,MTZO}$ выбирается по условию (2.8), в котором принимают в качестве $I_{h,max}$ – значение, вычисленное по формуле (3.10) при $\ell = \ell_{AP}$ (расстояние от поста секционирования до тяговой подстанции A) и размерах движения, соответствующих интенсивному часу (см. 3.3), коэффициент запаса κ_3 принимают от 1,1 до 1,2, коэффициент возврата $\kappa_B = 0,9$.

Выбранная уставка проверяется на чувствительность по условию (2.1). Расчетной точкой короткого замыкания являются шины поста секционирования. Значение тока присоединения $I_{k,min} = I_{OPB1}$ вычисляют для схемы узлового питания (рисунок 4.1, б) по п. 4.4.1 или по формуле:

$$I_{k,min} = \frac{U_{pac} - U_d}{r_{\phi A}\ell_{\phi A} + r_k\ell_1 + (r_p\ell_1 + R_{nA})n_1}, \quad (5.28)$$

а для параллельного питания – по формуле:

$$I_{k,min} = \frac{U_{pac} - U_d}{r_k\ell_2 + \left[\frac{r_{\phi A}\ell_{\phi A} + r_k\ell_1}{n_1} + r_p(\ell_1 + \ell_2) + R_{nA} \right]n_2}. \quad (5.29)$$

Задача отвечает требованиям чувствительности при $\kappa_q \geq 1,25$.

5.5.3 Выдержку времени защиты для выключателей тяговых подстанций и постов секционирования принимают от 0,1 до 0,2 с для отстройки от излишних срабатываний при коротком замыкании в контактной сети вблизи выключателя смежного присоединения.

Пример 5.4 Выбрать на тяговой подстанции и на посту секционирования уставку максимальной токовой защиты для обратного направления тока МТЗО при узловой схеме питания (рисунок 4.1, б) двухпутного участка ($n_1=n_2=2$) с контактной сетью М120+2МФ100+А185 и рельсами Р65. Расстояния: $\ell_{\phi A}=2$ км, $\ell_1=7$ км, $\ell_2=8$ км, $\ell_{\phi B}=0,5$ км. Сопротивления элементов схемы: $R_{nA}=R_{nB}=0,138$ Ом, $r_k=0,047$ Ом/км, $r_{\phi A}=r_{\phi B}=0,042$ Ом/км, $r_p=0,007$ Ом/км.

Расчетное напряжение $U_{pac}=3120$ В, падение напряжения в дуге $U_d=420$ В. Ток присоединения тяговой подстанции при рекуперации $I_{h,max}=1000$ А, ток присоединения поста секционирования $I_{h,max}=2100$ А.

Тяговая подстанция

Уставка защиты МТЗО выключателя $QA1$ тяговой подстанции A (рисунок 4.1, б) должна отвечать условию (2.8)

$$I_y \geq \frac{\kappa_3}{\kappa_B} I_{h,max} = \frac{1,2}{0,9} 1000 = 1333 \text{ А.}$$

Принимаем $I_y = I_{y,MTZO} = 1350$ А.

Чувствительность проверяется по формуле (2.1), в которой значение $I_{k,min}$ вычисляют по формуле (5.26) при условии, что на участке ℓ_2 контактная сеть одного из путей отключена ($n_2=2-1=1$)

$$I_{k,\min} = \frac{U_{\text{pac}} - U_{\Delta}}{r_{\phi A}\ell_{\phi A} + r_k\ell_1 + \left(\frac{r_{\phi B}\ell_{\phi B} + r_k\ell_2}{n_2} + r_p\ell_{AB} + R_{\pi B} \right) n_1} =$$

$$= \frac{3120 - 420}{0,042 \cdot 2 + 0,047 \cdot 7 + \left(\frac{0,042 \cdot 0,5 + 0,047 \cdot 8}{2 - 1} + 0,007 \cdot 15 + 0,138 \right) 2} = 1595 \text{ A.}$$

Находим значение коэффициента чувствительности по формуле (2.1)

$$\kappa_q = \frac{I_{k,\min}}{I_y} = \frac{1595}{1350} = 1,18.$$

Поскольку защиты МТЗО и ЗМН резервируют друг друга, то полученное значение $\kappa_q = 1,18$ является достаточным (оно больше нормативного значения 1,15, определяемого по таблице 2.2).

Выдержку времени устанавливаем от 0,15 до 0,2 с.

Пост секционирования

Находим уставку защиты МТЗО для выключателя $QPB1$ поста секционирования ПС (рисунок 4.1, б) по условию (2.8)

$$I_y \geq \frac{\kappa_3}{\kappa_B} I_{h,\max} = \frac{1,2}{0,9} 2100 = 2800 \text{ A.}$$

Принимаем $I_y = I_{y,\text{МТЗО}} = 2900 \text{ A.}$

По формуле (5.28) находим значение тока присоединения поста секционирования при коротком замыкании на его шинах

$$I_{k,\min} = \frac{U_{\text{pac}} - U_{\Delta}}{r_{\phi A}\ell_{\phi A} + r_k\ell_1 + (r_p\ell_1 + R_{\pi A})n_1} =$$

$$= \frac{3120 - 420}{0,042 \cdot 2 + 0,047 \cdot 7 + (0,007 \cdot 7 + 0,138) \cdot 2} = 3430 \text{ A.}$$

По формуле (2.1) находим

$$\kappa_q = \frac{I_{k,\min}}{I_y} = \frac{3430}{2900} = 1,18.$$

При наличии на посту секционирования резервной защиты ЗМН коэффициент чувствительности в соответствии с таблицей 2.2 должен быть не менее 1,15. Это условие выполняется.

Принимаем выдержку времени от 0,15 до 0,2 с.

5.6 Защита минимального напряжения

5.6.1 На тяговых подстанциях защита минимального напряжения используется как резервная для защиты распределительного устройства 3,3 кВ. Она предотвращает подпитку места повреждения от смежных подстанций. Уставку $U_y = U_{y,\text{ЗМН}}$ выбирают по условию (2.9), в котором принимают $U_{h,\min} = 3000 \text{ В}$, а значения коэффициентов κ_3 и κ_B – в соответствии с 2.12. Выбранную уставку проверяют на чувствительность к короткому замыканию на шинах по формуле (2.2), в которой значение $U_{k,\max}$ определяется падением напряжения в дуге при перекрытии изолятора. Это падение напряжения определяют по формуле (4.13).

Допускается принимать $U_{k,\max}$ от 700 до 1000 В.

Для отстройки от коротких замыканий на смежных присоединениях контактной сети выдержку времени принимают в соответствии с 2.2.

5.6.2 На постах секционирования используется для защиты сборных шин и может выполнять роль резервной для защиты контактной сети при близких коротких замыканиях. Уставку выбирают так же, как для тяговых подстанций, но при $U_{h,min} = 2700$ В. Выдержку времени устанавливают в соответствии с 2.2.

5.6.3 На пунктах параллельного соединения защита минимального напряжения выполняется без выдержки времени. Она используется как дополнительная, ускоряя отключение близких коротких замыканий, поскольку ее действие не зависит от действия других выключателей поврежденной зоны. В отличие от других защит, которые срабатывают на пункте параллельного соединения только после отключения выключателя на посту секционирования или тяговой подстанции, защита минимального напряжения приходит в действие мгновенно. Однако, если вблизи пункта параллельного соединения находится электровоз, переходящий кратковременно в режим рекуперации при коротком замыкании в контактной сети, то действие защиты может произойти с задержкой до 0,04 с на время затухания переходных процессов в цепи электровоза.

Уставку защиты минимального напряжения для выключателей пунктов параллельного соединения выбирают по условию (2.9) при $U_{h,min} = 2400$ В, коэффициент запаса k_3 принимают от 1,1 до 1,3, коэффициент возврата $k_v = 1$. Проверку чувствительности осуществляют по формуле (2.2) при коротком замыкании возле смежной тяговой подстанции (схема № 6 по таблице 4.1).

Для пункта параллельного соединения ППС1 (рисунок 4.1, в) расчетной схемой для определения параметров короткого замыкания является схема № 11 (таблица 4.1).

Значение $U_{k,max}$ вычисляют по формуле:

$$U_{k,max} = U_{PPS1} = U_{pac} - I_A \left(R_{nA} + \frac{r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_k \ell_1}{n_1} + r_p \ell_1 \right). \quad (5.30)$$

Ток I_A подстанции A вычисляют по формуле (4.19), в которой значения результирующих сопротивлений схемы замещения R_A , R_B , R_{AB} вычисляют по формулам (4.1) с использованием данных таблицы 4.1 для схемы № 11. Значение $U_{k,max}$ можно определять также по выражению:

$$\begin{aligned} U_{k,max} &= U_{PPS1} = (I_A + I_B)R_{AB} + I_A r_p \ell_2 + U_d = \\ &= (U_{pac} - U_d) \frac{R_{AB}(R_A + R_B) + R_B r_p \ell_2}{R_{AB}(R_A + R_B) + R_A R_B} + U_d. \end{aligned} \quad (5.31)$$

Если условия чувствительности по выражению (2.2) не выполняются (коэффициент чувствительности k_q оказывается меньше 1,25), то это означает, что зона уверенного действия защиты минимального напряжения меньше, чем расстояние от пункта параллельного соединения до поста секционирования.

Пример 5.5 Определить уставку защиты минимального напряжения на пункте параллельного соединения двухпутного ($n_1=n_2=n_3=n_4=2$) участка (рисунок 4.1, в) при следующих исходных данных: сопротивления смежных тяговых подстанций $R_{\text{пA}} = R_{\text{пB}} = 0,138 \text{ Ом}$, расчетное напряжение $U_{\text{pac}}=3120 \text{ В}$ (см. пример 4.1), сопротивление питающих линий $r_{\phi A} = r_{\phi B} = 0,042 \text{ Ом/км}$, сопротивление 1 км контактной сети одного пути $r_k=0,047 \text{ Ом/км}$ (см. пример 4.2), сопротивление рельсовой цепи двухпутного участка $r_p=0,0075 \text{ Ом/км}$.

Трос группового заземления выполнен проводом АС150/19 с погонным сопротивлением $0,204 \text{ Ом/км}$. Сопротивление троса группового заземления с приведением его к температуре 40°C (см. 4.3.1) и учетом длины 0,6 км (см. п.4.3.3) равно $R_{\text{тгз}} = 1,074 \cdot 0,204 \cdot 0,6 = 0,131 \text{ Ом}$.

Падение напряжения в дуге принимаем $U_d = 420 \text{ В}$ (см. пример 5.3).

Длина питающих линий: $\ell_{\phi A} = 2 \text{ км}$, $\ell_{\phi B} = 0,5 \text{ км}$. Расстояния (см. рисунок 4.1, в): $\ell_1 = 3 \text{ км}$, $\ell_2 = 4 \text{ км}$, $\ell_3 = 4,1 \text{ км}$, $\ell_4 = 3,9 \text{ км}$, $\ell_{AB} = 15 \text{ км}$. Протяженность контактной сети от тяговой подстанции A до поста секционирования ПС $\ell_{A\text{п}} = \ell_1 + \ell_2 = 3+4 = 7 \text{ км}$, протяженность контактной сети от поста секционирования ПС до тяговой подстанции B $\ell_{B\text{п}} = \ell_3 + \ell_4 = 4,1+3,9 = 8 \text{ км}$.

В соответствии с условием (2.9) при $U_{\text{h,min}}=2700 \text{ В}$, $k_3 = 1,2$, $k_B = 1$ получаем

$$U_{y,3\text{МН}} \leq \frac{U_{\text{h,min}}}{k_3 k_B} = \frac{2700}{1,2 \cdot 1} = 2250 \text{ В.}$$

Принимаем $U_{y,3\text{МН}}=2200 \text{ В.}$

Проверяем условия чувствительности для схемы № 11.

По формулам, приведенным в таблице 4.1 для схемы № 11, находим

$$\begin{aligned} R_{\text{tcA}} &= (r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_k \ell_1)/n_1 + r_p(\ell_1 + \ell_2) = \\ &= (0,042 \cdot 2 + 0,047 \cdot 3)/2 + 0,0075 \cdot (3+4) = 0,165 \text{ Ом}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{\text{tcB}} &= (r_{\phi B} \ell_{\phi B} + r_k \ell_4)/n_4 + r_k \ell_3/n_3 + r_k \ell_2/(n_2 - 1) + r_p(\ell_3 + \ell_4) = \\ &= (0,042 \cdot 0,5 + 0,047 \cdot 3,9)/2 + 0,047 \cdot 4,1/2 + 0,047 \cdot 4/(2-1) + 0,075 \cdot (4,1+3,9) = 0,447 \text{ Ом}, \end{aligned}$$

$$R_{AB} = r_k \ell_2 + R_{\text{тгз}} = 0,047 \cdot 4 + 0,131 = 0,319 \text{ Ом.}$$

По формулам (4.1) находим результирующие сопротивления

$$R_A = R_{\text{пA}} + R_{\text{tcA}} = 0,138 + 0,165 = 0,303 \text{ Ом},$$

$$R_B = R_{\text{пB}} + R_{\text{tcB}} = 0,138 + 0,447 = 0,585 \text{ Ом.}$$

По формуле (5.31) находим напряжение у пункта параллельного соединения

$$\begin{aligned} U_{k,\text{max}} = U_{\text{ППС1}} &= (U_{\text{pac}} - U_d) \frac{R_{AB}(R_A + R_B) + R_B r_p \ell_2}{R_{AB}(R_A + R_B) + R_A R_B} + U_d = \\ &= (3120 - 420) \frac{0,319(0,303 + 0,585) + 0,585 \cdot 0,0075 \cdot 4}{0,319(0,303 + 0,585) + 0,303 \cdot 0,585} + 420 = 2185 \text{ В.} \end{aligned}$$

Находим значение коэффициента чувствительности по формуле (2.2)

$$k_q = \frac{U_{y,3\text{МН}}}{U_{\text{ППС1}}} = \frac{2200}{2185} = 1,07.$$

Полученное значение коэффициента меньше нормативного 1,25 (см. таблицу 5.2), следовательно уверенное действие защиты будет происходить только при более близких к ППС1 точках короткого замыкания. При глухих коротких замыканиях ($U_d=0$) на опоре с индивидуальным заземлением ($R_{\text{тгз}}=0$) в этом же примере получаем $R_{AB}=0,188 \text{ Ом}$, а значения R_A и R_B не изменяются. В таком случае по формуле (5.31) $U_{k,\text{max}}=1642 \text{ В}$ и по формуле (2.2) $k_q=1,34$. При таких условиях ЗМН уверенно действует при коротких замыканиях в любой точке между пунктом параллельного соединения ППС1 и постом секционирования ПС.

5.7 Дистанционная защита

5.7.1 Дистанционная защита на выключателях тяговых подстанций

5.7.1.1 Уставку $R_{y,D3}$ дистанционной защиты выбирают по условию:

$$R_{y,D3} \geq k_q R_{k,max}, \quad (5.32)$$

где $R_{k,max} = R_O$ – максимальное значение сопротивления петли короткого замыкания, измеряемое защитой выключателя Q , Ом.

Коэффициент чувствительности k_q в выражении (5.32) принимают равным 1,25, если защита выполняет роль основной и 1,15 – если она является резервной.

5.7.1.2 Вычисление значения $R_{k,max}$ в общем случае, в том числе с использованием компьютерных программ, следует выполнять по формуле (4.23) в соответствии с 4.4.1, 4.4.2 и 4.4.3 для выбранной по таблице 5.2 расчетной схемы с учетом параметров троса группового заземления и дуги. Сопротивление троса группового заземления, вычисляемое по 4.3.3, включают в соответствии с формулой (4.1) в результирующее сопротивление R_{AB} расчетной схемы (см. пример 4.2). Падение напряжения в дуге U_d , определяемое по формуле (4.13), используют при вычислении токов короткого замыкания рассматриваемого присоединения в соответствии с 4.4.1.

При ручном счете сопротивление $R_{k,max}$ следует вычислять непосредственно по приведенным в 5.7.1 и 5.7.2 формулам при учете сопротивления троса группового заземления R_{tg3} по 4.3.3 и сопротивления дуги R_d в соответствии с 5.7.1.3.

5.7.1.3 Сопротивление дуги R_d следует вычислять по формуле, Ом:

$$R_d = \frac{U_d}{I_k}, \quad (5.33)$$

где U_d – падение напряжения в дуге, определяемое по формуле (4.13), В;

I_k – наименьшее значение суммарного тока, вычисляемое по формуле (4.18), протекающего через место повреждения при коротком замыкании в конце защищаемой зоны для выбранной по таблице 4.1 расчетной схемы, А.

Сопротивление дуги R_d при коротком замыкании возле поста секционирования обычно имеет значение от 0,02 до 0,05 Ом и при коротком замыкании возле смежной тяговой подстанции – от 0,01 до 0,03 Ом.

5.7.1.4 Для вычисления $R_{k,max}$, входящего в формулу (5.32), используются по таблице 4.1 расчетные схемы № 1 (при раздельном питании) и № 4 (при узловом и параллельном питании). При уставке защиты, выбранной для схемы №4, отключение выключателя на подстанции (при коротком замыкании возле поста секционирования) происходит каскадно, т.е. после отключения выключателя на посту секционирования.

В выражении (5.32) сопротивление $R_{k,max}=R_O$, измеряемое защитой выключателя $QA1$ вычисляют по формулам:

- для расчетной схемы № 1:

$$R_{k,max} = R_{QA1} = r_{\phi A} \ell_{\phi A} + (r_k + r_p) \ell_{AB} + r_{\phi B} \ell_{\phi B} + R_{tg3} + R_d; \quad (5.34)$$

- для расчетной схемы № 3:

$$R_{k,max} = R_{QA1} = r_{\phi A} \ell_{\phi A} + (r_k + n_1 r_p) \ell_1 + n_1 (R_{tg3} + R_d) (1 + R_A/R_B); \quad (5.35)$$

если пост секционирования находится примерно в середине межподстанционной зоны, то в (5.35) можно принять $R_A/R_B=1$;

- для расчетной схемы № 4:

$$R_{k,max} = R_{QA1} = r_{\phi A} \ell_{\phi A} + (r_k + r_p) \ell_1 + R_{tg3} + R_d, \quad (5.36)$$

где n_1 – число путей, по контактной сети которых протекает ток короткого замыкания на участке $\ell_1=\ell_{AP}$ (от подстанции до поста секционирования).

Выдержка времени для основной защиты не используется, для резервной защиты ее принимают по 2.2.

5.7.1.5 Выбранная по условию (5.32) уставка проверяется на отстроенность от режимов нормальной работы по выражению (2.10) при коэффициентах k_3 от 1,1 до 1,3 и $k_b=1$. Если адаптация к предшествующему режиму в защите ЗС не предусмотрена, принимают $k_a=1$. Значения $I_{h,max}$ и $U_{h,min}$ для тяговой подстанции принимают в соответствии с разделом 3.

5.7.1.6 Особую уставку дистанционной защиты на выключателе тяговой подстанции при выведении из работы поста секционирования или отключении тяговой подстанции определяют по формуле (5.32).

Если на дороге в процессе эксплуатации предполагается использование схемы № 18 (таблица 4.2), то для неё $R_{k,max}$ вычисляют по формулам:

$$\begin{aligned} R_{k,max} &= R_{QA1} = 0,5(r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_k \ell_{AB} + r_{\phi B} \ell_{\phi B}) + r_p \ell_{AB} + (1 + R_A/R_B)(R_{tg3} + R_d), \\ R_A &= R_{nA} + 0,5(r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_k \ell_{AB} + r_{\phi B} \ell_{\phi B}) + r_p \ell_{AB}, \quad R_B = R_{nB}. \end{aligned}$$

Особую уставку при отключении промежуточной тяговой подстанции определяют по условию (5.32) для расчетной схемы № 19. Значение сопротивления $R_{k,max}=R_O$, измеряемое защитой, вычисляют по формуле:

$$\begin{aligned} R_{k,max} &= R_{QA1} = r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_k (\ell_1 + \ell_2) + R_{tg3} + R_d + \\ &+ \left(\frac{R_{nB} + R_{tcB}}{R_{nA} + R_{tcA} + R_{nB} + R_{tcB}} \right) r_p (\ell_1 + \ell_2). \end{aligned} \quad (5.37)$$

Значения R_{tcA} , R_{tcB} принимают по таблице 4.2 для схемы № 19.

5.7.1.7 Выбранные уставки проверяют на выполнение условия (2.10) при коэффициентах k_3 от 1,1 до 1,3 и $k_b=1$. Если адаптация к предшествующему режиму в дистанционной защите не предусмотрена, принимают коэффициент $k_a=1$. Значения $I_{h,max}$ вычисляют по 3.6.1. Значение $U_{h,min}$ принимают в соответствии с 3.6.4.

5.7.2 Дистанционная защита на выключателях поста секционирования

5.7.2.1 Если дистанционная защита на выключателях поста секционирования используется как основная, то ее уставку определяют по условию (5.32) для расчетных схем №№ 8, 15 при $k_q = 1,25$. Если основной является максимальная импульсная токовая защита, которая перекрывает расстояние от поста секционирования до смежной подстанции, то для дистанционной защиты при тех же расчетных схемах принимают $k_q = 1,15$. Значение $R_{k,max} = R_O$ вычисляют по формулам:

- для расчетной схемы № 7:

$$R_{k,max} = R_{O\text{PB}1} = r_{\phi B}\ell_{\phi B} + (r_k + n_2 r_p)\ell_2 + n_2(1 + R_A/R_B)(R_{\text{tg}3} + R_d); \quad (5.38)$$

- для расчетной схемы № 8:

$$R_{k,max} = R_{O\text{PB}1} = r_{\phi B}\ell_{\phi B} + (r_k + r_p)\ell_2 + R_{\text{tg}3} + R_d; \quad (5.39)$$

- для расчетной схемы № 15:

$$R_{k,max} = R_Q = R_{Q\text{PB}1} = r_{\phi B}\ell_{\phi B} + \left(r_k + r_p \frac{R_B}{R_A + R_B} \right) (\ell_3 + \ell_4) + R_{\text{tg}3} + R_d, \quad (5.40)$$

$$R_A = R_{\pi A} + R_{tcA}, \quad R_B = R_{\pi B} + R_{tcB},$$

где n_2 – число путей, по контактной сети которых на участке $\ell_2 = \ell_{\text{ПВ}}$ протекает ток короткого замыкания.

Значения R_{tcA} и R_{tcB} вычисляют по формулам, приведенным в таблице 4.1, соответственно, для схем № 8 и № 15.

5.7.2.2 Выдержка времени для основной защиты не используется, для резервной ее принимают по 2.2.

5.7.2.3 При отключении тяговой подстанции C для выключателя $Q\text{P1C}1$ поста секционирования ПС1 используют расчетную схему №20 (таблица 4.1), для которой:

$$R_{k,max} = R_O = R_{O\text{P1C}1} = r_k (\ell_3 + \ell_4 + \ell_5) + R_{\text{tg}3} + R_d + \\ + r_p \frac{R_{\pi B} + R_{tcB}}{R_{\pi A} + R_{tcA} + R_{\pi B} + R_{tcB}} (\ell_3 + \ell_4 + \ell_5).$$

Значения R_{tcA} и R_{tcB} вычисляют по формулам, приведенным в таблице 4.1, для схемы № 20.

Для выключателя $Q\text{P2P}1$ поста секционирования ПС2 расчетной является схема № 21 (таблица 4.1), для которой:

$$R_{k,max} = R_O = R_{O\text{P2B}1} = r_{\phi B}\ell_{\phi B} + r_k (\ell_6 + \ell_7) + R_{\text{tg}3} + R_d + \\ + r_p \frac{R_{\pi B} + R_{tcB}}{R_{\pi A} + R_{tcA} + R_{\pi B} + R_{tcB}} (\ell_6 + \ell_7).$$

5.7.2.4 Выбранную уставку следует проверять на отстроенность от нормальных нагрузок по условию (2.10) при коэффициентах κ_3 от 1,1 до 1,3 и $\kappa_B=1$. Если адаптация к предшествующему режиму в дистанционной защите не предусмотрена, принимают $\kappa_a=1$. Значения $I_{h,max}$ вычисляют по формуле (3.10), в которой I_{cp} вычисляют по формуле (3.6) при $n'=n'_{\vartheta, gm}=1$, $k=2$. Напряжение $U_{h,min}$ принимают равным 2400 В.

Пример 5.6 Выбрать на тяговой подстанции и на посту секционирования уставку дистанционной защиты для двухпутного участка со схемой питания, приведенной на рисунке 4.1, в при следующих исходных данных: $R_{\pi A}=R_{\pi B}=0,138$ Ом, $r_{\phi A}=r_{\phi B}=0,042$ Ом/км, $r_k=0,047$ Ом/км, $r_p=0,0075$ Ом/км. Трос группового заземления – как в примере 5.5, его сопротивление $R_{tg3}=0,131$ Ом.

По таблицам 4.1 и 5.2 находим, что при определении уставки дистанционной защиты используются расчетные схемы № 4 и № 8 (при отключенном в зоне защиты пункте параллельного соединения). В этом случае схема питания, соответствующая рисунку 4.1, в, преобразуется в схему, показанную на рисунке 4.1, б.

Длина питающих линий: $\ell_{\phi A}=2$ км, $\ell_{\phi B}=0,5$ км. Расстояния (см. рисунок 4.1, в): $\ell_1=3$ км, $\ell_2=4$ км, $\ell_3=4,1$ км, $\ell_4=3,9$ км, $\ell_{AB}=15$ км. Протяженность контактной сети от тяговой подстанции A до поста секционирования ПС $\ell_{AP}=\ell_1+\ell_2=3+4=7$ км, протяженность контактной сети от поста секционирования ПС до тяговой подстанции B $\ell_{PB}=\ell_3+\ell_4=4,1+3,9=8$ км.

Сопротивление дуги в соответствии с 5.7.1.3 принимаем $R_d=0,02$ Ом.

В нормальном режиме максимальная нагрузка присоединения подстанции $I_{h,max}=3400$ А, присоединения поста секционирования $I_{h,max}=2900$ А.

Если дистанционная защита рассматривается как основная, то принимают $\kappa_a=1,25$, если – как резервная, то принимают $\kappa_q=1,15$. В остальном расчеты для основной и резервной защит совпадают.

a) Защита на присоединении тяговой подстанции

Уставка на тяговой подстанции должна отвечать условию (2.10)

$$R_{y,3D} \leq \frac{\kappa_a U_{h,min}}{\kappa_3 \kappa_B I_{h,max}} = \frac{1 \cdot 3000}{1,2 \cdot 1 \cdot 3400} = 0,735 \text{ Ом.}$$

Выбираем уставку по условию обеспечения чувствительности к коротким замыканиям. Для защиты на присоединении тяговой подстанции расчетной является схема № 4 (см. таблицу 5.2).

Определяем сопротивление $R_{k,max}$ для схемы № 4 по формуле (5.36)

$$R_{k,max} = R_{Q41} = r_{\phi A} \ell_{\phi A} + (r_k + r_p) \ell_{AP} + R_{tg3} + R_d = \\ = 0,042 \cdot 2 + (0,047 + 0,0075) \cdot 7 + 0,131 + 0,02 = 0,617 \text{ Ом.}$$

Находим по условию (5.32)

$$R_{y,D3} \geq \kappa_q R_{k,max} = 1,25 \cdot 0,617 = 0,771 \text{ Ом.}$$

Принимаем $R_{y,D3}=0,780$ Ом.

Принятая уставка 0,780 Ом превышает наибольшее допустимое по условию (2.10) значение 0,735 Ом, поэтому условие отстроенности (2.10) не выполняется.

Для обеспечения защиты от коротких замыканий необходимо снизить сопротивление троса группового заземления, например, уменьшив вдвое его длину. В этом случае имеем $R_{tg3}=0,131/2=0,066$ Ом и для схемы №4 получаем

$$R_{k,max} = R_{Q41} = r_{\phi A} \ell_{\phi A} + (r_k + r_p) \ell_{AP} + R_{tg3} + R_d = \\ = 0,042 \cdot 2 + (0,047 + 0,0075) \cdot 7 + 0,066 + 0,02 = 0,551 \text{ Ом.}$$

Уставку находим по условию (5.32)

$$R_{y,D3} \geq \kappa_q R_{k,max} = 1,25 \cdot 0,551 = 0,689 \text{ Ом.}$$

Принимаем $R_{y,D3} = 0,70$ Ом. Это значение меньше максимального сопротивления при нагрузке 0,750 Ом, поэтому условие отстройки (2.10) выполняется. При уставке 0,70 Ом защита отключает выключатель $QA1$ (рисунок 4.1, в) каскадно. Сначала отключается выключатель $QPA1$ на посту секционирования, потом выключатель $QP11$ пункта параллельного соединения и лишь после этого – выключатель $QA1$ тяговой подстанции A .

Если дистанционная защита на тяговой подстанции выполняет роль не основной, а резервной, то ее уставка в соответствии с (5.32) должна отвечать условию $R_{y,D3} \geq \kappa_q R_{k,max} = 1,15 \cdot 0,617 = 0,710$ Ом. Принимаем $R_{y,D3} = 0,720$ Ом. Это значение меньше сопротивления 0,735 Ом, при котором защита отстроена от максимальной нагрузки, что обеспечивает выполнение условия (2.10). Следовательно, как резервная она обладает достаточной чувствительностью к коротким замыканиям в любой точке защищаемой зоны и не нуждается в изменении параметров троса группового заземления, указанных в условии.

б) Защита на присоединении поста секционирования

В соответствии с 2.10 защита будет отстроена от режима максимальных нагрузок при

$$R_{y,D3} \leq \frac{\kappa_a U_{h,min}}{\kappa_3 \kappa_b I_{h,max}} = \frac{1 \cdot 2700}{1,2 \cdot 1 \cdot 2900} = 0,776 \text{ Ом.}$$

В соответствии с таблицей 5.2 основной является схема № 8, при которой выключатель $QPB1$ отключается каскадно. По формуле (5.39) находим

$$\begin{aligned} R_{k,max} &= R_{QPB1} = r_{\phi B} \ell_{\phi B} + (r_k + r_p) \ell_{PB} + R_{tg3} + R_d = \\ &= 0,042 \cdot 0,5 + (0,47 + 0,0075) 8 + 0,131 + 0,02 = 0,608 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Уставку находим по формуле (5.32)

$$R_{y,D3} \geq \kappa_q R_{k,max} = 1,25 \cdot 0,608 = 0,760 \text{ Ом.}$$

Принимаем $R_{y,D3} = 0,760$ Ом. Поскольку уставка 0,760 Ом меньше значения 0,776 Ом, то условие отстройки выполняется.

Если защита используется как резервная, то

$$R_{y,D3} \geq \kappa_q R_{k,max} = 1,15 \cdot 0,608 = 0,699 \text{ Ом.}$$

Принимаем $R_{y,D3} = 0,70$ Ом. Условие отстройки выполняется.

5.8 Защита по скорости нарастания тока

5.8.1 Уставку $(dI/dt)_y$ защиты по на скорости нарастания тока выбирают по условию:

$$\kappa_3 \left(\frac{dI}{dt} \right)_{h,max} \leq \left(\frac{dI}{dt} \right)_y \leq \frac{1}{\kappa_q} \left(\frac{dI}{dt} \right)_{k,min}, \quad (5.41)$$

где $(dI/dt)_{h,max}$ – наибольшее значение скорости нарастания тока при нормальном режиме, А/мс; $(dI/dt)_{k,min}$ – наименьшее значение этой скорости при коротком замыкании, А/мс.

Коэффициент запаса принимают в соответствии с 2.3.5, коэффициент чувствительности κ_q должен быть не менее 1,15.

Скорость нарастания тока при коротком замыкании превышает, как правило, 90 А/мс, а в нормальном режиме обычно ее значение меньше чем 80 А/мс. Однако в нормальном режиме бывают случаи, когда значение этой скорости существенно возрастает. Такое явление имеет место при проследовании изолирующих сопряжений (от 1000 до 1500 А/мс), при пуске электропоездов (от 80 до 300 А/мс), после отрыва токоприемников от контактного провода и последующего его касания при больших скоростях движения. Скорости нарастания

тока в нормальном режиме и при коротком замыкании уточняются на основании опытных данных на конкретном участке.

5.8.2 Приближенную оценку наибольшей скорости изменения тока для нормального режима определяют по выражению, А/мс:

$$\left(\frac{dI}{dt} \right)_{h,\max} = \frac{\Delta I_{h,\max}}{T_k}, \quad (5.42)$$

где $\Delta I_{h,\max}$ – наибольшее приращение тока при трогании поезда или проследовании изолирующего сопряжения, А;

T_k – постоянная времени нарастания тока, мс.

Наибольшее значение $\Delta I_{h,\max}$ в момент перехода силовой цепи электроподвижного состава с одного соединения электродвигателей на другое или в режим ослабления электромагнитного поля определяют по токовой характеристике электровозов и электропоездов. Для некоторых типов электроподвижного состава значения $\Delta I_{h,\max}$ приведены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Приращения токов электроподвижного состава при трогании

Серия ЭПС	Число секций или моторных вагонов	$\Delta I_{h,\max}$, А
ВЛ10	2	от 1300 до 1400
ВЛ11	2	от 1300 до 1400
	3	2000
ВЛ15	2	2200
ВЛ15С	3	3300
2ЭС4	2	1100
	2	1200
	3	1800
2ЭС6	4	2400
	2	1650
ЭР1, ЭР2	n_m	$160 n_m$

Примечания:

- 1 n_m – число моторных вагонов электропоезда.
- 2 При кратной тяге значение $\Delta I_{h,\max}$ принимают равным сумме приращений токов всех электровозов в составе поезда.

Значения постоянной времени T_k для режимов трогания (пуска) находятся в пределах от 5 до 30 мс.

При проследовании изолирующего сопряжения значение $\Delta I_{h,\max}$ принимают равным току длительного режима электроподвижного состава с учетом кратности тяги.

5.8.3 Приближенную оценку наибольшей скорости изменения тока при коротком замыкании определяют по выражению, А/мс:

$$\left(\frac{dI}{dt} \right)_{k,min} = \frac{U_{pac}}{L_{cy} + L_{po} + L_{tc} \ell_k}, \quad (5.43)$$

где U_{pac} – расчетное напряжение тяговой подстанции, определяемое по 4.3.2, В;

L_{cy} – индуктивность реакторов сглаживающего устройства, мГн;

$L_{\text{по}}$ – суммарная индуктивность питающей и отсасывающей линий, мГн;

L_{tc} – индуктивность 1 км тяговой сети, мГн/км;

ℓ_k – расстояние до места короткого замыкания, км.

Значение индуктивности реакторов принимают по фактическому исполнению. При отсутствии таких сведений используют справочные данные по принципиальной схеме сглаживающих устройств. Индуктивность $L_{\text{по}}$ можно ориентировочно принять равной 3 мГн. Приближенные значения индуктивности 1 км тяговой сети (на один путь) L_{tc} для типичных проводов контактной сети, состоящей из несущего троса и двух контактных проводов – 1,30 мГн/км, при наличии дополнительно одного усиливающего провода – 1,05 мГн/км, а двух или трех усиливающих проводов – 0,98 мГн/км.

Расстояние ℓ_k принимают от 2 до 3 км.

5.8.4 Уставка, выбранная по выражениям (5.41), (5.42) и (5.43), должна корректироваться по результатам эксплуатации. При большом числе ложных отключений защиту не используют.

Пример 5.7 Определить возможность использования защиты ЗСНТ по скорости нарастания тока для двухпутного участка с контактной сетью М120+2МФ100+2А185. Расчетное напряжение на шинах тяговой подстанции в соответствии с 4.3.2 $U_{\text{pac}} = 3250$ В. Индуктивность реактора сглаживающего устройства $L_{\text{cy}} = 5$ мГн. Электровоз ВЛ10.

По таблице 5.3 находим приращение тока электровоза $\Delta I_{\text{h,max}} = 1300$ А. По формуле (5.42) находим при значении $T_k = 6$ мс

$$\left(\frac{dI}{dt} \right)_{\text{h,max}} = \frac{\Delta I_{\text{h,max}}}{T_k} = \frac{1300}{6} = 217 \text{ А/мс.}$$

Индуктивность тяговой сети, состоящей из несущего троса, двух контактных и двух усиливающих проводов, а также рельсов, равна $L_{\text{tc}} = 1,015$ мГн/км.

По формуле (5.43) находим

$$\left(\frac{dI}{dt} \right)_{\text{k,min}} = \frac{U_{\text{pac}}}{L_{\text{cy}} + L_{\text{по}} + L_{\text{tc}} \ell_k} = \frac{3250}{5 + 3 + 1,015 \cdot 2,5} = 308 \text{ А/мс.}$$

На основании правой части выражения (5.41) получаем

$$\left(\frac{dI}{dt} \right)_y \leq \frac{1}{\kappa_q} \left(\frac{dI}{dt} \right)_{\text{k,min}} = \frac{308}{1,15} = 268 \text{ А/мс.}$$

Принимаем уставку $(dI/dt)_y = 265$ А/мс и проверяем выполнение левой части выражения (5.41)

$$\kappa_3 \left(\frac{dI}{dt} \right)_{\text{h,max}} = 1,2 \cdot 217 = 260 \text{ А/мс.}$$

Поскольку $260 < 265$, то условие (5.41) выполняется.

5.9 Защита по приращению тока

5.9.1 Для защиты по приращению тока необходимо определить уставку по приращению тока ΔI_{y0} (dI_{yct}), значение коэффициента адаптации κ_a (K_a), длительность T_i времени измерения приращения тока, выдержку времени T_b .

5.9.2 Уставку защиты ΔI_{y0} (dI_{yct}) выбирают по условию:

$$\Delta I_{y0} < \frac{I_{k,min}}{\kappa_q}, \quad (5.44)$$

где ΔI_{y0} – уставка по приращению тока при условии, что, предшествующая нагрузка отсутствовала, А;

$I_{k,min}$ – наименьшее значение тока присоединения при коротком замыкании в конце защищаемой зоны (расчетные схемы №№ 1, 3, 4 и 12 по таблице 4.1), А;

κ_q – коэффициент чувствительности, принимаемый равным 1,15.

5.9.3 При наличии предшествующей нагрузки ток срабатывания защиты снижается до величины:

$$\Delta I_y = \Delta I_{y0} - \kappa_a I_0, \quad (5.45)$$

где ΔI_y – адаптированная уставка, А;

ΔI_{y0} – уставка защиты по приращению тока при условии, что до момента приращения тока в присоединении ток отсутствовал ($I_0=0$), А;

I_0 – ток нагрузки, предшествующий моменту его приращения, А;

κ_a (K_a) – коэффициент адаптации ($0 \leq \kappa_a \leq 1$).

В качестве I_0 принимают значение $I_{h,max}$, вычисляемое в соответствии с разделом 3. При $\kappa_a = 0$ адаптация отсутствует.

Коэффициент κ_a вычисляют из условия, чтобы адаптированная уставка ΔI_y снижалась при коротком замыкании не более, чем до значения $\Delta I_y = a \Delta I_{y0}$ ($a \leq 1$):

$$\kappa_a \leq \frac{(1-a)\Delta I_{y0}}{I_{h,max}}. \quad (5.46)$$

В выражении (5.46) принимают значение a от 0,7 до 0,8.

5.9.4 Выбранная по условию (5.44) уставка ΔI_{y0} проверяется по условию отстройки от наибольших приращений тока в нормальном режиме:

$$\Delta I_{y0} \geq \kappa_3 \Delta I_{h,max} + \kappa_a (I_{h,max} - I_{tp}) = \kappa_3 \Delta I_{h,max} + \kappa_a I_{cp}, \quad (5.47)$$

где $\Delta I_{h,max}$ – наибольшее приращение тока в нормальном режиме;

I_{cp} – средний ток присоединения.

Значения наибольшего тока присоединения $I_{h,max}$, среднего тока присоединения I_{cp} и пускового тока I_{tp} вычисляют в соответствии с разделом 3.

Значения $\Delta I_{h,max}$ для пусковых режимов электроподвижного состава принимают по таблице 5.3 или по типовым токовым характеристикам электроподвижного состава соответствующей серии. При кратной тяге в качестве $\Delta I_{h,max}$ принимают сумму приращений токов всех электровозов в составе поезда. Если защиту на присоединениях тяговых подстанций необходимо отстраивать от приращения тока при проследовании поездом секционного изолятора или изолирующего сопряжения, то принимают $\Delta I_{h,max} = I_{dl}$, где I_{dl} – ток электровоза при одиночной тяге или сумма токов всех электровозов в составе данного поезда при кратной тяге, соответствующих мощности длительного режима (см. таблицу 3.3). Допускается принимать I_{dl} равным среднему току всех электровозов (при кратной тяге) грузового поезда максимальной массы, вычисляемому по формуле (3.7).

Проверка выбранной уставки по условию надежного срабатывания при коротком замыкании в конце зоны защиты и наличии предшествующей нагрузки выбирается по выражению:

$$\Delta I_{y0} \leq \frac{I_{k,min}}{K_q} - K_a I_0. \quad (5.48)$$

5.9.5 Время T_i выбирают равным от 0,1 до 0,6 с. Нижний предел соответствует контактной сети с несущим тросом и одним контактным проводом (без усиливающих проводов), верхний предел – контактной сети с двумя контактными и двумя усиливающими проводами.

5.9.6 Для исключения излишних срабатываний защиты по приращению тока при коротких замыканиях за пределами зоны защиты, вводят выдержку времени T_B в соответствии с 2.2.

Пример 5.8 Определить параметры срабатывания защиты по приращению тока на присоединении тяговой подстанции двухпутного участка. Сопротивление тяговой подстанции $R_{pA} = 0,138$ Ом, расчетное напряжение $U_{pac} = 3120$ В (см. пример 4.1). Питающие линии $4 \times A185$ длиной $\ell_{\phi A} = 2$ км с погонным сопротивлением $r_{\phi A} = 0,047$ Ом/км (см. пример 4.2). Рельсы Р65, контактная сеть М120+2МФ100+A185. Расстояние от тяговой подстанции до поста секционирования $\ell_1 = 8$ км. Сопротивление троса АС-95/16 группового заземления $R_{tgz} = -0,197$ Ом (см. пример 5.2). Электровозы ВЛ10. Наибольший ток присоединения выключателя контактной сети на тяговой подстанции $I_{h,max} = 3800$ А.

По таблице 4.9 и формуле (4.14) находим сопротивление рельсов двухпутного участка $r_p = r_{p1}/m = 0,014/2 = 0,007$ Ом/км.

По таблице 4.4 находим сопротивление контактной сети при температуре 40 °C: $r_k = 0,047$ Ом/км.

Падение напряжения в дуге при перекрытии гирлянды из двух изоляторов находим по формуле (4.13)

$$U_d = 1350 L_y n_{iz} b = 1350 \cdot 0,26 \cdot 2 \cdot 0,6 = 420 \text{ В.}$$

По формуле, приведенной в таблице 4.1, для расчетной схемы № 3 находим

$$R_{tcA} = (r_{\phi A} \ell_{\phi A} + r_k \ell_1)/n_1 + r_p \ell_1 = (0,042 \cdot 2 + 0,047 \cdot 7)/2 + 0,007 \cdot 7 = 0,256 \text{ Ом.}$$

Наименьшее значение тока присоединения при коротком замыкании для схемы №3 находим по формуле (5.10)

$$I_{k,\min} = I_{QPA1} = \frac{U_{pac} - U_d}{n_1(R_{pA} + R_{tcA} + 2R_{tg3})} = \frac{3120 - 420}{2(0,138 + 0,256 + 2 \cdot 0,197)} = 1713 \text{ A.}$$

Находим уставку по формуле (5.44)

$$\Delta I_{y0} < \frac{I_{k,\min}}{\kappa_q} = \frac{1713}{1,15} = 1490 \text{ A.}$$

Принимаем $\Delta I_{y0} = 1400 \text{ A.}$

По формуле (5.46) находим

$$\kappa_a \leq \frac{(1-a)\Delta I_{y0}}{I_{h,max}} = \frac{(1-0,75)1400}{3000} = 0,117.$$

Принимаем $\kappa_a = 0,1.$

Проверяем выбранную уставку (см. таблицу 3.3) на отстройку от пусковых режимов по условию (5.47) для электровоза ВЛ10, для которого $I_{tp} = 2900 \text{ A}$ (см. таблицу 3.2), $\Delta I_{h,max} = 1300 \text{ A}$ (см. таблицу 5.3)

$$\kappa_3 \Delta I_{h,max} + \kappa_a (I_{h,max} - I_{tp}) = 1,15 \cdot 1300 + 0,1(3800 - 2900) = 1585 \text{ A.}$$

Условие (5.47) не соблюдается, поскольку $1400 < 1585.$

Следовательно, защита не отстроена от пусковых режимов. При проследовании поездом секционного изолятора или изолирующего сопряжения под током $\Delta I_{h,max} = I_{dl}.$ Используя данные таблицы 3.3, находим значение длительного тока электровоза ВЛ10

$$I_{dl} = \frac{P_{dl} \cdot 10^3}{U_3 \eta} = \frac{4600 \cdot 10^3}{3000 \cdot 0,9} = 1700 \text{ A.}$$

Приняв $\Delta I_{h,max} = 1700 \text{ A}$ и подставив это значение в формулу (5.47) получим ее значение 2045 А. Поскольку это значение больше уставки, то защита не отстроена от этого режима и возможны ее ложные срабатывания.

Рассмотрим возможность выбора уставки защиты по приращению тока при каскадном действии после отключения выключателя QPA1 на посту секционирования. В этом случае в качестве расчетной при коротком замыкании можно принять (с запасом) схему № 4 (см. таблицу 4.1). Ток присоединения для этой схемы определяем по формуле (5.11)

$$I_{k,min} = I_{QPA1} = \frac{U_{pac} - U_d}{R_{pA} + r_{\phi A} \ell_{\phi A} + (r_k + r_p) \ell_1 + R_{tg3}} = \\ = \frac{3120 - 420}{0,138 + 0,042 \cdot 2 + (0,047 + 0,007)7 + 0,197} = 3388 \text{ A.}$$

По формуле (5.44) находим

$$\Delta I_{y0} < \frac{I_{k,min}}{\kappa_q} = \frac{3388}{1,15} = 2946 \text{ A.}$$

Принимаем $\Delta I_{y0} = 2500 \text{ A.}$

По формуле (5.46) определяем

$$\kappa_a \leq \frac{(1-a)\Delta I_{y0}}{I_{h,max}} = \frac{(1-0,75)2500}{3800} = 0,164.$$

Принимаем $\kappa_a = 0,15.$

Используя формулу (5.47) находим

$$\kappa_3 \Delta I_{h,max} + \kappa_a (I_{h,max} - I_{tp}) = 1,15 \cdot 1700 + 0,15(3800 - 2900) = 2090 \text{ A.}$$

Полученное значение 2090 А меньше уставки $I_{y0} = 2500 \text{ A},$ следовательно, при такой уставке защита отстроена от пусковых режимов и режима проследования поездом секционного изолятора или изолирующего сопряжения под током.

Проверяем условие (5.48)

$$\Delta I_{y0} \leq \frac{I_{k,min}}{\kappa_a} - \kappa_a I_0 = \frac{3388}{1,15} - 0,15 \cdot 3800 = 2376 \text{ A.}$$

Поскольку было принято $\Delta I_{y0}=2500$ А, то условие (5.48) не выполняется.

Принимаем уставку $\Delta I_{y0}=2200$ А. По формуле (5.46) находим: $\kappa_a \leq 0,145$. Принимаем $\kappa_a=0,12$. Проверяем условие (5.47) при $\Delta I_{h,max}=I_{dl}=1700$ А: $\Delta I_{y0} \geq 2063$ А. Поскольку принято $\Delta I_{y0}=2200$ А, то условие выполняется ($2200 > 2063$).

Проверяем условие (5.48) при $\kappa_a=0,12$, $I_0=I_{h,max}=3800$ А, $I_{k,min}=3388$ А: $\Delta I_{y0} \leq 2490$ А. Поскольку принято $\Delta I_{y0}=2200$ А, то условие (5.48) выполняется ($2200 < 2490$).

Принимаем $T_i=0,4$ с, $T_b=0,15$ с.

5.10 Квазитепловая защита

5.10.1 Квазитепловая защита выполняет одну из функций защиты от перегрузки. В общем случае эта защита путем решения уравнения теплового баланса вычисляет температуру наиболее нагреваемого провода контактной сети и срабатывает, когда эта температура и длительность ее воздействия становятся опасными для термической стойкости (механической прочности) провода.

Изменяющимися факторами, от которых зависит температура провода, являются ток присоединения, температура окружающей среды и скорость ветра. Квазитепловая защита не контролирует текущие значения скорости ветра и температуры окружающей среды, поэтому вычисления температуры наиболее нагреваемого провода осуществляются для самых тяжелых по перегреву условий, соответствующих наименьшей скорости ветра и наибольшей температуре окружающей среды. Термическая отсечка, реализуемая квазитепловой защитой, может использоваться как защита от отжига или как защита от недопустимого удлинения проводов, ограниченного максимально возможным перемещением фиксаторов и грузов температурных компенсаторов.

Рассчитываемая защитой температура определяется как сумма температуры нагрева провода, вычисляемая с периодичностью 1 с на основании решения уравнения теплового баланса, и температуры окружающей среды t_{okp} (T_c).

5.10.2 Для ввода в защиту исходных данных, определяющих параметры срабатывания, необходимо:

- установить для какого из проводов контактной сети необходимо осуществлять контроль за его температурой;
- выбрать уставку аварийного отключения t_y (T_y) и уставку температуры предупреждения t_{pred} (T_{pred});
- определить (вычислить) значения коэффициентов нагрева K_h и охлаждения K_o , входящих в уравнение теплового баланса;
- принять значение расчетной температуры окружающей среды t_{okp} (T_{okp}).

5.10.3 Периодичность оперативного изменения значения температуры окружающей среды $t_{okp}(T_c)$, вводимого вручную или по каналу АСУ в терминал квазитепловой защиты, устанавливается местными инструкциями, но не реже двух раз в год. Для каждого сезона значение $t_{okp}(T_c)$ принимают как среднее значение из наибольших показателей за ряд лет.

При вводе два раза в год новых значений $t_{okp}(T_c)$ принимают расчетное

значение температуры окружающей среды:

- для летнего периода +40 °C;
- для зимнего периода +5 °C.

При плавке гололеда значение $t_{окр}(T_c)$ устанавливают равным –1 °C.

5.10.4 В качестве контролируемого по температуре провода контактной сети принимают:

– для тепловой защиты, предотвращающей отжиг проводов, – тот провод (лимитирующий провод), который ограничивает наибольшее длительно допустимое значение тока присоединения. Лимитирующий провод определяют по таблице 5.4, в которой значение коэффициента распределения тока для этого провода подчеркнуто, либо по 5.10.8;

– для тепловой защиты, предотвращающей недопустимое удлинение проводов, – контактный провод, который считают лимитирующим.

5.10.5 Уставку аварийного отключения $t_y(T_{уст})$ термической отсечки следует выбирать по условию:

$$t_y \leq \kappa_{3,p} t_{\max}, \quad (5.49)$$

где t_{\max} – наибольшая допустимая температура контролируемого (лимитирующего) провода, °C;

$\kappa_{3,p}$ – коэффициент запаса, учитывающий дополнительный нагрев провода за счет солнечной радиации, принимаемый равным от 0,85 до 0,9.

Для тепловой защиты, предотвращающей отжиг проводов контактной сети, значение t_{\max} принимают для лимитирующего провода по таблице 5.5 для времени 1200 с (20 мин) и более.

Уставку температуры предупреждения $t_{\text{пред}}(T_{\text{пред}})$ выбирают по условию:

$$t_{\text{пред}} \leq \kappa_{3,\text{пред}} t_y, \quad (5.50)$$

где $\kappa_{3,\text{пред}}$ – коэффициент запаса предупреждения, принимаемый равным от 0,8 до 0,9.

При нагревании контактных проводов происходит перемещение фиксаторов и грузов. Наибольшее перемещение имеет место на головных участках вблизи тяговых подстанций. Максимальная допустимая температура t_{\max} контактного провода, при которой ближайший к температурному компенсатору фиксатор перемещается в крайнее положение, вычисляют по формуле, °C:

$$t_{\max} \leq t_{\min} + \frac{\Delta \ell_{\phi,\max}}{\alpha \ell_{a\phi}}, \quad (5.51)$$

где $\Delta \ell_{\phi,\max}$ – наибольшее допустимое перемещение фиксатора вдоль пути от крайнего положения, соответствующего минимальной расчетной температуре окружающей среды, м;

$\ell_{a\phi}$ – расстояние от ближайшего к компенсатору фиксатора до средней анкеровки, м;

t_{\min} – минимальная расчетная температура окружающей среды данного климатического района, $^{\circ}\text{C}$;

α – температурный коэффициент линейного расширения провода, $1/^{\circ}\text{C}$.

Максимальная допустимая температура t_{\max} контактного провода, при которой грузы температурного компенсатора перемещаются в крайнее нижнее положение, следует вычислять по формуле, $^{\circ}\text{C}$:

$$t_{\max} \leq t_{\min} + \frac{\Delta\ell_{\Gamma,\max}}{\alpha \cdot p \cdot \ell_{\text{ар}}}, \quad (5.52)$$

где $\Delta\ell_{\Gamma,\max}$ – наибольшая допустимая длина перемещения грузов компенсатора от крайнего верхнего положения, соответствующего температуре t_{\min} , до крайнего нижнего положения, м;

$\ell_{\text{ар}}$ – расстояние от компенсатора до средней анкеровки, м;

p – коэффициент передачи компенсатора.

Значения $\Delta\ell_{\phi,\max}$ и $\Delta\ell_{\Gamma,\max}$ принимают в соответствии с [2]. Для медных, низколегированных и бронзовых проводов принимают $\alpha = 17 \cdot 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$, для биметаллических сталемедных и сталеалюминиевых проводов $\alpha = 13 \cdot 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$. Коэффициент передачи p принимают равным для компенсаторов: двухблочного – 2, трехблочного – 4, блочно-полиспастного – 3.

В качестве расчетного для защиты принимают наименьшее из вычисленных по формулам (5.51) и (5.52) значение t_{\max} .

Принятое значение уставки t_y не должно превышать больше, чем на 5°C величин, указанных в таблице 5.5 для времени 1200 с и более.

5.10.6 Коэффициент нагревания лимитирующего провода вычисляют по формуле, $^{\circ}\text{C}/(\text{c} \cdot \text{A}^2)$:

$$K_h = \left(\frac{K_{p,i}^2 r_{0,i} 10^4}{m_i \left(1 - \frac{u}{100} \right)^2 C_i} \right) \cdot 10^{-7}, \quad (5.53)$$

где $K_{p,i}$ – коэффициент распределения тока (доля тока присоединения контактной сети) для лимитирующего провода, значение которого определяют по таблице 5.4 (подчеркнут) или вычисляемый в соответствии с 5.10.8;

$r_{0,i}$ – сопротивление 1 км неизношенного лимитирующего провода при температуре 0°C , определяемое по таблице 5.6 или другим справочным материалам, Ом/км;

u – износ контактного провода (для других проводов принимают $u = 0$), %;

m_i – масса неизношенного лимитирующего провода, определяемая по таблице 5.6, кг/м;

C_i – удельная теплоемкость лимитирующего провода при температуре близкой к температуре уставки t_y , определяемая по таблице 5.7, Вт·с/(кг· $^{\circ}\text{C}$).

Механическому износу подвергаются только контактные провода, поэтому, если лимитирующий провод не является контактным, то для него $u=0$.

5.10.7 Коэффициент охлаждения лимитирующего провода для скорости ветра 1 м/с находят по формуле, 1/с:

$$K_o = \left(\frac{\alpha'_{t,i} F_{u,i} 10^2}{m_i \left(1 - \frac{u}{100} \right)^2 C_i} \right) \cdot 10^{-2}, \quad (5.54)$$

где $\alpha'_{t,i}$ – коэффициент теплоотдачи лимитирующего провода при скорости ветра 1 м/с и температуре близкой к температуре уставки t_y , принимаемый по таблице 5.6, Вт/(м²·°C);

$F_{u,i}$ – площадь поверхности 1 м лимитирующего провода с износом, определяемая по таблице 5.6 или по формуле (5.57), м²/м.

Если лимитирующий провод не является контактным, то значение $F_{u,i}$ принимают без износа ($u=0$).

Таблица 5.4 – Коэффициенты распределения тока по проводам контактной сети

Марка проводов контактной сети	K _{p,t}	K _{p,k}	K _{p,y}
ПБСМ70+МФ85	0,237	<u>0,763</u>	–
ПБСМ70+МФ100	0,205	<u>0,795</u>	–
ПБСА50/70+МФ100	0,239	<u>0,761</u>	–
M95+МФ100	0,480	<u>0,520</u>	–
M95+МФ100 (15 % изн.)	0,519	<u>0,481</u>	–
M95+МФ100 (30 % изн.)	0,568	<u>0,432</u>	–
M95+МФ100+A185	0,303	0,329	<u>0,368</u>
M95+МФ100+2A185	0,221	0,241	<u>0,269</u>
M95+МФ100+3A185	0,175	0,189	<u>0,212</u>
M95+2МФ100	0,315	<u>0,342</u>	–
M95+2МФ100 (15 % изн.)	0,350	<u>0,325</u>	–
M95+2МФ100 (30 % изн.)	<u>0,396</u>	0,302	–
M95+2МФ100+A185	0,228	0,247	<u>0,278</u>
M95+2МФ100+2A185	0,178	0,194	<u>0,217</u>
M95+2МФ100+3A185	0,147	0,159	<u>0,178</u>
M120+МФ100	0,528	<u>0,472</u>	–
M120+МФ100 (15 % изн.)	<u>0,572</u>	0,428	–
M120+МФ100 (30 % изн.)	<u>0,621</u>	0,379	–
M120+2МФ100	<u>0,370</u>	0,315	–
M120+2МФ100 (15 % изн.)	<u>0,402</u>	0,299	–
M120+2МФ100 (30 % изн.)	<u>0,450</u>	0,275	–
M120+2МФ100+A185	0,286	0,217	<u>0,280</u>
M120+2МФ100+2A185	0,212	0,186	<u>0,208</u>
M120+2МФ100+3A185	0,176	0,154	<u>0,172</u>
M120+НЛОлФ100	<u>0,546</u>	0,454	–

Окончание таблицы 5.4

Марка проводов контактной сети	$K_{p,t}$	$K_{p,k}$	$K_{p,y}$
M120+НЛОлФ100 (15 % изн.)	<u>0,583</u>	0,417	—
M120+НЛОлФ100 (30 % изн.)	<u>0,630</u>	0,370	—
M120+2НЛОлФ100	<u>0,375</u>	0,312	—
M120+2НЛОлФ100 (15 % изн.)	<u>0,411</u>	0,294	—
M120+2НЛОлФ100 (30 % изн.)	<u>0,460</u>	0,270	—
M120+2НЛОлФ100+A185	0,274	0,228	<u>0,270</u>
M120+2НЛОлФ100+2A185	0,216	0,180	<u>0,212</u>
M120+2НЛОлФ100+3A185	0,178	0,147	<u>0,176</u>
M120+2МФ120	0,324	<u>0,338</u>	—
M120+2МФ120 (15 % изн.)	<u>0,359</u>	0,321	—
M120+2МФ120 (30 % изн.)	<u>0,404</u>	0,278	—
M120+2МФ120+A185	0,245	0,257	<u>0,241</u>
M120+2МФ120+2A185	0,198	0,207	<u>0,194</u>
M120+2МФ120+3A185	0,166	0,173	<u>0,162</u>
M120+2НЛОлФ120	<u>0,334</u>	0,333	—
M120+2НЛОлФ120 (15 % изн.)	<u>0,369</u>	0,315	—
M120+2НЛОлФ120 (30 % изн.)	<u>0,416</u>	0,292	—
M120+2НЛОлФ120+A185	0,251	0,251	<u>0,246</u>
M120+2НЛОлФ120+2A185	0,202	0,201	<u>0,197</u>
M120+2НЛОлФ120+3A185	0,168	0,169	<u>0,165</u>
M120+МФ150	0,432	<u>0,568</u>	—
M120+МФ150 (15 % изн.)	0,470	<u>0,530</u>	—
M120+МФ150 (30 % изн.)	<u>0,519</u>	0,481	—
M120+МФ150+A185	0,303	0,399	<u>0,298</u>
M120+МФ150+2A185	0,234	0,308	<u>0,229</u>
M120+МФ150+3A185	0,190	0,250	<u>0,187</u>
M120+2БрФ100	<u>0,410</u>	0,295	—
M120+2БрФ100 (15 % изн.)	<u>0,450</u>	0,275	—
M120+2БрФ100 (30 % изн.)	<u>0,498</u>	0,251	—
M120+2БрФ100+A185	0,293	0,210	<u>0,287</u>
M120+2БрФ100+2A185	0,228	0,163	<u>0,223</u>
M120+2БрФ100+3A185	0,186	0,134	<u>0,182</u>

П р и м е ч а н и я

1 Коэффициенты распределения тока: $K_{p,t}$ – для одного несущего троса, $K_{p,k}$ – для одного контактного провода, $K_{p,y}$ – для одного усиливающего провода.

2 Для контактной сети, состоящей из n_t несущих тросов, n_k – контактных проводов и n_y усиливающих проводов соблюдается условие:

$$n_t K_{p,t} + n_k K_{p,k} + n_y K_{p,y} = 1.$$

5.10.8 Определение контролируемого по температуре провода контактной сети (лимитирующего провода), ограничивающего наибольшее допустимое значение тока присоединения, для тех проводов, которые не указаны в таблице 5.4, осуществляют в три этапа.

На первом этапе устанавливают доли тока контактной сети (коэффициенты распределения), которые протекают, соответственно, по каждому из несущих тросов $K_{p,t}$, по каждому из контактных проводов $K_{p,k}$ и по каждому из усиливающих проводов $K_{p,y}$ по формулам:

$$\begin{aligned}
 K_{p,T} &= \frac{r_3}{r_T}, \quad K_{p,K} = \frac{r_3}{r_K} \left(1 - \frac{u}{100}\right), \quad K_{p,Y} = \frac{r_3}{r_Y}, \\
 r_3 &= \frac{1}{\frac{n_T}{r_T} + \frac{n_K}{r_K} \left(1 - \frac{u}{100}\right) + \frac{n_Y}{r_Y}}, \tag{5.55}
 \end{aligned}$$

где r_3 – эквивалентное сопротивление 1 км контактной сети, Ом/км;

r_T , r_K , r_Y – сопротивления 1 км, соответственно, одного несущего троса, одного неизношенного контактного провода, одного усиливающего провода, Ом/км;

n_T , n_K , n_Y – число, соответственно, несущих тросов, контактных и усиливающих проводов в контактной сети одного пути;

u – средний износ контактного провода, %.

Значения r_T , r_K , r_Y следует принимать по справочным данным или по таблице 5.6, в которой сопротивление соответствующего провода при температуре 0 °C обозначено r_0 . Приведение его к любой другой желаемой температуре осуществляют в соответствии с примечанием 2 к таблице 5.6.

Таблица 5.5 – Допустимые температуры проводов

Тип проводов	Допустимая температура проводов, °C, при длительности протекания тока, с		
	1200 и более	180	60
Медные контактные	95	120	140
Низколегированные контактные	110	130	150
Бронзовые, сталемедные биметаллические контактные	120	140	160
Медные многопроволочные	100	120	140
Сталемедные биметаллические многопроволочные	120	140	150
Алюминиевые и сталеалюминиевые многопроволочные, в том числе биметаллические	90	100	110

На втором этапе вычисляют наибольшее значение длительно допустимых токов I_T , I_K , I_Y , соответственно, одного несущего троса, одного контактного и одного усиливающего проводов по формуле:

$$I_j = \sqrt{\frac{10(t_{\text{доп},j} - t_{\text{окр}})\alpha'_{T,j} F_{i,j}(100 - u)}{r_{0,j}(1 + \beta_{r,j} t_{\text{доп},j})}}, \tag{5.56}$$

где j – индекс провода, принимаемый значение «т», «к» или «у», соответственно, для несущего троса, контактного или усиливающего проводов;

$t_{\text{доп},j}$ – длительно допустимая температура для j -го провода, °C;

$t_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды, °C;

$\alpha'_{T,j}$ – коэффициент теплоотдачи j -го провода, Вт/(м²·°C);

Таблица 5.6 – Физико-технические параметры проводов

Марка провода	F , м ² /м	r_0 , 10 ⁻³ м/м (Ом/км)	m , кг/м	$d_{\text{пр}}$, мм	$I_{\text{доп}}$, А	α'_{T_2} , Вт/(м ² ·°C)
МФ 85	0,0375	0,192	0,755	11,3	540	33,4
МФ 85 (15 % изн.)	0,0364	0,226	0,656	10,1	470	33,7
МФ 85 (30 % изн.)	0,0350	0,274	0,581	9,41	390	34,2
МФ 100	0,0405	0,163	0,890	12,3	600	32,6
МФ 100 (15 % изн.)	0,0393	0,192	0,757	11,2	540	32,9
МФ 100 (30 % изн.)	0,0378	0,233	0,623	10,5	460	33,3
МФ 120	0,0440	0,136	1,068	13,4	650	31,7
МФ 120 (15 % изн.)	0,0425	0,160	0,908	12,1	600	32,1
МФ 120 (30 % изн.)	0,0401	0,194	0,748	11,1	540	32,7
МФ 150	0,0484	0,108	1,335	15,0	750	30,2
МФ 150 (15 % изн.)	0,0468	0,127	1,135	13,5	680	31,1
МФ 150 (30 % изн.)	0,0449	0,154	0,935	12,5	620	31,5
МФО 100	0,0421	0,163	0,890	12,7	660	32,2
МФО 100 (15 % изн.)	0,0412	0,192	0,757	12,0	570	32,4
МФО 100 (30 % изн.)	0,0400	0,234	0,623	11,45	470	32,7
БрФ 100	0,0405	0,199	0,890	12,3	700	33,4
БрФ 100 (15 % изн.)	0,0393	0,234	0,757	11,2	630	33,7
БрФ 100 (30 % изн.)	0,0378	0,284	0,623	10,5	530	34,2
БрФ 120	0,0440	0,166	1,068	13,4	750	31,9
БрФ 120 (15 % изн.)	0,0425	0,195	0,908	12,1	680	32,9
БрФ 120 (30 % изн.)	0,0401	0,237	0,748	11,1	620	33,5
НЛОлФ 100	0,0405	0,171	0,890	12,3	640	33,1
НЛОлФ 100 (15 % изн.)	0,0393	0,200	0,757	11,2	580	33,4
НЛОлФ 100 (30 % изн.)	0,0378	0,244	0,623	10,5	490	33,8
НЛОлФ 120	0,0440	0,171	1,068	13,4	700	32,2
НЛОлФ 120 (15 % изн.)	0,0425	0,200	0,908	12,1	640	32,7
НЛОлФ 120 (30 % изн.)	0,0401	0,244	0,748	11,1	580	33,3
M 95	0,0552	0,180	0,850	12,6	600	29,6
M 120	0,0616	0,144	1,058	14,0	650	28,6
MCH 70	0,0484	<u>0,448</u> <u>0,487</u>	0,624	11,0	<u>400</u> <u>340</u>	31,6
MCH 95	0,0550	<u>0,348</u> <u>0,411</u>	0,806	12,5	<u>470</u> <u>400</u>	30,4
MCH 120	0,0616	<u>0,277</u> <u>0,327</u>	1,111	14,0	<u>540</u> <u>470</u>	29,3
ПБСМ1-70	0,0484	<u>0,608</u> <u>0,670</u>	0,598	11,0	350	31,6
ПБСМ1-95	0,0550	<u>0,469</u> <u>0,610</u>	0,774	12,5	410	30,4
ПБСА 50/70	0,0613	<u>0,506</u> <u>0,592</u>	0,650	14,0	350	26,8
A 120	0,0616	0,229	0,321	14,0	420	26,7
A 150	0,0693	0,181	0,406	15,8	500	25,7
A 185	0,0770	0,146	0,502	17,5	590	24,8
AC 120/19	0,0678	0,228	0,471	15,2	420	25,8
AC 150/19	0,0748	0,192	0,559	16,1	500	24,9
AC 185/24	0,0841	0,144	0,705	18,9	590	23,8

Окончание таблицы 5.6

П р и м е ч а н и я

1 Числитель — для постоянного тока, знаменатель — среднее значение для переменного тока.

2 Сопротивление r_t единицы длины провода при температуре окружающей среды $t_{окр}$ определяют по формуле $r_t = r_0(1+\beta_r t_{окр})$, где β_r принимается по таблице 5.7.

3 Для контактных проводов диаметр провода $d_{пр}$ определен как среднее значение между параметрами A и H .

4 Значение длительного допустимого тока соответствует $t_{окр} = 40^{\circ}\text{C}$ и скорости ветра 1 м/с.

$F_{и,j}$ — площадь поверхности 1 м длины j -го провода (для контактного провода — с учетом износа), $\text{м}^2/\text{м}$;

u — средний износ контактного провода (для остальных проводов $u=0$), %;

$r_{0,j}$ — сопротивление 1 км j -го провода (для контактного провода — без учета износа) при температуре 0°C , Ом/км;

$\beta_{r,j}$ — температурный коэффициент сопротивления, $1/{\text{ }^{\circ}\text{C}}$.

Таблица 5.7 – Тепловые параметры проводов

Тип проводов	β_r , $1/{\text{ }^{\circ}\text{C}}$	C , $\text{Вт}\cdot\text{с}/(\text{кг}\cdot{\text{ }^{\circ}\text{C}})$
Медные (М, МФ, ...), медные низколегированные (НлФ)	0,0040	391
Бронзовые (Бр)	0,0040	394
Сталемедные биметаллические (МСН)	0,0036	430
Сталемедные биметаллические (ПБСМ)	0,0031	481
Алюминиевые (А)	0,0036	929
Сталеалюминиевые многопроволочные (АС)	0,0034	777
Алюминиевые многопроволочные биметаллические (ПБСА)	0,0031	575

Значение F_i принимают для соответствующего провода по таблице 5.6. Для износа u , величина которого в этой таблице не указана, значение F_i для контактного провода вычисляют по формуле:

$$F_i = F - \frac{F - F_{30}}{30} u, \quad (5.57)$$

где F — площадь поверхности неизношенного контактного провода, $\text{м}^2/\text{м}$;

F_{30} — площадь поверхности этого провода с износом 30%, принимаемая по таблице 5.6, $\text{м}^2/\text{м}$.

Коэффициент теплоотдачи $\alpha'_{t,j}$ содержит конвективную составляющую при скорости ветра 1 м/с и составляющую за счет излучения при температуре близкой к длительно допустимой для данной марки провода. Значение $\alpha'_{t,j}$ для соответствующего провода принимают по таблице 5.6.

Значение температуры $t_{доп,j}$ принимают по таблице 5.5, температуру окружающей среды $t_{окр}$ принимают 40°C .

Значение $\beta_{r,j}$ принимают по 4.3.1 или по таблице 5.7.

На третьем этапе находят ток питающей линии $I_{\phi,t}$ (при условии, что по несущему тросу протекает допустимый для этого троса ток $I_j = I_t$), ток питающей линии $I_{\phi,k}$ (при условии, что по контактному проводу протекает допустимый для этого провода ток $I_j = I_k$) и ток питающей линии $I_{\phi,y}$ (при условии, что по усиливающему проводу протекает допустимый для этого провода ток $I_j = I_y$):

$$I_{\phi,t} = \frac{I_t}{K_{p,t}}, \quad I_{\phi,k} = \frac{I_k}{K_{p,k}}, \quad I_{\phi,y} = \frac{I_y}{K_{p,y}}. \quad (5.58)$$

Наименьший из этих трех токов является током питающей линии, ограниченным значением допустимого тока лимитирующего провода, температуру которого должна контролировать квазитепловая защита.

Для некоторых марок проводов значения $K_{p,t}$, $K_{p,k}$ и $K_{p,y}$ приведены в таблице 5.4. Значения этих коэффициентов для лимитирующих проводов подчеркнуты.

Пример 5.9 Определить параметры термической отсечки от отжига проводов для контактной сети постоянного тока М-120+2МФ-100+2А-185 при среднем износе контактных проводов 10 %.

Определение лимитирующего провода

Поскольку в таблице 5.6 данных, соответствующих износу $u=10\%$ не приведено, то расчет проводится по 5.10.8.

По таблицам 4.3 и 4.4 находим при $u=0\%$: $r_t = 0,156 \text{ Ом/км}$, $r_k = 0,176 \text{ Ом/км}$, $r_y = 0,157 \text{ Ом/км}$.

По формулам (5.55) находим значения коэффициентов распределения тока для каждого из проводов контактной сети:

$$\begin{aligned} r_3 &= \frac{1}{\frac{n_t}{r_t} + \frac{n_k}{r_k} \left(1 - \frac{u}{100}\right) + \frac{n_y}{r_y}} = \frac{1}{\frac{1}{0,156} + \frac{2}{0,176} \left(1 - \frac{10}{100}\right) + \frac{2}{0,157}} = 0,034 \text{ Ом}, \\ K_{p,t} &= \frac{r_3}{r_t} = \frac{0,034}{0,156} = 0,218, \quad K_{p,y} = \frac{r_3}{r_y} = \frac{0,034}{0,157} = 0,217, \\ K_{p,k} &= \frac{r_3}{r_k} \left(1 - \frac{u}{100}\right) = \frac{0,034}{0,176} \left(1 - \frac{10}{100}\right) = 0,174. \end{aligned}$$

Проверка: $n_t K_{p,t} + n_k K_{p,k} + n_y K_{p,y} = 1$ или $1 \cdot 0,218 + 2 \cdot 0,174 + 2 \cdot 0,217 = 1$. Проверка выполняется.

По таблице 5.6 находим для контактного провода МФ100 площадь поверхности $F=0,0405 \text{ м}^2/\text{м}$ при отсутствии износа и $F_{30}=0,0378 \text{ м}^2/\text{м}$ при износе 30 %.

По формулам (5.57) вычисляем площадь поверхности 1 м контактного провода с износом 10 %:

$$F_u = F - \frac{F - F_{30}}{30} u = 0,0405 - \frac{0,0405 - 0,0378}{30} 10 = 0,0396 \text{ м}^2/\text{м}.$$

Исходные данные, необходимые для вычислений по формуле (5.56), находим по таблицам 5.5, 5.6, 5.7 и сводим в таблицу 5.8, в которой удельное сопротивление контактного провода $r_0 = 0,163 \text{ Ом/км}$ указано для неизношенного провода.

Таблица 5.8 – Сводная таблица параметров проводов

Марка провода	u , %	F_u , $\text{м}^2/\text{м}$	r_0 , $\text{Ом}/\text{км}$	α'_{T} , $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	$t_{\text{доп}}$, $^\circ\text{C}$	β_r , $1/^\circ\text{C}$
M120	0	0,0616	0,144	28,6	100	0,0040
МФ100	10	0,0396	0,163	32,9	95	0,0040
A185	0	0,0770	0,146	24,8	90	0,0036

Используя данные таблицы 5.8 находим по формуле (5.56) значения допустимых токов отдельных проводов заданной контактной сети

$$\begin{aligned}
 I_j = I_{\text{T}} &= \sqrt{\frac{10(t_{\text{доп,T}} - t_{\text{окр}})\alpha'_{\text{T,T}} F_{u,\text{T}}(100 - u_{\text{T}})}{r_{0,\text{T}}(1 + \beta_{r,\text{T}} t_{\text{доп,T}})}} = \\
 &= \sqrt{\frac{10(100 - 40)28,6 \cdot 0,0616(100 - 0)}{0,144(1 + 0,0040 \cdot 100)}} = 724 \text{ A}, \\
 I_j = I_{\text{K}} &= \sqrt{\frac{10(t_{\text{доп,K}} - t_{\text{окр}})\alpha'_{\text{T,K}} F_{u,\text{K}}(100 - u_{\text{K}})}{r_{0,\text{K}}(1 + \beta_{r,\text{K}} t_{\text{доп,K}})}} = \\
 &= \sqrt{\frac{10(95 - 40)32,9 \cdot 0,0396(100 - 10)}{0,163(1 + 0,0040 \cdot 95)}} = 535 \text{ A}, \\
 I_j = I_{\text{y}} &= \sqrt{\frac{10(t_{\text{доп,y}} - t_{\text{окр}})\alpha'_{\text{T,y}} F_{u,\text{y}}(100 - u_{\text{y}})}{r_{0,\text{y}}(1 + \beta_{r,\text{y}} t_{\text{доп,y}})}} = \\
 &= \sqrt{\frac{10(90 - 40)24,8 \cdot 0,0770(100 - 0)}{0,146(1 + 0,0036 \cdot 90)}} = 702 \text{ A}.
 \end{aligned}$$

По формулам (5.58) находим ток присоединения при условии, что по одному из проводов контактной сети протекает наибольший допустимый для этого провода ток:

$$I_{\phi,\text{T}} = \frac{I_{\text{T}}}{K_{p,\text{T}}} = \frac{724}{0,218} = 3321 \text{ A},$$

$$I_{\phi,\text{K}} = \frac{I_{\text{K}}}{K_{p,\text{K}}} = \frac{535}{0,174} = 3075 \text{ A},$$

$$I_{\phi,\text{y}} = \frac{I_{\text{y}}}{K_{p,\text{y}}} = \frac{702}{0,217} = 3235 \text{ A}.$$

Наименьший ток из этих трех значений соответствует протеканию допустимого тока по контактному проводу, следовательно, лимитирующим в данном случае является именно контактный провод.

Определение уставки по температуре

Уставку аварийного отключения определяем по формуле (5.49) имея в виду, что температура t_{\max} соответствует длительно допустимой температуре лимитирующего провода, указанной в таблице 5.5.

$$t_y \leq K_{3,p} t_{\max} = 0,85 \cdot 95 = 80,75 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Принимаем t_y ($T_{\text{уст}}$) равной $80 \text{ }^\circ\text{C}$.

Уставку температуры предупреждения определяем по формуле (5.50).

$$t_{\text{пред}} \leq K_{3,\text{пред}} t_y = 0,9 \cdot 80 = 72 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Принимаем $t_{\text{пред}}$ равной $70 \text{ }^\circ\text{C}$.

Определение коэффициентов нагревания и охлаждения

По таблицам 5.6 и 5.7 находим для лимитирующего провода (в данном примере – контактного) $m = 0,890 \text{ кг}/\text{м}$, $C = 391 \text{ Вт}\cdot\text{с}/(\text{кг}\cdot{}^\circ\text{C})$. Остальные данные принимаем по таблице

5.8.

Коэффициент нагревания лимитирующего провода находим по формуле (5.53)

$$K_H = \left(\frac{K_{p,i}^2 \cdot 10^4}{m_i \left(1 - \frac{u}{100} \right)^2 C_i} \right) \cdot 10^{-7} = \\ = \left(\frac{0,174^2 \cdot 0,163 \cdot 10^4}{0,890 \left(1 - \frac{10}{100} \right)^2 391} \right) \cdot 10^{-7} = 0,175 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}/(\text{c} \cdot \text{A}^2).$$

Коэффициент охлаждения лимитирующего провода определяем по формуле (5.54)

$$K_O = \left(\frac{\alpha'_{T,i} F_{i,i} 10^2}{m_i \left(1 - \frac{u}{100} \right)^2 C_i} \right) \cdot 10^{-2} = \left(\frac{32,9 \cdot 0,0396 \cdot 10^2}{0,890 \left(1 - \frac{10}{100} \right)^2 391} \right) \cdot 10^{-2} = 0,416 \cdot 10^{-2} \text{ } 1/\text{c}.$$

5.11 Выбор уставок защит при профилактическом подогреве проводов и плавке гололеда

При профилактическом подогреве проводов контактной сети состав защит и их уставки по сравнению с вычисленными по условиям, приведенным в таблице 5.2, не меняют.

При плавке гололеда на проводах контактной сети используют токовую отсечку или максимальную импульсную токовую защиту.

Уставки этих защит выбирают по условию:

$$I_y = 1,2 I_Q, \quad (5.59)$$

где $I_Q = I_{пл}$ – ток выключателя тяговой подстанции для начального периода плавки при наинизшей расчетной температуре окружающей среды t_p (принимают, как правило, $t_p = -10 \text{ } ^\circ\text{C}$), А.

Значение тока плавки $I_{пл}$ вычисляют в соответствии с [4] для удельных сопротивлений контактной сети, указанных в таблице 4.5 при температуре 20 $\text{ } ^\circ\text{C}$, путем их пересчета на температуру t_p по формуле (4.2).

6 Особенности защиты при опорах, не соединенных с рельсами

6.1 Для исключения явления электролитической коррозии арматуры и фундаментов опор контактной сети буждающими токами допускается отсоединять навесную металлическую гарнитуру опор, нормально не находящуюся

под напряжением, от рельса и присоединять ее к дополнительному проводу (проводу группового объединения) через разрядник, полупроводниковый диод или тиристор. Дополнительный провод подвешивается на полевой стороне опор на специальных кронштейнах. Его протяженность соответствует длине перегона от станции до станции или до поста секционирования. К дополнительному проводу подключаются все опоры, за исключением опор, которые в соответствии с Правилами устройства и технической эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог [2] и Инструкцией по заземлению устройств электроснабжения на электрифицированных железных дорогах [3] должны иметь индивидуальные заземления.

По концам и в середине защищаемой зоны устанавливаются специальные блоки A , подключаемые одним выводом к рельсу, а другим выводом через разъединитель – к дополнительному проводу. Специальные блоки состоят из входного устройства (датчика тока) FB и короткозамыкателя QK .

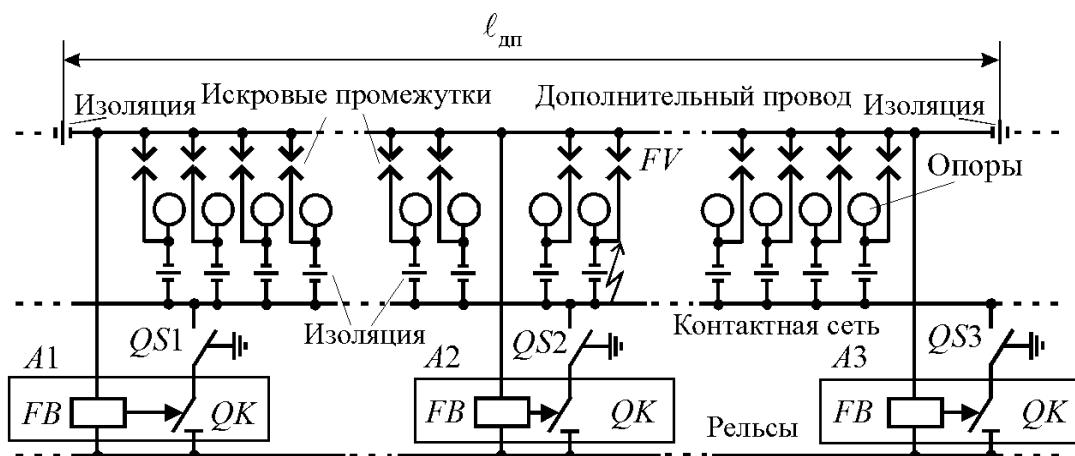


Рисунок 6.1 – Защита ЗОИР

Упрощенная схема защиты ЗОИР при опорах, отсоединенных от рельса, приведена на рисунке 6.1, на котором приняты обозначения:

- A_1, A_2, A_3 – специальные блоки;
- FB – входное устройство (датчик тока);
- QK – короткозамыкатель;
- $QS1, QS2, QS3$ – разъединители;
- FV – искровой промежуток.

При нарушении изоляции на какой-либо опоре пробивается расположенный на ней искровой промежуток, на входные устройства подается напряжение контактной сети и через них протекает ток, значение которого ограничено со-противлением входных устройств и соответствующих участков дополнительного провода. Входные устройства приводят в действие короткозамыкатели (достаточно срабатывание одного любого из них), которые устраивают глухое короткое замыкание между контактной сетью и рельсами. Это вызывает срабатывание защит на тяговой подстанции, на посту секционирования и пункте парал-

ельного соединения, питающих защищаемую зону, и отключение их выключателей.

Если искровые промежутки FV являются приборами многократного действия, а также если вместо них применяются полупроводниковые диоды или тиристоры, то после отключения тока короткого замыкания изоляция дополнительного провода от навесной гарнитуры опор восстанавливается, а короткозамыкатель возвращается в исходное положение.

6.2 Уставку защит выключателей на тяговых подстанциях и постах секционирования, а также пунктов параллельного соединения определяют в соответствии с разделом 5.

6.3 Уставка входного устройства (датчика тока) должна отвечать условию (2.1), в котором принимают:

I_y – наибольшее значение тока срабатывания входного (запального) устройства, А;

$I_{k,min}$ – наименьшее значение тока, протекающего через входное устройство при повреждении изоляции контактной сети, А.

Значение коэффициента чувствительности k_y при этом должно быть не менее 1,25.

6.4 Наименьшее значение тока $I_{k,min}$ для условий срабатывания хотя бы одного из трех блоков $A1, A2, A3$ вычисляют по формуле:

$$I_{k,min} = \frac{U_{k,min} - U_d}{R_{FB} + r_{dp} \ell_{dp} \left(1,5 + 0,25 \frac{r_{dp} \ell_{dp}}{R_{FB}} \right)}, \quad (6.1)$$

где $U_{k,min}$ – минимальное напряжение контактной сети, В;

U_d – падение напряжения в дуге в месте нарушения изоляции контактной сети, В;

R_{FB} – сопротивление входного устройства (датчика тока) каждого из блоков $A1, A2, A3$, Ом;

r_{dp} – сопротивление 1 км дополнительного провода, Ом/км;

ℓ_{dp} – длина дополнительного провода, км.

Напряжение $U_{k,min}$ принимают 2400 В, падение напряжения в дуге U_d принимают 600 В.

Пример 6.1 Определить чувствительность защиты ЗОИР для дополнительного троса марки ПС-25 (сечение провода $S=24,6 \text{ мм}^2$) длиной 10 км при трех короткозамыкателях, входные устройства которых имеют сопротивление $R_{FB} = 75 \text{ Ом}$ и ток срабатывания $I_{y,FV}$ от 4 до 6 А.

Удельное сопротивление проводниковой стали постоянному току при температуре 20°C , $\rho_{20}=(1,03 \div 1,37) \cdot 10^{-7} \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\beta_r=0,006 \text{ } 1/\text{ } ^\circ\text{C}$. Принимаем среднее значение $\rho_{20}=1,2 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Сопротивление провода ПС-25 определяем по очевидной формуле

$$r_{dp,20} = \frac{\rho_{20} 10^3}{S} = \frac{1,2 \cdot 10^{-7} \cdot 10^3}{24,6 \cdot 10^{-6}} = 4,9 \text{ Ом/км.}$$

По формуле (4.2) приводим это сопротивление к расчетной температуре $t_p = 40^\circ\text{C}$

$$r_{\text{дп}} = r_{\text{дп},20} \frac{1 + \beta_r t_p}{1 + \beta_r 20} = 4,9 \frac{1 + 0,006 \cdot 40}{1 + 0,006 \cdot 20} = 5,42 \text{ Ом/км.}$$

По формуле (6.1) находим минимальное значение тока $I_{k,\min}$, протекающего через входное устройство FV короткозамыкателя при повреждении изоляции контактной сети

$$\begin{aligned} I_{k,\min} &= \frac{U_{k,\min} - U_d}{R_{FB} + r_{\text{дп}} \ell_{\text{дп}} \left(1,5 + 0,25 \frac{r_{\text{дп}} \ell_{\text{дп}}}{R_{FB}} \right)} = \\ &= \frac{2400 - 600}{75 + 5,42 \cdot 10 \left(1,5 + 0,25 \frac{5,42 \cdot 10}{75} \right)} = 10,8 \text{ А.} \end{aligned}$$

По формуле (2.1) при определяем коэффициент чувствительности для верхнего предела уставки срабатывания входного устройства FV , управляющего короткозамыкателем

$$\kappa_q = \frac{I_{k,\min}}{I_{y,FV}} = \frac{10,8}{6} = 1,8.$$

Поскольку это значение больше нормативного, равного 1,25, то условие чувствительности удовлетворяется.

Библиография

[1] Правила устройства системы тягового электроснабжения железных дорог Российской Федерации ЦЭ-462, утвержденные МПС России 4 июня 1997 г.

[2] Правила устройства и технической эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог ЦЭ-868, утвержденные МПС России 11 декабря 2001 г.

[3] Инструкция по заземлению устройств электроснабжения на электрифицированных железных дорогах ЦЭ-191, утвержденная МПС России 10 июня 1993 г.

[4] Методические указания по борьбе с гололедом и автоколебаниями на контактной сети, линиях ДПР, автоблокировки и продольного электроснабжения, утвержденные Департаментом электрификации и электроснабжения ОАО «РЖД» 10 декабря 2004 г. № ЦЭТ-29.