

**ОРГАНИЗАЦИЯ СОТРУДНИЧЕСТВА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ
(ОСЖД)**

I издание

Разработано экспертами Комиссии ОСЖД по
инфраструктуре и подвижному составу
12-14 сентября 2017 г., Комитет ОСЖД, г. Варшава

Утверждено совещанием Комиссии ОСЖД по
инфраструктуре и подвижному составу
24-26 октября 2017 г., Комитет ОСЖД, г. Варшава

Дата вступления в силу: 26 октября 2017 г.

P 606/1

**ПОРЯДОК РАСЧЕТА И ВЫБОРА УСТАВОК
ЗАЩИТЫ ТЯГОВОЙ СЕТИ
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

СОДЕРЖАНИЕ

1 Общие положения.....	5
2 Термины и определения	5
3 Особенности определения воздействующих величин.....	8
4 Общие требования к исходным данным, защищаемым зонам и выдержкам времени.....	9
4.1 Исходные данные.....	9
4.2 Защищаемые зоны.....	10
4.3 Выдержка времени.....	11
4.4 Общий порядок действий при выборе уставок.....	13
5 Определение расчетных параметров нормального режима эксплуатации контактной сети.....	14
5.1 Общие требования.....	14
5.2 Интервалы попутного следования.....	15
5.3 Число поездов в зоне питания.....	15
5.4 Пусковые токи поездов.....	16
5.5 Средние токи присоединений.....	17
5.6 Граничные значения воздействующих и характеристических электрических величин системы тягового электроснабжения напряжением 25 кВ.....	19
5.7 Граничные значения воздействующих и характеристических электрических величин системы тягового электроснабжения напряжением 2×25 кВ.....	20
6 Схемы питания тяговой сети напряжением 25 кВ при коротком замыкании.....	21
6.1 Эквивалентная схема замещения тяговой сети в межподстанционной зоне.....	21
6.2 Параметры тяговых подстанций.....	23
6.3 Параметры места короткого замыкания.....	24
6.4 Сопротивление тяговой сети.....	25
6.5 Расчетные схемы питания.....	26
6.6 Вычисление параметров короткого замыкания.....	29
7 Схемы питания тяговой сети напряжением 2×25 кВ при коротком замыкании.....	33
7.1 Эквивалентная схема замещения тяговой сети в межподстанционной зоне.....	33
7.2 Сопротивления тяговых подстанций и автотрансформаторных пунктов.....	36
7.3 Параметры места короткого замыкания.....	37
7.4 Электрические параметры тяговой сети.....	38

7.5 Расчетные схемы питания.....	37
7.6 Вычисление параметров короткого замыкания.....	42
8 Выбор уставок защит и блокировок присоединений вводов распределительных устройств напряжением 25 кВ и 2×25 кВ.....	44
8.1 Токовая защита с блокировкой по напряжению.....	44
8.2 Направленная дистанционная защита (первая ступень).....	45
8.3 Направленная дистанционная защита (вторая ступень).....	46
8.4 Защита минимального напряжения.....	46
8.5 Защита по направлению мощности от подпитки со стороны контактной сети.....	47
9 Выбор уставок защит присоединений питающих линий контактной сети главных путей перегонов для распределительных устройств напряжением 25 кВ и 2×25 кВ тяговых подстанций.....	47
9.1 Токовая отсечка.....	47
9.2 Ненаправленная дистанционная защита.....	50
9.3 Направленная дистанционная защита (первая ступень).....	52
9.4 Направленная дистанционная защита (вторая ступень).....	54
9.5 Направленная дистанционная защита (третья ступень).....	55
9.6 Направленная дистанционная защита (четвертая ступень).....	57
9.7 Резервная токовая защита (три ступени).....	63
9.8 Защита минимального напряжения.....	64
9.9 Защита контактной сети от перегрузки (кваситепловая защита).....	66
10 Выбор уставок защит присоединений питающих линий контактной сети парков станций и депо на тяговых подстанциях.....	70
10.1 Токовая отсечка.....	70
10.2 Ненаправленная дистанционная защита присоединений на тяговой подстанции.....	71
10.3 Максимальная токовая защита присоединения на тяговой подстанции.....	71
11 Выбор уставок защит выключателей постов секционирования на присоединениях питающих линий контактных сетей главных путей перегонов.....	72
11.1 Токовая отсечка.....	72
11.2 Направленная дистанционная защита (первая ступень).....	73
11.3 Направленная дистанционная защита (вторая ступень).....	73
11.4 Дистанционная защита (третья ступень).....	74
11.5 Направленная дистанционная защита (четвертая ступень).....	75
11.6 Защита минимального напряжения.....	75

12	Выбор уставок защит выключателей постов секционирования на присоединениях питающих линий контактных сетей депо и парков станций.....	76
12.1	Максимальная токовая защита.....	76
12.2	Токовая отсечка.....	77
13	Выбор уставок защит на выключателе пункта параллельного соединения.....	77
13.1	Защита минимального напряжения.....	77
13.2	Ненаправленная дистанционная защита.....	78
13.3	Токовая отсечка.....	79
13.4	Максимальная токовая защита.....	79
14	Выбор уставок защит присоединений поперечной компенсации реактивной мощности.....	79
Приложение А (рекомендуемое)	Общие сведения о графиках селективности и угловых характеристиках дистанционных защит	83
Приложение Б (рекомендуемое)	Формулы для вычисления расчетных электрических параметров тяговой сети	91
Приложение В (справочное)	Параметры тяговой сети напряжением 25 кВ Российских железных дорог,,,,,,	98
Приложение Г (справочное)	Параметры тяговой сети напряжением 2×25 кВ Российских железных дорог....	103

1. Общие положения

1.1. Настоящий Порядок расчета и выбора уставок защиты тяговой сети переменного тока следует принимать на железных дорогах, электрифицированных по системе переменного тока частотой 50 Гц, стран – членов ОСЖД.

1.2. Порядок распространяется на все устройства, комплекты (терминалы) и полный состав защит от токов короткого замыкания в тяговой сети переменного тока вне зависимости от их конструктивного выполнения, реагирующих на следующие воздействующие величины: ток, напряжение, фазовый угол между ними, температура провода.

1.3. В зависимости от зоны действия конкретных устройств защиты, их конструктивного выполнения и размеров движения поездов реализация Порядка может осуществляться одним комплектом (терминалом) или полным составом защит. В необходимых случаях защита может снабжаться выдержкой времени.

2. Термины и определения

В настоящем Порядке приведены следующие термины с соответствующими определениями:

2.1. **внешнее короткое замыкание:** Короткое замыкание за пределами защищаемой зоны электроустановки.

2.2. **автоматика:** Совокупность механизмов, приборов, устройств и программного обеспечения, действующих автоматически в соответствии с заданным алгоритмом для достижения поставленной цели.

2.3. **защита (систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки):** Комплекс аппаратных и(или) программных средств, предназначенный для автоматического формирования сигнала на отключение выключателя или включения короткозамыкателя с целью отключения элемента электроустановки от источников питания электроэнергией при возникновении в нем короткого замыкания, а также отключения этого элемента или сигнализации при его перегрузке.

2.4. **основная защита:** Защита, предназначенная для действия при коротких замыканиях в пределах защищаемой зоны, со временем меньшим, чем у других установленных на этом элементе защит, имеющих зону действия превышающую длину защищаемой зоны.

2.5. **резервная защита:** Защита, предназначенная для резервирования действия основной защиты при коротких замыканиях в пределах защищаемой зоны основной защиты, а также для резервирования в полном или частичном объеме основной и резервной защит смежных элементов электроустановки.

2.6. **защита ближнего резерва:** Резервная защита, действующая на тот же выключатель или короткозамыкатель, что и основная защита, имеющая зону действия, превышающую длину защищаемой зоны.

2.7. защита дальнего резерва: Резервная защита, действующая на отключение выключателя данного присоединения при коротких замыканиях на смежном элементе электроустановки, т.е. за пределами защищаемой зоны основной защиты данного присоединения, при отказе выключателя, короткозамыкателя или защиты смежного элемента.

2.8. дополнительная защита: Защита, выполняющая по сравнению с основной и резервной защитами определенные дополнительные и(или) вспомогательные функции.

2.9. добавочная опция: Дополнительная функция, улучшающая какие-либо качества или свойства защиты, не входящая в номенклатуру наименьшего обязательного состава защит.

2.10. защищаемая зона: Требуемая протяженность защищаемого элемента электроустановки, в любой точке которого короткие замыкания должны быть обнаружены основной защитой.

Примечание – Для защиты дальнего резерва защищаемая зона имеет протяженность от начала данного защищаемого элемента до конца примыкающего к нему смежного элемента.

2.11. защищаемый элемент (электроустановки): Электрическое оборудование, трансформатор, распределительное устройство, сборные шины, электрическая сеть и линии электропередачи, контактная сеть, другие электротехнические устройства, входящие в состав электроустановки, или их части, попадающие в защищаемую зону данной защиты.

2.12. зона действия защиты: Наибольшая протяженность или часть защищаемого элемента электроустановки, в пределах которых данная защита способна с необходимой чувствительностью обнаружить заданный вид короткого замыкания.

2.13. зона питания: Та часть электрической сети, которая получает питание от одной и той же или от одних и тех же питающих линий.

2.14. узловая точка (контактной сети): Часть электрической сети, в которой контактные сети или их питающие линии разных путей подключены к одному общему электрическому соединению.

Примечание – Узловыми точками являются шины распределительных устройств тяговых подстанций, постов секционирования, пункты параллельного соединения.

2.15. воздействующая величина (защиты): Физическая величина, которая одна или в сочетании с другими физическими величинами должна быть приложена к защите в заданных условиях для достижения ожидаемого функционирования защиты.

2.16. характеристическая величина (защиты): Нормированное значение воздействующей или сочетания воздействующих величин, определяющих функциональный признак защиты.

Примечание – Функциональным признаком защиты является, например, ток, напряжение, сопротивление, направление мощности, температура, другие электрические и неэлектрические параметры.

2.17. срабатывание (защиты): Формирование защитой сигнала на отключение

выключателя или включение короткозамыкателя, либо формирование сигнала о перегрузке при достижении воздействующей или сочетанием воздействующих величин, определяющих функциональный признак защиты, значения уставки или от внешнего сигнала.

2.18. излишнее срабатывание: Срабатывание защиты (систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки) при коротком замыкании или перегрузке вне зоны её действия.

2.19. ложное срабатывание: Срабатывание защиты (систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки) при отсутствии короткого замыкания или перегрузки в зоне её действия.

2.20. отказ срабатывания защиты: Несрабатывание защиты (систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки) при коротком замыкании или перегрузке в зоне её действия.

2.21. уставка (параметр срабатывания): Заданное нормированное значение воздействующей или характеристической величины, при которой защита начинает выполнять заданные действия в соответствии с функциональным назначением.

2.22. время срабатывания (защиты): Время от момента достижения воздействующей или характеристической величиной защиты значения уставки до момента срабатывания этой защиты.

2.23. выдержка времени (защиты): Часть времени срабатывания защиты, вводимая преднамеренно.

2.24. блокировка: Логический запрет или ограничение действия какого-либо органа защиты и автоматики при определенных условиях.

2.25. коэффициент чувствительности (защиты): Отношение наименьшего значения воздействующей величины, возрастающей при коротких замыканиях, к уставке защиты, либо отношение уставки защиты к наибольшему значению воздействующей или характеристической величины, уменьшающейся при коротком замыкании, служащие для оценки чувствительности защиты к коротким замыканиям.

Примечания

1 При вычислении коэффициента чувствительности значение воздействующей величины определяют для режима короткого замыкания в следующих расчетных точках защищаемого элемента электроустановки:

- для основных и резервных защит – в конце защищаемой зоны;
- для дополнительной защиты в виде токовой отсечки линии электропередачи и контактной сети – в начале и в конце защищаемой зоны.

2 Защита признается чувствительной, если вычисленное значение коэффициента чувствительности оказывается не менее нормативного (заданного).

2.26. коэффициент отстройки (защиты): Нормируемое значение требуемой кратности изменения расчетного значения воздействующей или характеристической величины при выборе уставки защиты, обеспечивающее возможность снижения или исключения излишних срабатываний при внешних коротких замыканиях.

Примечания

1 Коэффициент отстройки используют при выборе уставок только дополнительных защит с зоной действия меньше длины защищаемой зоны.

2 Расчетное значение воздействующей или характеристической величины принимают при коротком замыкании в конце защищаемой зоны:

- наибольшим, а значение коэффициента отстройки – больше единицы, если воздействующая величина при коротком замыкании возрастает;
- наименьшим, а значение коэффициента отстройки – меньше единицы, если воздействующая величина уменьшается по сравнению с нормальным режимом.

2.27. коэффициент запаса (защиты): Нормируемое значение требуемой кратности изменения расчетного значения воздействующей величины при выборе уставки защиты, обеспечивающее возможность снижения или исключения ложных срабатываний при нормальном режиме.

Примечания

1 Коэффициент запаса используют при выборе уставок всех видов защит, при этом его численное значение принимают больше единицы.

2 Расчетное значение воздействующей величины принимают для нормального режима работы защищаемого элемента:

- наибольшим, если воздействующая величина при увеличении нагрузки возрастает;
- наименьшим, если воздействующая величина при увеличении нагрузки снижается.

2.28. интенсивный час: Промежуток времени, в течение которого по сравнению с любым другим таким же промежутком времени тех же суток, через сечение железнодорожного участка проходит наибольшее число поездов.

3. Особенности определения воздействующих величин

3.1. Уставки защит определяют, используя граничные значения воздействующих величин.

В нормальном режиме работы граничными являются наибольшие значения тока и температуры проводов, наименьшие значения напряжения и отношения напряжения к току.

При коротком замыкании контактной сети граничными являются: наименьшее значение тока, наибольшее значение напряжения и отношения напряжения к току, а также температура проводов.

3.2. Граничные значения воздействующих величин в нормальном режиме работы определяют для периода наибольшего сгущения поездов (максимального числа поездов в защищаемой зоне). Размеры движения и интервал попутного следования поездов разных категорий в период наибольшего их сгущения определяют в соответствии с правилами, установленными железными дорогами стран – членов ОСЖД.

Наибольшие значения пусковых токов электровозов и электропоездов (пусковые значения) определяют по типовым токовым характеристикам (зависимостям тока данной серии электровоза или электропоезда от скорости его движения) в режиме трогания поезда. Токи отдельных поездов различной массы, следующих по данному пути в защищаемой зоне с установленной скоростью, определяют на основании тяговых расчетов. Допускается использование в расчетах среднего по длине защищаемой зоны или зоны питания эффективного значения тока.

3.3 Граничные значения воздействующих величин при коротком замыкании определяют для расчетных схем питания в предположении, что электровозы и электропоезда в этот момент тока не потребляют.

3.4 Для вычисления воздействующих величин при коротком замыкании (тока,

напряжения и отношения напряжения к току) возможно применение любых методов расчета сложных электрических цепей, содержащих элементы с взаимной индуктивностью. Расчеты могут выполняться вручную или с использованием вычислительной техники по специальным программам с учетом особенностей и специфики построения тяговых сетей по методикам, принятым на железных дорогах стран – членов ОСЖД.

Следует учитывать при этом, что ряд исходных данных обладают некоторой неопределенностью, поскольку, например, не учитываются нелинейность сопротивления рельсов, изменение проводимости земли вдоль трассы железной дороги, нагрев проводов при коротком замыкании, конфигурация системы внешнего электроснабжения, изменения напряжения короткого замыкания понижающих трансформаторов при работе автоматических регуляторов напряжения до момента короткого замыкания, различия сопротивления рельсовой цепи на перегонах и на станциях, не известны заранее переходное сопротивление или длина электрической дуги в месте короткого замыкания и т.п. Поэтому результаты вычисления токов короткого замыкания контактной сети, какие бы точные и сложные методы расчета электрических цепей не использовались, в некоторой мере являются приближенными.

При выборе уставок защиты по соотношению граничных значений величин в условиях указанной неопределенности такие приближения компенсируются требуемыми значениями запаса и чувствительности. В настоящем Порядке использован инженерный метод расчета коротких замыканий предназначенный, в том числе, и для ручного счета, точность которого, несмотря на принятые допущения, достаточна для выбора уставок защиты с учетом использования требуемых значений упомянутых коэффициентов.

Метод расчета коротких замыканий предполагает, что удельные (погонные) электрические параметры 1 км тяговой сети являются известными и представлены в табличной форме. Такие таблицы должны быть в наличии или составлены с учетом конструктивных особенностей и специфики контактной сети железных дорог каждой страны – члена ОСЖД. В приложении приведены формулы и методика вычисления расчетных значений электрических параметров тяговых сетей систем электроснабжения 25 кВ и 2×25 кВ, а также (в качестве примера) их табличные значения для Российских железных дорог.

4. Общие требования к исходным данным, защищаемым зонам и выдержкам времени

4.1. Исходные данные

4.1.1. Исходными данными для расчётов применительно к каждой из межподстанционных зон являются:

а) конструктивные данные:

- 1) схема питания и секционирования контактной сети;
- 2) план контактной сети, питающих, отсасывающих, шунтирующих линий и линий обратного тока;
- 3) сопротивление энергосистемы или мощность короткого замыкания на вводах тяговых подстанций, ограничивающих межподстанционную зону при заданной схеме питания;
- 4) тип и количество силовых трансформаторов тяговых подстанций,

автотрансформаторных пунктов (АТП);

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

б) 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;

б) 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.

4.1.2. В качестве необходимых сведений для выбора защит других присоединений, кроме присоединений питающих линий контактной сети, используют такие конструктивные и эксплуатационные данные защищаемого элемента, которые обеспечивают возможность выполнения в полном объеме расчетов по 4.4.

4.2. Защищаемые зоны

4.2.1. Защищаемую зону для защиты какого-либо присоединения тяговой подстанции ограничивают:

а) со стороны тяговой подстанции – выключателем этого присоединения;

б) с противоположной стороны:

1) для одностороннего режима питания межподстанционной зоны без поста секционирования – наиболее удалённой точкой контактной сети;

2) для двухстороннего режима питания межподстанционной зоны без поста секционирования или при poste секционирования без выключателей – сборными шинами смежной тяговой подстанции;

3) для одно- и двухстороннего режима питания межподстанционной зоны с одним постом секционирования – сборными шинами поста секционирования;

4) для двухстороннего режима питания межподстанционной зоны с двумя постами секционирования – сборными шинами ближайшего к рассматриваемой тяговой подстанции поста секционирования.

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

а) со стороны поста секционирования – выключателем этого присоединения;

б) с противоположной стороны:

1) для одностороннего режима питания межподстанционной зоны – наиболее удалённой точкой контактной сети;

2) для двухстороннего режима питания межподстанционной зоны и одним постом секционирования – сборными шинами смежной тяговой подстанции;

3) для двухстороннего режима питания межподстанционной зоны 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.

4.2.3 Общие теоретические сведения о графиках селективности и угловых характеристиках защит, обеспечивающих их верное действие в пределах защищаемой зоны с учетом резервирования, приведены в приложении А.

4.3. Выдержка времени

4.3.1. При коротком замыкании на защищаемом элементе электроустановки в системе тягового электроснабжения этот элемент должен быть надежно отключен со стороны всех источников питания ближайшими к нему выключателями. Обеспечение этого требования селективности осуществляют с помощью выдержки времени в защитах защищаемых элементов, соединенных последовательно и питаемых от одного или нескольких источников. При двух- или многостороннем питании защита каждого элемента должна иметь, кроме того, органы чувствительности к значениям фазового угла, воздействующих или характеристических величин.

4.3.2. Время срабатывания защиты от коротких замыканий и отключение выключателя по возможности должно быть наименьшим.

Для обеспечения требования селективности время отключения допускается увеличить за счет искусственно вводимой в защиту выдержки времени. Выдержку времени изменяют ступенями селективности Δt , которые принимают равными:

- для электромеханических и электронных защит, воздействующих на масляные выключатели – от 0,5 до 0,6 с;
- для тех же защит, воздействующих на вакуумные выключатели – 0,4 с;
- для микропроцессорных защит, воздействующих на масляные выключатели – 0,4 с;
- для тех же защит, воздействующих на вакуумные выключатели – 0,3 с.

4.3.3. Выдержку времени τ защит каждого присоединения питающих линий контактной сети главных путей перегонов на тяговых подстанциях и постах секционирования принимают для каждой из защит кратной числу ступеней селективности (т.е. τ равно Δt , или $2\Delta t$, или $3\Delta t$ и т.д.) в соответствии с графиками селективности защит.

Примечание – Общие сведения о графиках селективности защит контактной сети приведены в А.1 приложения А.

4.3.4. Выдержку времени τ присоединений питающих линий контактной сети главных путей перегонов в распределительных устройствах тяговых подстанций принимают с учетом 4.3.2 и 4.3.3 для селективных защит:

- а) токовая отсечка – без выдержки времени;
- б) ненаправленная дистанционная защита – без выдержки времени;
- в) направленная дистанционная защита:
 - 1) первая ступень – без выдержки времени;
 - 2) вторая ступень – Δt ;
 - 3) третья ступень – $2\Delta t$;
 - 4) четвертая ступень – $3\Delta t$;
- г) защита минимального напряжения – $4\Delta t$.

При двухсторонней раздельной схеме питания контактной сети, а также при двухсторонней узловой схеме питания с постом секционирования без выключателей допускается на тяговых подстанциях принимать выдержки времени для направленной дистанционной защиты:

- первой и второй ступеней – без выдержки времени;
- третьей ступени – $\Delta\tau$;
- четвертой ступени – $2\Delta\tau$.

При одностороннем питании контактной сети допускается на тяговых подстанциях принимать выдержки времени для направленной дистанционной защиты:

- первой, второй и третьей ступеней – без выдержки времени;
- четвертой ступени – $\Delta\tau$.

4.3.5. Выдержку времени с учетом 4.3.2 присоединений питающих линий контактной сети на постах секционирования принимают для защит:

- а) токовая отсечка – без выдержки времени;
- б) направленная дистанционная защита:
 - 1) первая ступень – без выдержки времени;
 - 2) вторая ступень – $\Delta\tau$;
 - 3) третья ступень – $2\Delta\tau$ (допускается выполнять ненаправленной);
 - 4) четвертая ступень – $4\Delta\tau$;
- в) защита минимального напряжения – $3\Delta\tau$.

4.3.6. Выдержку времени защит выключателей пунктов параллельного соединения принимают для защит:

- а) защита минимального напряжения – без выдержки времени;
- б) токовая отсечка – без выдержки времени;
- в) ненаправленная дистанционная защита – без выдержки времени;
- г) максимальная токовая защита – без выдержки времени.

4.3.7. Выдержку времени с учетом 4.3.2 присоединений питающих линий депо и парков станций принимают для защит:

- а) на тяговых подстанциях:
 - 1) токовая отсечка – без выдержки времени;
 - 2) ненаправленная дистанционная защита – без выдержки времени;
 - 3) максимальная токовая защита – $\Delta\tau$;
- б) на посту секционирования:
 - 1) токовая отсечка – без выдержки времени;
 - 2) максимальная токовая защита – $\Delta\tau$.

4.3.8. Выдержку времени с учетом 4.3.2 присоединений вводов распределительных устройств принимают для защит:

- а) токовая с блокировкой по напряжению – $\Delta\tau$;
- б) направленная дистанционная защита:
 - 1) первая ступень – $\Delta\tau$;
 - 2) вторая ступень – $2\Delta\tau$;
- в) минимального напряжения – $3\Delta\tau$;
- г) по направлению мощности от подпитки со стороны контактной сети – $3\Delta\tau$.

4.4. Общий порядок действий при выборе уставок

Уставки защит выбирают в следующей последовательности:

- а) для данного выключателя заданной защищаемой зоны определяют граничные значения параметров – воздействующей или характеристической величины, на которые реагирует данная защита, в нормальном режиме эксплуатации защищаемого элемента при наибольшей нагрузке;
- б) определяют граничное значение уставки по условию недопущения ложных срабатываний защиты;
- в) устанавливают расчетную схему питания при коротком замыкании и расчетное место повреждения защищаемого элемента;
- г) вычисляют параметры схемы замещения электрической сети при коротком замыкании в расчетном месте;
- д) вычисляют расчетные значения параметров короткого замыкания, на которые реагируют защиты;
- е) определяют граничное значение уставки защиты по параметрам короткого замыкания и обеспечения условий:
 - 1) требуемого значения коэффициента чувствительности к коротким замыканиям – для основной и резервных защит (таблица 4.1);
 - 2) отстраненности от внешних коротких замыканий – для дополнительной защиты;
- ж) выбирают уставку, одновременно удовлетворяющую условиям б) и е).

Таблица 4.1 – Значения коэффициента чувствительности для тяговой сети переменного тока

Виды защит	Назначение	Место короткого замыкания	$K_{\text{ч}}$
Максимальные, токовые, одноступенчатые	Основная	Конец защищаемой зоны	1,5
Ступенчатые защиты тока и напряжения	Основная	Конец защищаемой зоны	1,5
Ступенчатые защиты тока и напряжения при наличии селективной резервной ступени	Основная	Конец защищаемой зоны	1,3
Дистанционные, вторая ступень при отсутствии третьей, третья ступень	Основная, ближнее резервирование	Конец защищаемой зоны	1,5
Дистанционные, вторая ступень при наличии третьей	Основная, ближнее резервирование	Конец защищаемой зоны	1,25
Дистанционные, вторая или третья ступень при отсутствии поста или при постах на разъединителях	Основная, ближнее резервирование	Конец защищаемой зоны	1,5
Защиты тока, напряжения, сопротивления	Резервная, дальнее резервирование	Конец смежного элемента, входящего в зону	1,2

		резервирования	
Токовая отсечка	Дополнительная	Место установки защиты	1,2

5. Определение расчетных параметров нормального режима эксплуатации контактной сети

5.1. Общие требования

5.1.1. Для каждого присоединения в зависимости от используемого состава защит должны быть вычислены одно или несколько расчетных значений воздействующих или характеристической величин, измеряемых устройствами защит в нормальном режиме, к которым относятся:

- для токовых защит – максимальный ток присоединения;
- для защиты минимального напряжения – минимальное напряжение на шинах;
- для дистанционной защиты – отношение минимального напряжения на шинах к максимальному току присоединения, образующее характеристическую величину – сопротивление.

5.1.2. При вычислении указанных в 5.1.1 величин в качестве расчетных необходимо принимать следующие схемы и режимы питания межподстанционной зоны:

- для тяговых подстанций – отдельный режим питания межподстанционной зоны с максимальным числом поездов, одновременно находящихся в зоне питания 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 при их узловом или параллельном питании – узловой режим питания межподстанционной зоны с максимальным числом поездов, одновременно находящихся в зоне питания 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 поста секционирования контактной сети главных путей при их одностороннем питании – максимальное число поездов, одновременно находящихся в зоне питания присоединения поста секционирования в интенсивный час, причем один из поездов с максимальной массой находится в режиме трогания возле этого поста;

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

5.1.3. Максимальное число поездов на одном пути, одновременно находящихся в зоне питания рассматриваемого присоединения в интенсивный час, вычисляют в соответствии с 5.3 на основании заданных по 5.2 интервалов попутного следования поездов. Для вынужденного режима работы системы тягового железнодорожного электроснабжения при отключении одной тяговой подстанции или автотрансформаторного пункта, а также для присоединений, питающих контактную сеть станций или ее отдельных парков, значение этого числа поездов принимают заданным по 5.3.

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

а) на участках железных дорог преимущественно с грузовым или пассажирским движением – грузовые поезда максимальной массы, остальные поезда – расчетной массы;

б) на скоростных и высокоскоростных электрифицированных участках железных дорог:

1) только пассажирские;

2) поезда, указанные в перечислении а);

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

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

5.2. Интервалы попутного следования

5.2.1. 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, выбирают в соответствии нормами железных дорог стран – членов ОСЖД.

5.2.2. Для скоростных и высокоскоростных электрифицированных участков интервал попутного следования поездов в зоне питания рассматриваемого присоединения определяют для следующих режимов движения:

а) все поезда – пассажирские с заданными скоростями и следуют по данному пути с интервалом, установленным для каждой дороги стран – членов ОСЖД;

б) пассажирские поезда в интенсивный час на данном пути отсутствуют, а поезда максимальной и расчетной массы следуют с интервалом, определяемым нормами железных дорог стран – членов ОСЖД.

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

5.3. Число поездов в зоне питания

5.3.1 Максимальное число поездов на электрической тяге n_3 на одном пути, которое может одновременно находиться в зоне питания рассматриваемого присоединения в интенсивный час, вычисляют для тяговой подстанции по формуле:

$$n_3 = \frac{\tau_{зп}}{\theta} = \frac{60l_{зп}}{\theta V}, \quad (5.1)$$

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

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

θ – принимаемый в соответствии с 5.2 интервал попутного следования поездов, мин;

V – средняя скорость движения, км/ч.

Если вычисленное по формуле (5.1) 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 (5.1) значение оказывается меньше единицы, то принимают n_3 равным 1.

Для тяговой подстанции, питающей межподстанционную зону системы тягового электроснабжения в качестве длины зоны питания $\square_{зп}$ принимают расстояние от данной до смежной, включенной в работу, тяговой подстанции или до конца зоны (при одностороннем режиме питания межподстанционной зоны, если он принят для нормального режима).

Для участков железных дорог преимущественно с грузовым или пассажирским движением значение n_3 вычисляют для интервала попутного следования θ в соответствии с 5.2.

Для скоростных и высокоскоростных электрифицированных участков железных дорог вычисляют два значения n_3 для интервалов попутного следования θ в соответствии с 5.2.2, перечисления а) и б).

Для участков железных дорог преимущественно с пригородным движением значение n_3 вычисляют в соответствии с 5.2.3.

5.3.2 Максимальное число поездов (электропоездов) n'_3 на одном пути, которое может одновременно находиться в зоне питания рассматриваемого присоединения в интенсивный час, вычисляют для поста секционирования контактной сети главных путей по формуле:

$$n'_3 = \frac{\tau'_{зп}}{\theta} = \frac{60\ell'_{зп}}{\theta V}, \quad (5.2)$$

где $\square'_{зп}$ – длина зоны питания присоединения поста секционирования, км;

$\tau'_{зп}$ – среднее время прохода поездом зоны питания $\square'_{зп}$, мин;

θ – интервал попутного следования поездов, принимаемый по 5.2, мин;

V – средняя скорость движения, км/ч.

Для поста секционирования контактной сети главных путей в качестве длины зоны питания $\square'_{зп}$ принимают расстояние от поста секционирования до смежной включенной в работу тяговой подстанции или до конца зоны (при одностороннем режиме питания межподстанционной зоны, если он принят для нормального режима).

Для скоростных и высокоскоростных электрифицированных участков железных дорог преимущественно с грузовым или пассажирским движением и участков преимущественно с пригородным движением вычисление n'_3 по формуле (5.2) выполняют для интервалов попутного следования в соответствии с 5.2.1.

5.3.3 Для пункта параллельного соединения принимают $n_{3,гм}$ и n_3 равными 1.

5.3.4 Для присоединений, питающих контактную сеть станций или ее отдельных парков, принимают n_3 равным 2, $n_{3,гм}$ равным 1.

5.3.5 В вынужденном режиме работы системы тягового железнодорожного электроснабжения при отключении смежной тяговой подстанции принимают n_3 равным 1.

5.4. Пусковые токи поездов

5.4.1. В качестве пускового тока электроподвижного состава с максимальной массой принимают наибольшее пиковое значение тока в режиме трогания поезда с места.

Наибольшее значение пускового тока принимают по типовым токовым характеристикам (зависимостям тока данной серии локомотива от скорости его

движения) для обращающихся на участке электровозов и электропоездов.

5.4.2 При отсутствии типовых токовых характеристик допускается наибольшее значение пускового тока для электроподвижного состава определять по любой из формул, А:

$$I_{\text{пуск}} = K_{\text{пуск}} I_{\text{ч}}, \quad (5.3)$$

$$I_{\text{пуск}} = K_{\text{пуск}} \frac{P_{\text{ч}} \cdot 10^3}{U_{\text{э}} \eta k_{\text{м}}}, \quad (5.4)$$

где $I_{\text{пуск}}$ – наибольшее значение пускового тока;
 $I_{\text{ч}}$ – ток часового режима электроподвижного состава, А;
 $P_{\text{ч}}$ – мощность часового режима электроподвижного состава, кВт;
 $U_{\text{э}}$ – номинальное напряжение электроподвижного состава (25000 В), В;
 $K_{\text{пуск}}$ – коэффициент увеличения пускового тока при трогании, принимаемый от 1,2 до 1,4;
 $k_{\text{м}}$ – коэффициент мощности (ориентировочно принимают 0,9);
 η – коэффициент полезного действия (ориентировочно принимают для грузовых поездов 0,9, для пассажирских и электропоездов 0,83).

5.4.3. При кратной тяге значение пускового тока принимают равным сумме пусковых токов всех электровозов (моторных вагонов) в составе данного поезда.

5.5. Средние токи присоединений

5.5.1. Средние токи присоединений для питающих линий тяговой подстанции $I_{\text{ср}}$ или поста секционирования $I_{\text{ср}}$ контактной сети главных путей, как составную часть максимального тока $I_{\text{н,макс}}$, учитываемого при выборе уставок защит, вычисляют для числа поездов в зоне питания $n_{\text{э}}$ ($n'_{\text{э}}$), определяемых по 5.3, за вычетом одного поезда, находящегося в режиме пуска возле подстанций или поста, т.е. для числа поездов $n_{\text{э}}-1$ и $n'_{\text{э}}-1$. Значения токов $I_{\text{ср}}$ и $I_{\text{ср}}$ при максимальном числе поездов в зоне питания $n_{\text{э}}-1$ и $n'_{\text{э}}-1$ определяют для категории поездов и их числа в соответствии с 5.1 и 5.3.

5.5.2. Для присоединений тяговых подстанций среднее значение эффективных токов, определяемое по усредненным по длине зоны токам поездов, вычисляют для участков железных дорог преимущественно с грузовым или пассажирским движением по формуле, А:

$$I_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{рас}}(n_{\text{э}} - n_{\text{э,ГМ}}) + I_{\text{ГМ}}(n_{\text{э,ГМ}} - 1)}{k}, \quad (5.5)$$

где $I_{\text{рас}}$ – средний по длине зоны питания эффективный ток поезда расчетной массы, А;

$I_{\text{ГМ}}$ – средний по длине зоны питания эффективный ток грузового поезда максимальной массы, А;

$n_{\text{э}}$ – максимальное число поездов на одном пути в зоне питания;

$n_{\text{э,ГМ}}$ – то же поездов максимальной массы;

k – коэффициент, равный единице при одностороннем режиме питания межподстанционной зоны и равный двум при двухстороннем режиме питания межподстанционной зоны.

Для присоединений постов секционирования контактной сети главных путей используют формулу, А:

$$I'_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{рас}}(n'_{\text{э}} - n'_{\text{э,ГМ}}) + I_{\text{ГМ}}(n'_{\text{э,ГМ}} - 1)}{k}, \quad (5.6)$$

где $n'_{\text{э}}$, $n'_{\text{э,ГМ}}$ – значения максимального числа поездов и числа грузовых поездов максимальной массы в зоне питания поста секционирования;

Для скоростных и высокоскоростных электрифицированных участков вычисление токов $I_{\text{ср}}$ и $I'_{\text{ср}}$ по формулам (5.5) и (5.6) в интенсивный час производят 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 принимают $I_{\text{рас}}$, равным среднему по длине зоны питания эффективному току пассажирского поезда, $I_{\text{ГМ}}$ принимают равным 0. Значения $n_{\text{э}}$ и $n'_{\text{э}}$ вычисляют по 5.3.1 и 5.3.2. В формулах (5.5) и (5.6) принимают $n_{\text{э,ГМ}}$ и $n'_{\text{э,ГМ}}$ равными 0. Для режима движения грузовых поездов максимальной массы и поездов расчетной массы вычисление токов $I_{\text{ср}}$ и $I'_{\text{ср}}$ по формулам (5.5) и (5.6) выполняют как для участков преимущественно с грузовым или пассажирским движением.

Для участков железных дорог преимущественно с пригородным движением в формулах (5.5) и (5.6) принимают $I_{\text{рас}}$, равным среднему по длине зоны питания эффективному току пригородного поезда, $I_{\text{ГМ}}$ равным 0, $n_{\text{э,ГМ}}$ и $n'_{\text{э,ГМ}}$ равными 0. Значения $n_{\text{э}}$ и $n'_{\text{э}}$ вычисляют по формулам (5.1) и (5.2) при интервале попутного следования θ в соответствии с 5.2.3.

5.5.3 Среднее по длине зоны питания эффективное значение тока $I_{\text{ср}}$ поезда вычисляют по формуле, А:

$$I_{\text{ср}} = \frac{66A_{\text{зп}}k_{\text{эф}}}{U\tau_{\text{зп}}\eta k_{\text{м}}} = \frac{1,1A_{\text{зп}}V k_{\text{эф}}}{Ul_{\text{зп}}\eta k_{\text{м}}}, \quad (5.7)$$

где $A_{\text{зп}}$ – расход электроэнергии на движение поезда, соответственно, расчетной или максимальной массы, или пассажирского по всей зоне питания рассматриваемого присоединения по 5.3.1 и 5.3.2, кВт·ч;

$k_{\text{эф}}$ – коэффициент эффективности тока поезда;

U – номинальное напряжение контактной сети, принимаемое равным 25кВ или в соответствии с нормами железных дорог стран – членов ОСЖД, кВ;

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

$l_{\text{зп}}$ – длина зоны питания рассматриваемого присоединения в соответствии с 5.3.1 и 5.3.2, км;

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

$k_{\text{м}}$ – коэффициент мощности, принимаемый в среднем равным 0,9;

η – коэффициент полезного действия (принимают для грузовых электровозов – 0,9, для пассажирских электровозов и электропоездов – 0,83).

Значение коэффициента эффективности тока поезда $k_{\text{эф}}$ зависит от профиля пути и режима ведения поезда. Для расчетов, используемых при выборе уставок защит, его усредненное значение принимают для грузовых и пассажирских поездов 1,26, для пригородных поездов 1,65.

Значения $A_{\text{зп}}$ и $\tau_{\text{зп}}$ принимают по результатам тягового расчета.

При отсутствии тягового расчета расход электроэнергии $A_{\text{зп}}$ вычисляют по формуле, кВт·ч:

$$A_{\text{зп}} = \eta w Q l_{\text{зп}} \cdot 10^{-3}, \quad (5.8)$$

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.

Усредненные значения удельного расхода электроэнергии на движение поезда w допускается принимать по таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Удельный расход электроэнергии

Тип и характер профиля	Удельный расход электроэнергии w на движение, Вт·ч/(т·км), для категории поездов			
	грузовые	пассажирские		пригородные
		кроме скоростных	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

5.6. Граничные значения воздействующих и характеристических электрических величин системы тягового электроснабжения напряжением 25 кВ

5.6.1. Для тяговой подстанции наибольшее значение максимального тока присоединений вычисляют по формуле, А:

$$I_{н,макс} = I_{пуск} + I_{ср}, \quad (5.9)$$

где $I_{пуск}$ – пусковой ток поезда, А;

$I_{ср}$ – средний ток рассматриваемого присоединения, А.

Эту же формулу используют для поста секционирования при одностороннем питании.

Для поста секционирования при узловых и параллельных схемах питания контактной сети главных путей значение $I_{н,макс}$ вычисляют по формуле, А:

$$I_{н,макс} = \left(I_{пуск} + I'_{ср} \right) \left(\frac{m-1}{m} + \frac{\ell'_{зп}}{m\ell_{зп}} \right), \quad (5.10)$$

где $I'_{ср}$ – средний ток питающей линии поста секционирования рассматриваемого присоединения, А;

m – число путей с включенной в работу контактной сетью;

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

$\ell'_{зп}$ – длина зоны питания для присоединения поста секционирования, км.

Для поста секционирования при одностороннем питании используют формулу (5.9).

Для пункта параллельного соединения используют формулу, А:

$$I_{н,маx} = \frac{m-1}{m} I_{пуск} \cdot \quad (5.11)$$

Для многопутных участков при раздельном питании путей, а также для однопутных участков в формулах (5.10) и (5.11) принимают m равным 1.

5.6.2. Значения пусковых токов $I_{пуск}$ поездов принимают по 5.4. Вычисление средних по длине эффективных значений токов присоединений тяговой подстанции $I_{ср}$ и поста секционирования $I_{ср}$ выполняют по 5.5.2, категории поездов – по 5.1.4, максимального числа поездов n_3 и n'_3 – по 5.3.

5.6.3. Значение максимального тока $I_{н,маx}$ питающей линии контактной сети станции или ее отдельных парков, принимают как сумму пускового тока $I_{пуск}$ одного поезда в соответствии с 5.4 и среднего тока $I_{ср}$ другого поезда, проходящего станцию без остановки, вычисляемого по формуле (5.7) при $k_{эф}$ равном 1. Допускается принимать $I_{н,маx}$ равным $1,5 I_{пуск}$.

5.6.4. Значение максимального тока $I_{н,маx}$ присоединения, питающего локомотивное депо, принимают как сумму токов трех электровозов (электропоездов)двигающихся по деповским путям на маневровых позициях, либо как бросок тока 1200 А при включении трансформатора электровоза.

5.6.5. Минимальное значение напряжения $U_{н,мин}$ на шинах тяговой подстанции переменного тока в нормальном режиме работы принимают 25 кВ или в соответствии с нормами, принятыми на железных дорогах стран – членов ОСЖД.

Для постов секционирования и пунктов параллельного соединения в нормальном режиме работы, для слабо загруженных участков и в вынужденных режимах питания межподстанционной зоны с отключенной тяговой подстанцией величину этого напряжения принимают 19 кВ или в соответствии с нормами, принятыми на железных дорогах стран – членов ОСЖД.

5.6.6. Значение сопротивления $Z_{н,мин}$, измеряемое защитами выключателей подстанций и постов секционирования питающих линий контактной сети в нормальном режиме работы, вычисляют по формуле, Ом:

$$Z_{н,мин} = \frac{U_{н,мин} 10^3}{I_{н,маx}} \cdot \quad (5.12)$$

5.7. Граничные значения воздействующих и характеристических электрических величин системы тягового электроснабжения напряжением 2×25 кВ

5.7.1. К параметрам нормального режима относятся максимальные токи контактной подвески $I_{кн,маx}$ и питающего провода $I_{фн,маx}$, минимальное напряжение на шинах $U_{н,мин}$, а также сопротивления $Z_{кн}$ и $Z_{фн}$, измеряемые защитой контактной подвески и питающего провода на присоединениях питающих линий тяговой подстанции и поста секционирования.

5.7.2. Значение максимального тока присоединения контактной подвески $I_{кн,маx}$ тяговой подстанции в нормальном режиме вычисляют по формуле, А:

$$I_{кн,маx} = I_{ГМ,тр} + \alpha_{к,1} \frac{I_{ГМ}(n_{3,ГМ} - 1) + I_{Гр}(n_3 - n_{3,ГМ})}{k}, \quad (5.13)$$

в которой долю тока в контактной подвеске на головном участке $\alpha_{к,1}$ вычисляют по

формуле (7.12) или в соответствии с приложением Б по формуле (Б.30).

5.7.3. Значение максимального тока присоединения питающего провода $I_{\text{фн,маx}}$ тяговой подстанции в нормальном режиме вычисляют по формуле, А:

$$I_{\text{фн,маx}} = (1 - \alpha_{\text{к},1}) \frac{I_{\text{ГМ,тр}} + I_{\text{ГМ}}(n_{\text{э,ГМ}} - 1) + I_{\text{Гр}}(n_{\text{э}} - n_{\text{э,ГМ}})}{\text{к}}. \quad (5.14)$$

5.7.4. Значение максимального тока присоединения контактной подвески $I_{\text{кн,маx}}$ поста секционирования в нормальном режиме вычисляют по формуле, А:

$$I_{\text{кн,маx}} = \alpha_{\text{к}} \left[I_{\text{ГМ,тр}} + \frac{I_{\text{ГМ}}(n'_{\text{э,ГМ}} - 1) + I_{\text{Гр}}(n'_{\text{э}} - n'_{\text{э,ГМ}})}{\text{к}} \right] \frac{\ell_{\text{АП}}}{\ell_{\text{АВ}}}, \quad (5.15)$$

где $\alpha_{\text{к}}$ – доля тока в контактной подвеске на участках между смежными автотрансформаторами, значение которого определяют по формуле (Б.31) приложения Б;

$\ell_{\text{АП}}$, $\ell_{\text{АВ}}$ – расстояния соответственно от тяговой подстанции А до поста секционирования ПС и между тяговыми подстанциями А и В.

5.7.5. Значения максимального тока присоединения питающего провода $I_{\text{фн,маx}}$ поста секционирования в нормальном режиме вычисляют по формуле:

$$I_{\text{фн,маx}} = \frac{1 - \alpha_{\text{к}}}{\alpha_{\text{к}}} I_{\text{кн,маx}}. \quad (5.16)$$

5.7.6. Минимальные значения напряжения $U_{\text{н,мин}}$ на шинах тяговых подстанций и поста секционирования принимают в соответствии с 5.6.5.

5.7.7. Минимальные значения сопротивлений, измеряемых защитами в нормальном режиме, вычисляют в соответствии с 5.6.6 отдельно для присоединений контактной подвески и питающего провода.

6. Схемы питания тяговой сети напряжением 25 кВ при коротком замыкании

6.1. Эквивалентная схема замещения тяговой сети в межподстанционной зоне

6.1.1. Вычисление параметров короткого замыкания осуществляется на основе эквивалентной схемы замещения с индуктивно развязанными сопротивлениями, в том числе контактной сети и рельсов. Наиболее точные результаты по приведенным далее формулам получают при использовании в расчетах комплексных значений сопротивлений, напряжений и токов.

Для выбора уставок защиты, в тех случаях, когда фазовые углы вычислять не требуется, допускается выполнять расчет параметров короткого замыкания (воздействующих величин) с использованием только модулей (абсолютных значений) сопротивлений, напряжений и токов. Возникающая при этом погрешность компенсируется коэффициентами запаса и чувствительности.

Для выбора уставок защиты от коротких замыканий и анализа возможных или наступивших нештатных ситуаций в виде отказа защит используются расчетные схемы при фиксированном расположении места повреждения K возле узловых точек.

В расчетных схемах указаны место короткого замыкания и отличия схемы питания межподстанционной зоны от нормальной.

6.1.3. В общем случае схема питания для межподстанционной зоны с постом секционирования ПС и пунктами параллельного соединения ППС1 и ППС2 при коротком замыкании на участке \square_3 приведена на рисунке 6.1, перечисление а).

Эквивалентные (индуктивно развязанные) схемы замещения, соответственно промежуточная и результирующая, приведены на рисунках 6.1, перечисления б), в), в которых:

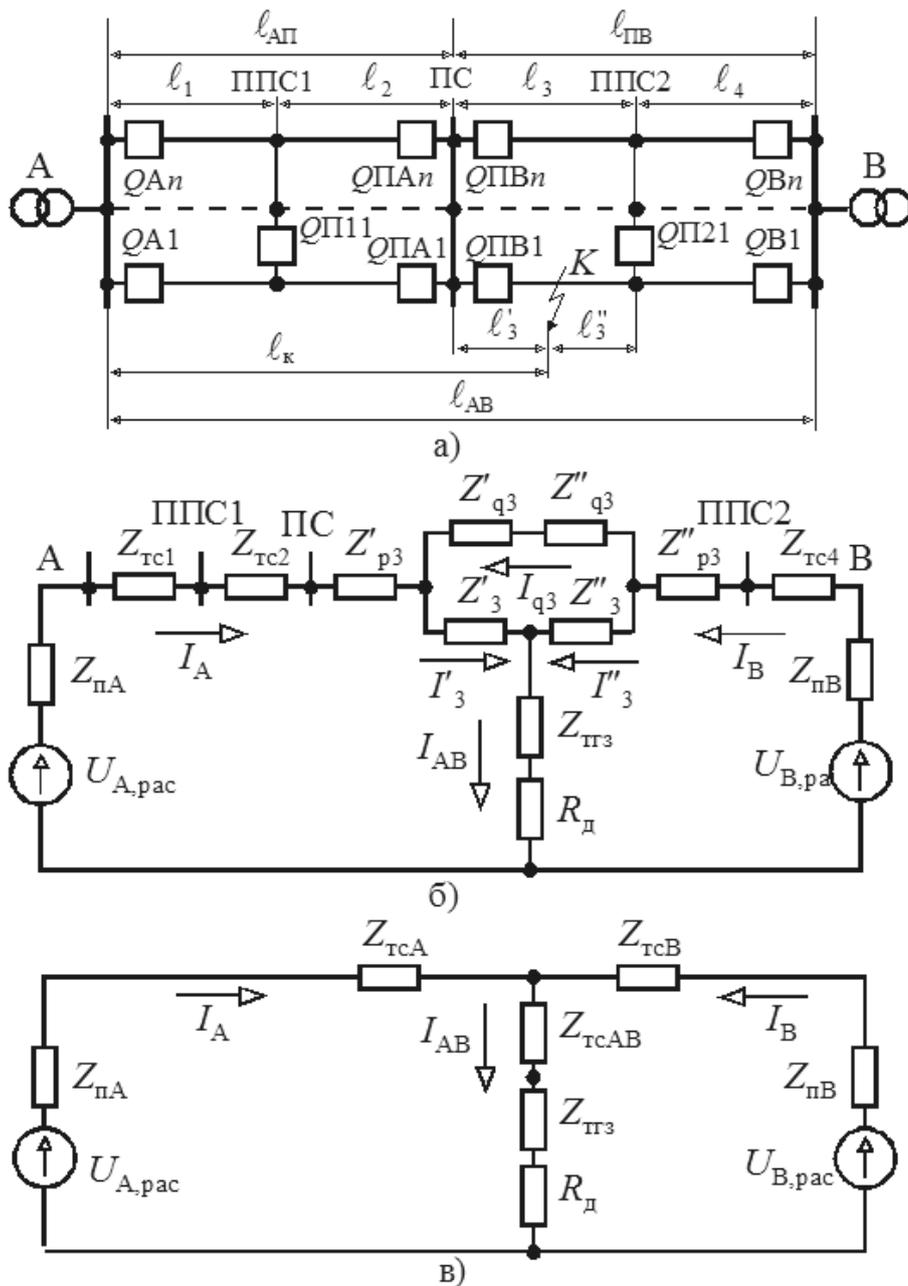


Рисунок 6.1 – Схемы питания а) и замещения б), в) тяговой сети

$U_{A,рас}$, $U_{B,рас}$ – расчетные напряжения тяговых подстанций соответственно А и В;

$Z_{тс1}$, $Z_{тс2}$, $Z_{тс4}$ – индуктивно развязанные сопротивления тяговой сети (контактной сети всех путей и рельсов) на неповрежденных участках длиной

соответственно $\square_1, \square_2, \square_4$;

Z_3, Z''_3 – индуктивно развязанные сопротивления поврежденной контактной сети одного пути на длинах соответственно \square'_3 и \square''_3 участка \square_3 с коротким замыканием в точке K на этом пути;

Z_{q3}, Z''_{q3} – результирующие индуктивно развязанные сопротивления неповрежденной контактной сети всех остальных путей на длинах \square'_3 и \square''_3 участка \square_3 ;

Z_{p3}, Z''_{p3} – результирующие индуктивно развязанные сопротивления рельсового пути с учетом взаимной индуктивной связи между контактной сетью поврежденного пути и контактными сетями всех остальных путей на длинах \square'_3 и \square''_3 участка \square_3 ;

$Z_{пА}, Z_{пВ}$ – сопротивления тяговых подстанций соответственно А и В;

$Z_{пВ}$ – сопротивление троса группового заземления, Ом;

R_d – сопротивление дуги, Ом.

Жирный горизонтальный пунктир на рисунке 6.1, перечисление *a*), означает, что на схеме между верхним и нижним электрифицированными путями может либо не быть ни одного, либо быть один или несколько электрифицированных путей.

Вертикальный пунктир означает, что пункт параллельного соединения соединяет между собой контактные сети всех путей через выключатели между каждой парой смежных электрифицированных путей.

6.1.4 Для вычисления параметров короткого замыкания необходимо определить сопротивления Z_A, Z_B, Z_{AB} результирующей схемы замещения (рисунок 6.1, перечисление *b*), по формулам, Ом:

$$Z_A = Z_{пА} + Z_{тсА}, \quad (6.1)$$

$$Z_B = Z_{пВ} + Z_{тсВ}, \quad (6.2)$$

$$Z_{AB} = Z_{тсAB} + R_d, \quad (6.3)$$

в которых $Z_{пА}, Z_{пВ}$ – сопротивления тяговых подстанций А и В, Ом;

$Z_{тсА}, Z_{тсВ}, Z_{тсAB}$ – эквивалентные индуктивно развязанные сопротивления тяговой сети, Ом;

R_d – сопротивление дуги, Ом.

В необходимых случаях вместо сопротивления дуги R_d может использоваться сопротивление R_3 – переходное сопротивление провод – земля в месте падения провода на верхнее строение пути (см. 6.3).

При наличии в месте короткого замыкания троса группового заземления его сопротивление $Z_{тз}$ прибавляют в виде третьего слагаемого в правую часть формулы (6.3). Сопротивление этого троса должно соответствовать длине от его изолированного конца до точки присоединения к нему заземляющего спуска к рельсовой цепи.

6.2. Параметры тяговых подстанций

6.2.1. Номинальное значение напряжений $U_{рас}$ подстанций принимают равным 27,5 кВ.

При вычислении минимальных значений токов короткого замыкания, протекающих к месту повреждения от данной подстанции, соответствующих минимальному режиму питающей энергосистемы, расчетное напряжение на ней принимают на 5% ниже номинального. Если вычисляют максимальные значения

токов короткого замыкания, соответствующих максимальному режиму питающей энергосистемы, то на данной подстанции расчетное напряжение принимают на 5% выше номинального.

6.2.2 Сопротивление тяговой подстанции при двухфазном коротком замыкании вычисляют по формуле, Ом:

$$Z_{\Pi} = X_{\Pi} = 2U_{\text{рас}}^2 \left[\frac{1}{S_c} + \frac{u_k}{100S_T n_T} \right], \quad (6.4)$$

где X_{Π} – индуктивная составляющая сопротивления подстанции, Ом;

$U_{\text{рас}}$ – расчетное напряжение на выводах тяговой обмотки трансформатора, кВ;

S_c – мощность короткого замыкания на вводах в подстанцию, МВ·А;

S_T – номинальная мощность трансформатора, МВ А;

n_T – число включенных в работу трансформаторов;

u_k – напряжение короткого замыкания трансформатора, %.

6.2.3. Напряжения короткого замыкания для силовых трехобмоточных трансформаторов разных типов и разной мощности, используемых на тяговых подстанциях переменного тока с номинальным напряжением тяговой обмотки 27,5 кВ, принимают по паспортным данным.

Множитель 2 в формуле (6.4) учитывает, что сопротивление тяговой подстанции определяют для двухфазного короткого замыкания.

6.2.4. Если параметры энергосистемы заданы сопротивлением X_c (Ом) при базовом напряжении U_6 (кВ) или током трехфазного короткого замыкания $I^{(3)}$ (А) на вводах в тяговую подстанцию, то мощность короткого замыкания вычисляют по формулам, (МВ·А):

$$S_c = \frac{U_6^2}{X_c}, \quad (6.5)$$

$$S_c = \sqrt{3} I^{(3)} U_{\text{ВН}} \cdot 10^{-3}, \quad (6.6)$$

где $U_{\text{ВН}}$ – номинальное напряжение обмотки высшего напряжения силового трансформатора, кВ.

6.2.5. При вычислении минимальных токов короткого замыкания принимают минимальный режим энергосистемы, при вычислении максимальных токов – максимальный. Если параллельная работа двух трансформаторов в эксплуатационных условиях не предусмотрена, то в максимальном режиме принимают также n_T равным 1.

6.3. Параметры места короткого замыкания

6.3.1. Место повреждения характеризуется двумя параметрами: сопротивлением дуги R_d и переходным сопротивлением «контактная сеть-земля» R_3 , при падении провода контактной сети на землю или шпальную решетку.

В расчетах учитывают либо сопротивление дуги R_d (тогда принимают R_3 равным 0), либо переходное сопротивление R_3 (тогда принимают R_d равным 0).

6.3.2. При вычислении уставок токовых и дистанционных защит первой и второй ступени (для трех- и четырехступенчатых защит) допускается принимать R_d и R_3 равными 0. Возникающая погрешность компенсируется при этом коэффициентом

чувствительности.

Для защит минимального напряжения принимают R_d равным 1 Ом.

Уставку резервных защит с зоной действия до смежной подстанции, в том числе для третьей ступени дистанционной защиты, выбирают с учетом внесения в цепь короткого замыкания параметров места повреждения (активного сопротивления дуги или переходного сопротивления) значением от 5 до 8 Ом.

6.3.3. При анализе нештатных ситуаций, областей изменения фазовых соотношений (углов) параметров короткого замыкания и в других специальных случаях допускается вычислять параметры места повреждения с учетом следующих уточняющих данных.

Сопротивление дуги R_d вычисляют по формуле, Ом:

$$R_d = \frac{1050 L_y n_{из} b}{I_k}, \quad (6.7)$$

где L_y – длина пути утечки по поверхности одного изолятора, м;

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

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

I_k – ток короткого замыкания, протекающий в дуге, А.

Длину пути утечки принимают в соответствии с типом используемых в контактной сети изоляторов на основании справочных данных. Коэффициент b принимают равным от 0,8 до 0,9 для защит, действующих без выдержки времени. Для защит с выдержкой времени 0,5 с и более значение коэффициента b увеличивают от 1,5 до 2 раз.

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

6.4. Сопротивление тяговой сети

6.4.1. Сопротивление 1 км тяговой сети принимают по таблицам, значения сопротивлений в которых для железных дорог каждой из стран – членов ОСЖД, вычисляют по методике, приведенной в приложении Б, с учетом национальной специфики и особенностей конструкции контактной сети. Оно зависит от марки и числа проводов контактной сети, их взаимного расположения, расстояния до проводов соседних путей и до рельсов, числа путей.

При определении параметров системы электроснабжения число рельсовых путей обозначено буквой m , число путей, по контактной сети которых протекает ток короткого замыкания, обозначено n . Если уточняется, что это число относится к i -му участку, то вводится обозначение n_i . В расчетных схемах контактная сеть части путей может быть отключена, поэтому $n \leq m$.

6.4.2. Для вычисления результирующих сопротивлений схемы замещения тяговой сети используют следующие расчетные значения погонных сопротивлений:

z_{mn} – сопротивление 1 км тяговой сети m -путного участка, на котором контактная сеть n путей включена в работу при условии, что токи в контактной сети всех n путей одинаковы по величине и направлению (сопротивление тяговой сети m -путного участка, на котором контактная сеть n путей соединена параллельно), Ом/км;

z_{m1} – сопротивление 1 км тяговой сети m -путного участка, на котором включена в работу контактная сеть только одного пути, Ом/км;

$z_{-1,n}$ – сопротивление 1 км тяговой сети одного данного пути многопутного участка, на котором контактная сеть на n путях включена в работу, при условии, что ток в контактной сети этого пути равен по величине сумме токов всех остальных $n-1$ путей, но имеет по отношению к ним противоположное направление, Ом/км;

$z'_{p,m}$ – сопротивление 1 км рельсовой цепи m -путного участка с учетом взаимного индуктивного влияния контактных сетей всех путей друг на друга, Ом/км.

Для однопутного участка обозначение z_{mn} принимает вид z_{11} , все остальные сопротивления не учитывают.

Для двухпутного участка, на котором контактная сеть одного пути отключена, обозначение z_{mn} принимает вид z_{21} . Для двухпутного участка при параллельном соединении контактных сетей обоих путей обозначение z_{mn} принимает вид z_{22} .

Если на двухпутном участке токи в контактных сетях обоих путей одинаковы, но имеют противоположное направление, то обозначение $z_{-1,n}$ принимает вид $z_{-1,2}$ и т.д.

6.5. Расчетные схемы питания

Расчетные схемы приведены в таблице 6.1, в которой для каждой из них указан только тот выключатель, для которого рассчитываются параметры короткого замыкания. На каждой схеме указано условное обозначение выключателя и назначение защит (О – основная, Р – резервная, Д – дополнительная).

В этой же таблице приведены формулы для вычисления параметров схемы замещения тяговой сети $Z_{тс,А}$, $Z_{тс,В}$, $Z_{тс,АВ}$ по 6.1.3.

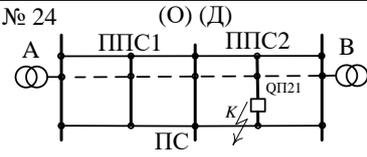
Таблица 6.1 – Параметры расчетных схем питания контактной сети в межподстанционной зоне

Расчетная схема	Ток I_{QV} выключателя	Значения составляющих формул (6.1), (6.2) и (6.3)		
		$Z_{тсА}$	$Z_{тсВ}$	$Z_{тсАВ}$
<p>№ 1</p>	I_A	$z_{m1} \square_{AB}$	∞	0
<p>№ 2</p>	$\frac{I_A}{n}$	$z_{mn} \square_{AB}$	0	0
<p>№ 3</p>	I_B	0	$z_{m1} \square_{AB}$	0
<p>№ 4</p>	I_{AB}	$z'_{p,m} \square_{АП}$	$\frac{z_{-1,n} \square_{АП} + z_{mn}}{n_1 - 1} \square_{ПВ}$	$z_{-1,n} \square_{АП}$
<p>№ 5</p>	I_A	$z_{m1} \square_{АП}$	$z_{mn} \square_{ПВ}$	0
<p>№ 6</p>	$\frac{I_A}{n_1}$	$z_{mn} \square_{АП}$	$z_{mn} \square_{ПВ}$	0
<p>№ 7</p>	I_B	0	$z_{m1} \square_{АП} + z_{mn} \square_{ПВ}$	0
<p>№ 8</p>	$\frac{I_A}{n_1}$	$z_{mn} \square_{АП} + z_{mn} \square_{ПВ}$	0	0
<p>№ 9</p>	$\frac{I_A}{n_1}$	$z_{mn} \square_{АП} + z'_{p,m} \square_{ПВ}$	$\frac{z_{-1,n} \square_{ПВ}}{n_2 - 1}$	$z_{-1,n} \square_{ПВ}$
<p>№ 10</p>	I_{AB}	$\frac{z_{-1,n} \square_{АП}}{n_1 - 1}$	$z'_{p,m} \square_{АП} + z_{mn} \square_{ПВ}$	$z_{-1,n} \square_{АП}$
<p>№ 11</p>	$\frac{I_A}{n_2}$	$z_{mn} \square_{АП} + z_{mn} \square_{ПВ}$	0	0
<p>№ 12</p>	I_{AB}	$z_{mn} \square_{АП} + z'_{p,m} \square_{ПВ}$	$\frac{z_{-1,n} \square_{ПВ}}{n_2 - 1}$	$z_{-1,n} \square_{ПВ}$

Продолжение таблицы 6.1

Расчетная схема	Ток I_{QV} выключателя	Значения составляющих формул (6.1), (6.2) и (6.3)		
		$Z_{тсА}$	$Z_{тсВ}$	$Z_{тсAB}$
№ 13 (О) (Д) 	I_{AB}	$z_{mn} \square_{АП} + z_{m1} \square_{ПВ}$	∞	0
№ 14 (Д) 	I_B	$z_{mn} \square_{АП}$	$z_{m1} \square_{ПВ}$	0
№ 15 (Д) 	I_{AB}^- $-\frac{I_B}{n_2}$	$z_{mn} \square_{АП}$	$z_{mn} \square_{ПВ}$	0
№ 16 (О) 	$\frac{I_A}{n_3}$	$z_{mn} \square_1 + z_{mn} \square_2 + z_{mn} \square_3 + z'_{p,m} \square_4$	$\frac{z_{-1,n}}{n_4 - 1} \square_4$	$z_{-1,n} \square_4$
№ 17 (О) 	I_{AB}^- $-\frac{I_A}{n_3}$	$z_{mn} \square_1 + z_{mn} \square_2 + z_{mn} \square_3 + z'_{p,m} \square_4$	$\frac{z_{-1,n}}{n_4 - 1} \square_4$	$z_{-1,n} \square_{ПВ}$
№ 18 (Р) 	I_{AB}^- $-\frac{I_B}{n_4}$	$z_{mn} \square_1 + z_{mn} \square_2 + \frac{z_{-1,n}}{n_3 - 1} \square_3$	$z_{mn} \square_4 + z'_{p,m} \square_3$	$z_{-1,n} \square_3$
№ 19 (О) 	I_{A}^- $-\frac{I_A}{n_3}$	$z_{mn} \square_1 + z_{mn} \square_2 + z_{mn} \square_3 + z_{m1} \square_4$	∞	0
№ 20 (О) 	0	$z_{mn} \square_1 + z_{mn} \square_2 + z_{mn} \square_3 + z_{mn} \square_4$	0	0
№ 21 (О) 	0	$z_{mn} \square_1 + z_{mn} \square_2$	$z_{mn} \square_3 + z_{mn} \square_4$	0
№ 22 (О) (Д) 	I_{AB}^- $-\frac{I_B}{n}$	0	$z_{mn} \square_{AB}$	0
№ 23 (О) 	I_{AB}^- $-\frac{I_B}{n_1}$	0	$z_{mn} \square_{АП} + z_{mn} \square_{ПВ}$	0

Окончание таблицы 6.1

Расчетная схема	Ток I_{QV} выключателя	Значения составляющих формул (6.1), (6.2) и (6.3)		
		$Z_{тсА}$	$Z_{тсВ}$	$Z_{тсАВ}$
№ 24 	$\frac{I_A}{n_3 - 1} + \frac{I_B}{n_4 - 1}$	$z_{mn} \square_1 + z_{mn} \square_2 + z_{mn} \square'_3$	$z_{mn} \square''_3 + z_{mn} \square_4$	$\frac{n-1}{n} z_{-1,n} \times \frac{l'_3 l''_3}{l'_3 + l''_3}$
<p>Обозначения: А, В – тяговые подстанции; ПС – пост секционирования; ППС1, ППС2 – пункты параллельного соединения; I_A, I_B – токи тяговых подстанций соответственно А и В; I_{AB} – суммарный ток в точке К короткого замыкания ($I_{AB}=I_A+I_B$).</p> <p>Расстояния $\square_{AB}, \square_1, \square_2, \square_3, \square_4, \square_{АП}, \square_{ПВ}$ принимают в соответствии с рисунком 6.1, перечисление а).</p> <p>Число электрифицированных путей n, n_1, n_2, n_3, n_4 на участках соответственно $\square_{AB}, \square_1, \square_2, \square_3, \square_4$ – по рисунку 6.1, перечисление а).</p> <p>Примечания</p> <p>1 Пунктирная линия в расчетных схемах означает, что на ее месте может быть один или несколько путей.</p> <p>2 Для раздельного питания контактных сетей путей многопутного участка в расчетных схемах №№ 1, 2, 3 и 22 расчетные формулы используют без изменений, остальные расчетные схемы не используют.</p> <p>3 Для однопутного участка схемы №№ 4, 9, 10, 12, 16, 21, 23 и 24 не используют. В остальных схемах принимают: n_1 и n_2 равными 1, $z_{-1,2}$ равным 0, а вместо z_{mn} и z_{m1} используют сопротивление z_{11}.</p>				

6.6. Вычисление параметров короткого замыкания

6.6.1. К параметрам короткого замыкания относят:

- токи в месте повреждения и присоединения питающих линий;
- токи выключателей;
- сопротивления, измеряемые защитой;
- напряжения в узловых точках (на шинах тяговых подстанций и постов секционирования, а также присоединениях пунктов параллельного соединения).

6.6.2. Токи I_A, I_B соответственно тяговых подстанций А и В и ток I_{AB} в месте короткого замыкания для выбранной схемы вычисляют по формулам, А:

$$I_A = \frac{U_{A,пас} \left(1 + \frac{Z_{AB}}{Z_B} \right) - U_{B,пас} \left(1 + \frac{Z_{AB}}{Z_B} \right)}{Z_A + Z_{AB} \left(1 + \frac{Z_A}{Z_B} \right)} 10^3, \quad (6.8)$$

$$I_B = \frac{U_{B,рас} \left(1 + \frac{Z_{AB}}{Z_A}\right) - U_{A,рас} \left(1 + \frac{Z_{AB}}{Z_A}\right)}{Z_B + Z_{AB} \left(1 + \frac{Z_B}{Z_A}\right)} 10^3, \quad (6.9)$$

$$I_{AB} = I_A + I_B, \quad (6.10)$$

в которых результирующие сопротивления Z_A , Z_B , Z_{AB} эквивалентной схемы замещения вычисляются по формулам (6.1), (6.2), (6.3) и формулам, приведенным в таблице 6.1.

Если напряжения тяговых подстанций приняты одинаковыми ($U_{A,рас}$ и $U_{B,рас}$ равны $U_{рас}$), то вместо формул (6.6) используют формулы, А:

$$I_A = \frac{U_{A,рас} 10^3}{Z_A + Z_{AB} \left(1 + \frac{Z_A}{Z_B}\right)}, \quad (6.11)$$

$$I_B = \frac{U_{B,рас} 10^3}{Z_B + Z_{AB} \left(1 + \frac{Z_B}{Z_A}\right)}. \quad (6.12)$$

Для тех расчетных схем, приведенных в таблице 6.1, у которых $Z_{тсAB}$ равно 0 и не учитываются параметры места повреждения (т.е. $Z_{AB}=0$), величины токов I_A , I_B допускается вычислять по формулам, А:

$$I_A = \frac{U_{A,рас} 10^3}{Z_{пА} + Z_{A,вх}}, \quad (6.13)$$

$$I_B = \frac{U_{B,рас} 10^3}{Z_{пВ} + Z_{B,вх}}, \quad (6.14)$$

где $Z_{A,вх}$, $Z_{B,вх}$ – входные сопротивления тяговой сети соответственно со стороны подстанций А и В, Ом.

Номера указанных расчетных схем, для которых Z_{AB} равно 0, и формулы для вычисления входных сопротивлений приведены в таблице 6.2. Сопротивление z_{mn} на разных участках могут быть различными за счет отключения контактной сети некоторых путей.

В таблицах 6.3 и 6.4 приведены сведения для вычисления напряжения U_{yt} в узловых точках и сопротивления Z_{QV} , измеряемые защитами.

6.6.3. Формулы для определения тока выключателя I_{QV} для каждой из расчетных схем приведены во втором столбце таблицы 6.1.

Токи выключателей I_k равные токам I_{QV} и указанные в таблице 6.1, определяют для каждой из расчетных схем на основе токов I_A , I_B тяговых подстанций (с учетом числа путей и схемы питания межподстанционной зоны) и тока I_{AB} , вычисляемых по формулам (6.8), (6.9) и (6.10).

Таблица 6.2 – Номера расчетных схем и формулы для вычисления входных сопротивлений

Номер схемы таблицы 6.1	Формулы для вычисления сопротивлений $Z_{A,BX}$, $Z_{B,BX}$, Ом
1	$Z_{A,BX} = z_{m1} \square_{AB}$
2	$Z_{A,BX} = z_{mn} \square_{AB}$
3	$Z_{B,BX} = z_{m1} \square_{AB}$
5	$Z_{A,BX} = z_{m1} \square_{АП}$
6	$Z_{A,BX} = z_{mn} \square_{АП}$
7	$Z_{B,BX} = z_{m1} \square_{АП} + z_{mn} \square_{ПВ}$
8, 11	$Z_{A,BX} = z_{mn} \square_{АП} + z_{mn} \square_{ПВ}$
13	$Z_{A,BX} = z_{mn} \square_{АП} + z_{m1} \square_{ПВ}$
14	$Z_{B,BX} = z_{m1} \square_{ПВ}$
15	$Z_{A,BX} = z_{mn} \square_{АП}; \quad Z_{B,BX} = z_{mn} \square_{ПВ}$
19	$Z_{A,BX} = z_{mn} \square_1 + z_{mn} \square_2 + z_{mn} \square_3 + z_{m1} \square_4$
20	$Z_{A,BX} = z_{mn} \square_1 + z_{mn} \square_2 + z_{mn} \square_3 + z_{mn} \square_4$
21	$Z_{A,BX} = z_{mn} \square_1 + z_{mn} \square_2; \quad Z_{B,BX} = z_{mn} \square_3 + z_{mn} \square_4$
22	$Z_{A,BX} = 0; \quad Z_{B,BX} = z_{mn} \square_{AB}$
23	$Z_{A,BX} = 0; \quad Z_{B,BX} = z_{mn} \square_{АП} + z_{mn} \square_{ПВ}$
<p>Примечание – Для однопутного участка схемы №№ 19, 20 и 21 не используют, а для остальных схем настоящей таблицы вместо z_{mn} и z_{m1} используют сопротивление z_{11}.</p>	

Таблица 6.3 – Данные для расчета $U_{ут}$

Номер схемы таблицы 6.1	Шифр узловой точки	Значения параметров в формуле (6.11)		
		U , кВ	I , А	Z , Ом
4,7,10,23	ПС	U_B	I_B	$z_{mn} \square_{ПВ}$
8,9,11,12,13	ПС	U_A	I_A	$z_{mn} \square_{АП}$
16,17,18,19,20,21,24	ППС1	U_A	I_A	$z_{mn} \square_1$
16,17,18,19,20,24	ПС	U_A	I_A	$z_{mn} \square_1 + z_{mn} \square_2$
16,17,18,19,20	ППС2	U_A	I_A	$z_{mn} \square_1 + z_{mn} \square_2 + z_{mn} \square_3$
18,21,24	ППС2	U_B	I_B	$z_{mn} \square_4$
<p>Примечания</p> <p>1 Для однопутных участков определение $U_{ут}$ в узловой точке с шифром ПС осуществляют при замене в столбце Z значения z_{mn} на z_{11}.</p> <p>2 Для учета параметров места короткого замыкания в соответствии с 6.3.2 в каждую из формул столбца Z прибавляется выражение, Ом:</p> $(R_d + Z_{ТГЗ}) \frac{I_{AB}}{I_{QV}},$ <p>в котором сопротивления определяют в соответствии с 6.3, а токи – в соответствии с 6.6.2 и 6.6.3.</p>				

Таблица 6.4 – Формулы для вычисления сопротивления Z_{QV} , измеряемого защитой выключателя Q

Номер схемы таблицы 6.1	Формулы для вычисления сопротивления Z_{QV} , Ом, измеряемого защитой выключателя QV
1	$Z_{QA1} = z_{m1} \square_{AB}$
2	$Z_{QA1} = n z_{mn} \square_{AB}$

4	$Z_{QA1} = (z_{-1,n} + z'_{p,m} \frac{I_A}{I_{AB}}) \square_{АП}$
5	$Z_{QA1} = z_{m1} \square_{АП}$
6	$Z_{QA1} = n_1 z_{mn} \square_{АП}$
8	$Z_{QA1} = n_1 (z_{mn} \square_{АП} + z_{mn} \square_{ПВ})$
9	$Z_{QA1} = n_1 [z_{mn} \square_{АП} + (z'_{p,m} + z_{-1,n} \frac{I_{AB}}{I_A}) \square \square_{ПВ}]$
10	$Z_{QA1} = [z_{-1,n} + (n_1 - 1) z_{-1,n} \frac{I_{AB}}{I_A}] \square \square_{АП}$
11	$Z_{QPВ1} = n_2 z_{mn} \square_{ПВ}$
12	$Z_{QPВ1} = (z_{-1,n} + z'_{p,m} \frac{I_A}{I_{AB}}) \square \square_{ПВ}$
13	$Z_{QPВ1} = z_{m1} \square_{ПВ}$
16	$Z_{QPВ1} = n_3 [z_{mn} \square_3 + (z'_{p,m} + z_{-1,n} \frac{I_{AB}}{I_A}) \square \square_4]$
<p>Примечание – При $U_{A,рас}$ и $U_{B,рас}$ равным $U_{рас}$ принимают $\frac{I_{AB}}{I_A} = 1 + \frac{Z_A}{Z_B}$, где Z_A и Z_B – вычисляются по формулам (6.1) и (6.2).</p>	

Обозначение I_k относится к расчетному значению тока рассматриваемого выключателя Q при коротком замыкании. Обозначение I_{QV} относится к току выключателя Q с шифром V (например, $QA1$, $QPA1$, $QPB1$, ...) в соответствии с рисунком 6.1, перечисление а). Знак тока выключателя принимают положительным, если ток направлен от шин в линию, и отрицательным – при противоположном направлении. Положительные направления токов I_A , I_B , $I_{q,i}$, I'_i и I''_i указаны на рисунке 6.1.

6.6.4. Напряжение на шинах подстанции А и В (рисунок 6.1) вычисляют по формулам, кВ:

$$U_A = U_{A,рас} - I_A Z_{ПА} 10^{-3}, \quad (6.15)$$

$$U_B = U_{B,рас} - I_B Z_{ПВ} 10^{-3}. \quad (6.16)$$

Напряжения U_{yt} в узловых точках ПС, ППС1, ППС2 (рисунок 6.1) вычисляют по формуле, кВ:

$$U_{yt} = U - I \cdot Z \cdot 10^{-3}. \quad (6.17)$$

Входящие в эту формулу величины принимают для расчетных схем, указанных в таблице 6.1, в соответствии с таблицей 6.3.

6.6.5. Сопротивления Z_{QV} , измеряемые защитами выключателей с шифром QV , вычисляют по формуле, Ом:

$$Z_{QV} = U_{yt} 10^3 / I_{QV}, \quad (6.18)$$

где U_{yt} – напряжение той узловой точки, к которой присоединен выключатель, кВ;

I_{QV} – ток выключателя Q с номером V ($QA1$, $QPA1$, $QPB1$, $QB1$, ...) в соответствии с рисунком 6.1, перечисление а), А.

В таблице 6.4 для некоторых схем приведены формулы для определения сопротивления Z_{QV} , не требующие предварительного вычисления U_{yt} и I_{QV} .

7. Схемы питания тяговой сети напряжением 2×25 кВ при коротком замыкании

7.1. Эквивалентная схема замещения тяговой сети в межподстанционной зоне

7.1.1 Схема питания для межподстанционной зоны с постом секционирования ПС при коротком замыкании на участке \square_3 приведена на рисунке 7.1. Если пост секционирования совмещен с автотрансформаторным пунктом АТП2, то принимают \square_3 равным 0, а если пост секционирования совмещен с АТП3, то принимают \square_3 равным 0. На рисунке 7.1 в качестве примера расчетная точка короткого замыкания K показана на шине поста секционирования ПС, соединенной с питающим проводом Φ .

Число автотрансформаторных пунктов может быть как меньше, так и больше показанных на рисунке 7.1. В любом случае в расчетах участвуют только по одному автотрансформатору, ближайших слева и справа к месту короткого замыкания.

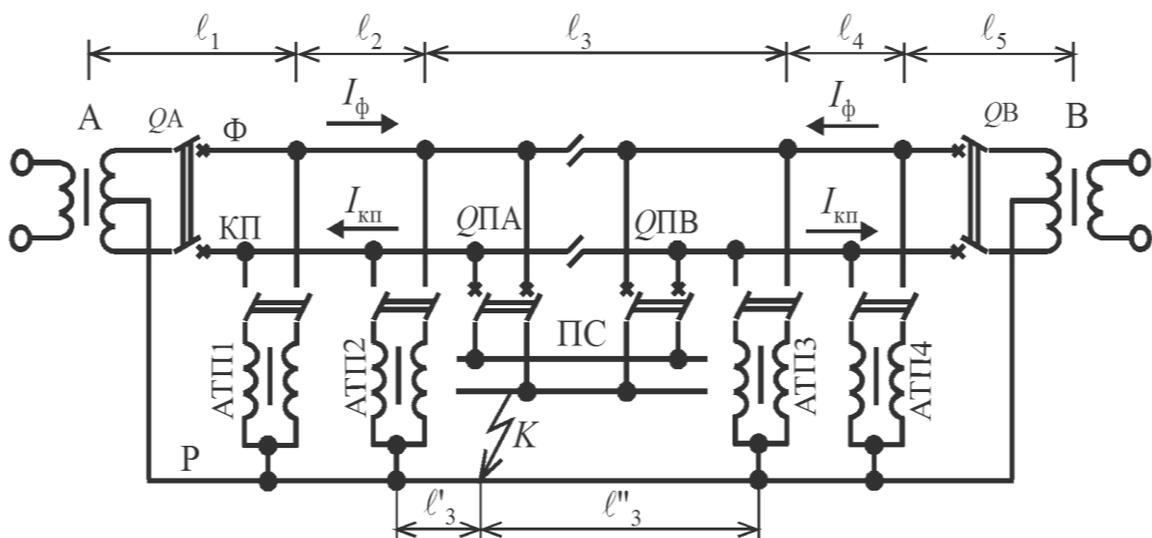
7.1.2. Расчеты по определению параметров короткого замыкания выполняют, как правило, в комплексной форме. Для выбора уставок защит, когда фазовые углы вычислять не требуется, допускается выполнять расчеты с использованием только модулей (абсолютных значений) сопротивлений, напряжений и токов.

7.1.3. В качестве расчетных принимают следующие виды коротких замыканий:

- между контактной подвеской K и рельсами P ;
- между питающим проводом Φ и рельсами P .

7.1.4. Расчетные точки короткого замыкания $K1 \dots K6$ на контактной подвеске K на питающем проводе Φ принимают в соответствии с рисунком 7.2 (рельсовая цепь не показана).

7.1.5 Вычисления параметров короткого замыкания для расчетных точек выполняют на основе схемы замещения тяговых подстанций и тяговой сети с учетом взаимных индуктивных связей между всеми проводами контактной сети, между проводами и рельсами, а также наличия автотрансформаторов. Схему питания тяговой сети напряжением 2×25 кВ (рисунок 7.1) приводят с допустимым приближением к индуктивно развязанной схеме замещения тяговой сети напряжением 25 кВ, показанной на рисунке 7.3, перечисление а).



А, В – тяговые подстанции соответственно в начале и конце межподстанционной зоны;

QA, QB – двухполюсные выключатели присоединений питающих линий контактной сети на тяговых подстанциях соответственно А и В;

QПА, QПВ – двухполюсные выключатели поста секционирования ПС;

К – контактная подвеска; Ф – питающий провод; Р – рельсы;

АТП1-АТП4 – линейные автотрансформаторные пункты

Рисунок 7.1 – Схема питания участка 2×25 кВ

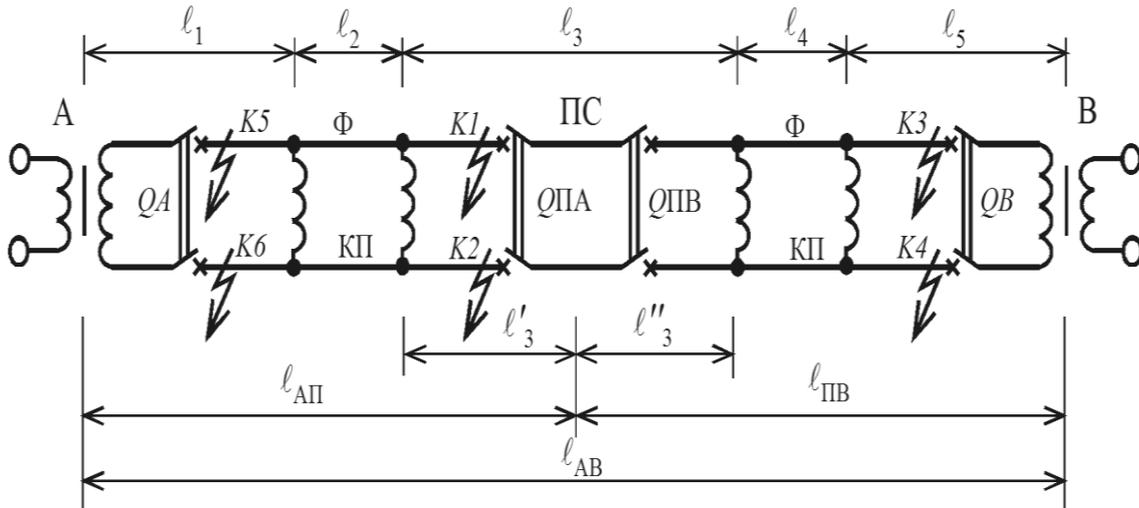


Рисунок 7.2 – Расчетные точки K1 ... K6 короткого замыкания тяговой сети 2×25 кВ

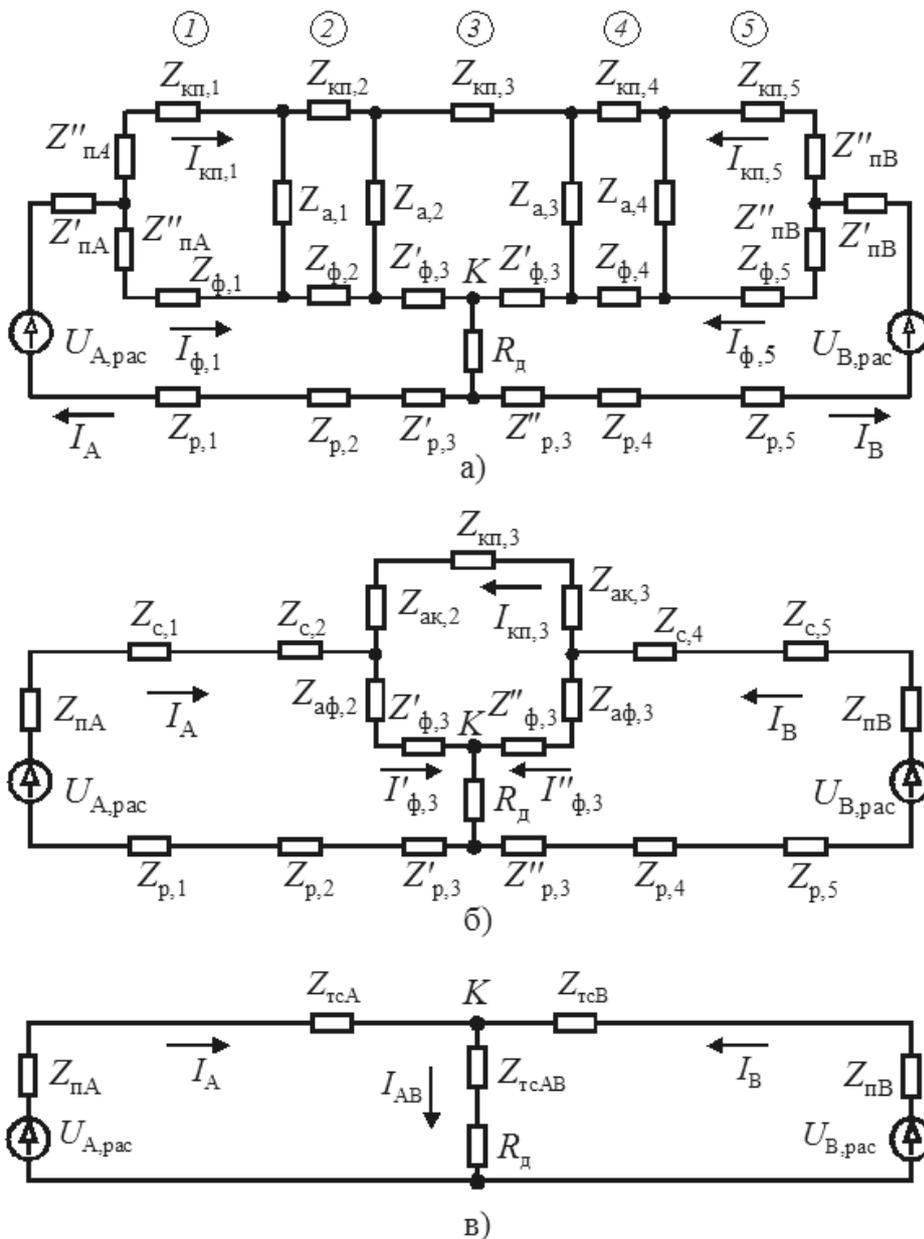


Рисунок 7.3 – Схема замещения тяговой сети 2×25 кВ и ее преобразование

Сопротивления трансформаторов $Z'_{пА}$, $Z''_{пА}$, $Z'_{пВ}$, $Z''_{пВ}$ и автотрансформаторов $Z_{а,1} \dots Z_{а,4}$ вычисляют в соответствии с 7.2. Сопротивления участков контактной подвески $Z_{к,1} \dots Z_{к,5}$, питающего провода $Z_{ф,1} \dots Z_{ф,5}$, эквивалентной контактной сети $Z_{с,1} \dots Z_{с,5}$ и рельсов $Z_{р,1} \dots Z_{р,5}$ определяют с использованием таблиц их индуктивно развязанных удельных параметров $z_{к}$, $z_{ф}$, $z_{с}$, $z_{р}$, составляемых для железных дорог каждой из стран – членов ОСЖД в соответствии с 3.4 по методике, приведенной в приложении Б. При индуктивной развязке учтено, в частности, что токи контактной подвески $I_{к}$ и питающего провода $I_{ф}$ на неповрежденных участках направлены встречно, хотя в схеме замещения на рисунке 7.3 их направление обозначено согласно.

Для упрощения схемы использованы преобразования треугольника сопротивлений в звезду. При этом контактную сеть в этой схеме замещения за пределами участка с коротким замыканием (на рисунках 7.1, 7.2 и 7.3 поврежденным участком является участок № 3), представляют сопротивлениями $Z_{с,1}$, $Z_{с,2}$, $Z_{с,4}$, $Z_{с,5}$.

Автотрансформаторы, ограничивающие поврежденный участок, с сопротивлениями $Z_{a,2}$ и $Z_{a,3}$ преобразуют в сопротивления их полуобмоток $Z_{ак,2}$, $Z_{аф,2}$ и $Z_{ак,3}$, $Z_{аф,3}$, как показано на рисунке 7.3, перечисление б).

В конечном итоге для каждой из расчетных точек короткого замыкания схему замещения приводят к виду, показанному на рисунке 7.3, перечисление в), из которой следует, что для каждой расчетной точки результирующие сопротивления Z_A , Z_B , Z_{AB} схемы замещения определяются выражениями, Ом:

$$Z_A = Z'_{пА} + Z_{тс,А}, \quad (7.1)$$

$$Z_B = Z'_{пВ} + Z_{тс,В}, \quad (7.2)$$

$$Z_{AB} = Z_{тс,AB} + R_{д}. \quad (7.3)$$

По значениям этих сопротивлений вычисляют токи I_A , I_B , I_{AB} по формулам (6.8), (6.9) и (6.10) или (6.11), (6.12).

7.2. Сопротивления тяговых подстанций и автотрансформаторных пунктов

7.2.1. В сопротивлениях тяговой подстанции $Z_{п}$ ($Z_{пА}$, $Z_{пВ}$) учитывают сопротивления питающей энергосистемы Z'_c и силового трансформатора $Z'_т$. Если тяговая сеть получает питание от обмотки силового трансформатора, включенного в треугольник с напряжением 27,5 кВ через повышающий автотрансформатор, то учитывают еще и сопротивление автотрансформатора Z_a .

Допускается указанные полные сопротивления приравнять к их индуктивным составляющим соответственно X_c , X_t , X_a .

7.2.2. Сопротивление системы внешнего электроснабжения, приведенное к напряжению тяговой сети 25 кВ, вычисляют для двухфазного короткого замыкания по формуле, Ом:

$$Z'_{п} = Z'_c = \frac{2U_{ном}^2}{S_c}, \quad (7.4)$$

где $U_{ном}$ – номинальное напряжение на выводах тяговой полуобмотки силового трансформатора, принимаемое равным 27,5 кВ;

S_c – мощность короткого замыкания на вводах в тяговую подстанцию, МВ·А.

Если параметры энергосистемы заданы не мощностью короткого замыкания, а ее сопротивлением при напряжении U_6 , или током трехфазного короткого замыкания на вводах, то значение S_c выбирают по формуле (6.5).

7.2.3. Однофазные силовые трансформаторы с расщепленной обмоткой системы тягового электроснабжения 2×25 кВ преобразуют в схеме замещения в двухлучевую звезду, сопротивление каждого из лучей, приведенное к напряжению $U_{ном}$ тяговой полуобмотки 27,5 кВ, определяют по формуле, Ом:

$$Z''_{п} = Z''_т = \frac{2u_k U_{ном}^2}{100 S_t n_t}, \quad (7.5)$$

где u_k – напряжение короткого замыкания трансформатора между обмоткой высшего напряжения и одной из обмоток напряжением 27,5 кВ, %;

S_t – номинальная мощность трансформатора, МВ·А;

n_t – число однотипных трансформаторов, включенных в работу.

7.2.4. Сопротивление одной фазы трехфазного трансформатора, приведенное к номинальному напряжению 27,5 кВ вторичной обмотки, вычисляют по формуле, Ом:

$$Z_T = \frac{u_K U_{\text{НОМ}}^2}{100 S_T n_T}, \quad (7.6)$$

где u_K – напряжение короткого замыкания трансформатора между обмоткой высшего напряжения и обмоткой с номинальным напряжением 27,5 кВ, %;

Сопротивление автотрансформатора, приведенные к напряжению 27,5 кВ, вычисляют по формуле, Ом:

$$Z_a = \frac{u_K U_{\text{НОМ}}^2}{100 S_a}, \quad (7.7)$$

где u_K – напряжение короткого замыкания автотрансформатора, %;

S_a – номинальная мощность автотрансформатора, МВ·А.

7.3. Параметры места короткого замыкания

Параметры места короткого замыкания R_d принимают по 6.3.

7.4. Электрические параметры тяговой сети

7.4.1. Для вычисления результирующих сопротивлений схемы замещения тяговой сети напряжением 2×25 кВ, приведенной к тяговой сети напряжением 25 кВ, используют следующие справочные значения погонных сопротивлений, отнесенных к длине 1 км:

z_K – индуктивно развязанное сопротивление контактной подвески, Ом/км;

z_ϕ – индуктивно развязанное сопротивление питающего провода, Ом/км;

$z_{p,1}$, $z_{p,2}$ – индуктивно развязанные сопротивления рельсов соответственно одного и двух путей, Ом/км;

z_c – индуктивно развязанное эквивалентное сопротивление контактной сети, Ом/км.

7.4.2. В расчетах используют также следующие справочные значения коэффициентов, определяющих распределение токов в элементах тяговой сети напряжением 2×25 кВ:

α_K – доля суммарного тока контактной сети одного пути в контактной подвеске на участке между смежными автотрансформаторами, на котором контактная сеть не имеет повреждений;

β_K – доля суммарного тока контактной сети в рельсовой цепи участка между смежными автотрансформаторами, который примыкает к участку с поврежденной контактной сетью;

γ_K – доля суммарного тока контактной сети в полуобмотках смежных автотрансформаторов, ограничивающих участок с поврежденной контактной сетью.

7.4.3 Значения указанных сопротивлений и коэффициентов принимают по таблицам, которые вычисляют по методике, приведенной в приложении Б, применительно к специфике и особенностям конструкции контактной сети железных дорог каждой из стран – членов ОСЖД.

7.5. Расчетные схемы питания

7.5.1. Расчетным точкам $K1...K6$ короткого замыкания, указанным на рисунке 7.2, соответствуют расчетные схемы питания, приведенные на рисунке 7.4 для

однопутных и двухпутных участков, пост секционирования на которых может быть совмещен с автотрансформаторным пунктом. Расчетные точки $K1, K3, K5$ относятся к короткому замыканию между питающим проводом и рельсами, а расчетные точки $K2, K4, K6$ – между контактной подвеской и рельсами.

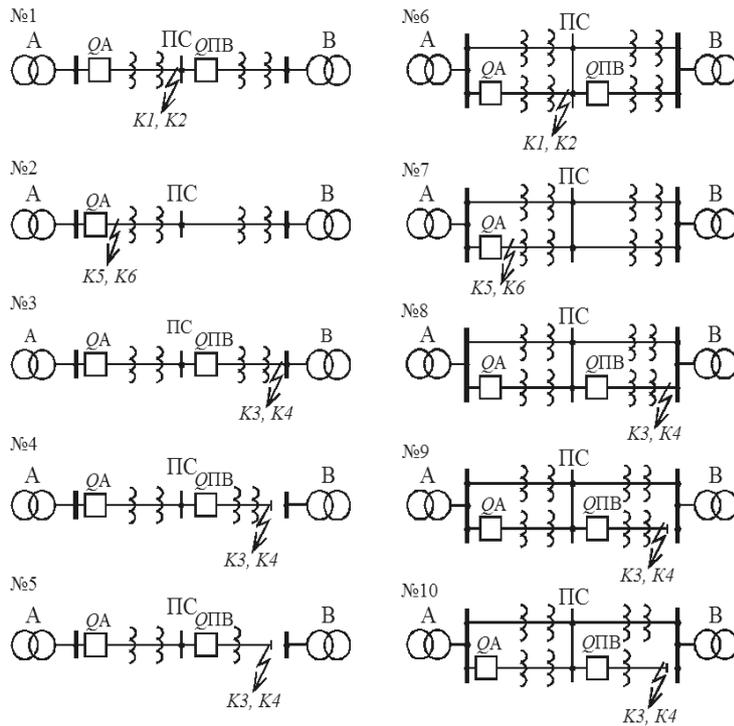


Рисунок 7.4 – Расчетные схемы питания тяговой сети 2×25 кВ при коротком замыкании

Расчетные схемы № 1, № 2, № 3, а также № 6, № 7, № 8, используют для выбора уставок защит в нормальных условиях эксплуатации. Схемы № 4, № 5 и № 9, № 10 используют для корректировки уставок защит третьей ступени при одностороннем питании или при выведении из работы ближайшего к смежной тяговой подстанции В линейного автотрансформатора.

7.5.2. Расчетные схемы для определения уставок конкретных защит выбирают в соответствии с таблицей 7.1, шифр выключателей в которой соответствует рисункам 7.1 и 7.4.

Таблица 7.1 – Выбор расчетной схемы

Вид защиты ¹⁾	Номер расчетной схемы при числе путей m (рисунок 7.4) для выбора уставок защиты выключателя			
	$m=1$		$m=2$	
	QA	QПВ	QA	QПВ
ТО	1	3	6	8
	2	1	7	6
МТЗ	1	3	6	8

ДЗ1	1	3	6	8
ДЗ2	1	3	6	8
ДЗ3	4	4	9	9
	5	5	10	10
ЗМН	2	1	7	6

¹⁾Обозначения: ТО – токовая отсечка; МТЗ – максимальная токовая защита; ДЗ1, ДЗ2, ДЗ3 – соответственно первая, вторая и третья ступени направленной дистанционной защиты; ЗМН – защита минимального напряжения.

7.5.3 Результирующие сопротивления Z_A , Z_B , Z_{AB} для каждой из расчетной схем и расчетной точки короткого замыкания вычисляются по формулам (7.1), (7.2), (7.3), в которых $Z_{тсА}$, $Z_{тсВ}$, $Z_{тсАВ}$ определяются по формулам, приведенным в таблице 7.2.

Таблица 7.2 – Данные для расчета результирующих сопротивлений

Номер схемы рис. 7.4	Расчетная точка	Шифр	Формулы для вычисления сопротивлений замещения, Ом
1	K1	$Z_{тс,А}$	$0,5Z''_{пА} + z_c \square_{АП} + \gamma_k Z_{a,2} + z_{p,1} (\beta_k \square_2 + \square \square'_3)$
		$Z_{тс,В}$	$0,5Z''_{пВ} + z_c \square_{ПВ} + \gamma_k Z_{a,3} + z_{p,1} (\square''_3 + \beta_k \square_4)$

Продолжение таблицы 7.2

Номер схемы рис. 7.4	Расчетная точка	Шифр	Формулы для вычисления сопротивлений замещения, Ом
1	K1	Z _{ТС,AB}	$\left(\frac{\alpha_K}{1 - \alpha_K} \right) \frac{(\gamma_K Z_{a,2} + z_c \ell'_3)(\gamma_K Z_{a,3} + z_c \ell''_3)}{\gamma_K (Z_{a,2} + Z_{a,3}) + z_c \ell_3}$
2	K5	Z _{ТС,A}	$(1 - \alpha_K) Z''_{пА}$
		Z _{ТС,B}	$0,5 Z''_{пВ} + z_c \square_{AB} + \gamma_K Z_{a,1} + z_{p,1} [\beta_K (\square_2 + \square_3 + \square_4) + \square_1]$
		Z _{ТС,AB}	$\frac{Z'_{пА} \alpha_K (\gamma_K Z_{a,1} + z_c \ell_1)}{\gamma_K (Z_{a,1} + 2Z''_{пА}) + z_c \ell_1}$
	K6	Z _{ТС,A}	$\alpha_K Z''_{пА}$
		Z _{ТС,B}	$0,5 Z''_{пВ} + z_c \square_{AB} + \gamma_K Z_{a,1} + z_{p,1} [\beta_K (\square_2 + \square_3 + \square_4) + \square_1]$
		Z _{ТС,AB}	$\frac{Z'_{пА} (1 - \alpha_K) (\gamma_K Z_{a,1} + z_c \ell_1)}{\gamma_K (Z_{a,1} + 2Z''_{пА}) + z_c \ell_1}$
3	K3	Z _{ТС,A}	$0,5 Z''_{пА} + z_c \square_{AB} + \gamma_K Z_{a,4} + z_{p,1} [\beta_K (\square_2 + \square_3 + \square_4) + \square_5]$
		Z _{ТС,B}	$(1 - \alpha_K) Z''_{пВ}$
		Z _{ТС,AB}	$\frac{Z'_{пВ} \alpha_K (\gamma_K Z_{a,4} + z_c \ell_5)}{\gamma_K (Z_{a,4} + 2Z''_{пВ}) + z_c \ell_5}$
	K4	Z _{ТС,A}	$0,5 Z''_{пА} + z_c \square_{AB} + \gamma_K Z_{a,4} + z_{p,1} [\beta_K (\square_2 + \square_3 + \square_4) + \square_5]$
		Z _{ТС,B}	$\alpha_K Z''_{пВ}$
		Z _{ТС,AB}	$\frac{Z'_{пВ} (1 - \alpha_K) (\gamma_K Z_{a,4} + z_c \ell_5)}{\gamma_K (Z_{a,4} + 2Z''_{пВ}) + z_c \ell_5}$
4	K3	Z _{ТС,A}	$0,5 Z'_{пА} + z_c (\square_{AB} - \square_5) + z_{p,1} \beta_K (\square_2 + \square_3 + \square_4)$
		Z _{ТС,B}	∞
		Z _{ТС,AB}	$\alpha_K Z_{a,4} + (z_\phi + z_{p,1}) \square_5$
	K4	Z _{ТС,A}	$0,5 Z''_{пА} + z_c (\square_{AB} - \square_5) + z_{p,1} \beta_K (\square_2 + \square_3 + \square_4)$
		Z _{ТС,B}	∞
		Z _{ТС,AB}	$(1 - \alpha_K) Z_{a,4} + (z_\phi + z_{p,1}) \square_5$
5	K3	Z _{ТС,A}	$0,5 Z''_{пА} + z_c (\square_1 + \square_2 + \square_3) + z_{p,1} \beta_K (\square_2 + \square_3)$
		Z _{ТС,B}	∞
		Z _{ТС,AB}	$\alpha_K Z_{a,3} + (z_\phi + z_{p,1}) (\square_4 + \square_5)$
	K4	Z _{ТС,A}	$0,5 Z''_{пА} + z_c (\square_1 + \square_2 + \square_3) + z_{p,1} \beta_K (\square_2 + \square_3)$
		Z _{ТС,B}	∞
		Z _{ТС,AB}	$(1 - \alpha_K) Z_{a,4} + (z_\phi + z_{p,1}) (\square_4 + \square_5)$

Продолжение таблицы 7.2

Номер схемы рис. 7.4	Расчетная точка	Шифр	Формулы для вычисления сопротивлений замещения, Ом
6	K1	Z _{ТС,А}	$0,5(Z''_{\text{ПА}} + z_c \square_{\text{АП}} + \gamma_K Z_{a,2}) + z_{p,2} (\beta_K \square_2 + \square'_3)$
		Z _{ТС,В}	$0,5(Z''_{\text{ПВ}} + z_c \square_{\text{ПВ}} + \gamma_K Z_{a,3}) + z_{p,2} (\square''_3 + \beta_K \square_4)$
		Z _{ТС,АВ}	$\left(\frac{\alpha_K}{2(1-\alpha_K)} \right) \frac{(\gamma_K Z_{a,2} + z_{c,\varepsilon} \ell'_3)(\gamma_K Z_{a,3} + z_{c,\varepsilon} \ell''_3)}{\gamma_K (Z_{a,2} + Z_{a,3}) + z_{c,\varepsilon} \ell_3}$
	K2	Z _{ТС,А}	$0,5(Z''_{\text{ПА}} + z_c \square_{\text{АП}} + \gamma_K Z_{a,2}) + z_{p,2} (\beta_K \square_2 + \square'_3)$
		Z _{ТС,В}	$0,5(Z''_{\text{ПВ}} + z_c \square_{\text{ПВ}} + \gamma_K Z_{a,3}) + z_{p,2} (\square''_3 + \beta_K \square_4)$
		Z _{ТС,АВ}	$\left(\frac{1-\alpha_K}{2\alpha_K} \right) \frac{(\gamma_K Z_{a,2} + z_{c,\varepsilon} \ell'_3)(\gamma_K Z_{a,3} + z_{c,\varepsilon} \ell''_3)}{\gamma_K (Z_{a,2} + Z_{a,3}) + z_{c,\varepsilon} \ell_3}$
7	K5	Z _{ТС,А}	$(1-\alpha_K) Z''_{\text{ПА}}$
		Z _{ТС,В}	$0,5(Z''_{\text{ПВ}} + z_c \square_{\text{АВ}} + \gamma_K Z_{a,1}) + z_{p,2} [\beta_K (\square_2 + \square_3 + \square_4) + \square \square_1]$
		Z _{ТС,АВ}	$\frac{Z''_{\text{ПА}} \alpha_K (\gamma_K Z_{a,1} + z_c \ell_1)}{\gamma_K (Z_{a,1} + 4Z''_{\text{ПА}}) + z_c \ell_1}$
	K6	Z _{ТС,А}	$\alpha_K Z''_{\text{ПА}}$
		Z _{ТС,В}	$0,5(Z''_{\text{ПВ}} + z_c \square_{\text{АВ}} + \gamma_K Z_{a,1}) + z_{p,2} [\beta_K (\square_2 + \square_3 + \square_4) + \square \square_1]$
		Z _{ТС,АВ}	$\frac{Z''_{\text{ПА}} (1-\alpha_K) (\gamma_K Z_{a,1} + z_c \ell_1)}{\gamma_K (Z_{a,1} + 4Z''_{\text{ПА}}) + z_c \ell_1}$
8	K3	Z _{ТС,А}	$0,5(Z''_{\text{ПА}} + z_c \square_{\text{АВ}} + \gamma_K Z_{a,4}) + z_{p,2} [\beta_K (\square_2 + \square_3 + \square_4) + \square \square_5]$
		Z _{ТС,В}	$(1-\alpha_K) Z''_{\text{ПВ}}$
		Z _{ТС,АВ}	$\frac{Z''_{\text{ПВ}} \alpha_K (\gamma_K Z_{a,4} + z_c \ell_5)}{\gamma_K (Z_{a,4} + 4Z''_{\text{ПВ}}) + z_c \ell_5}$
	K4	Z _{ТС,А}	$0,5(Z''_{\text{ПА}} + z_c \square_{\text{АВ}} + \gamma_K Z_{a,4}) + z_{p,2} [\beta_K (\square_2 + \square_3 + \square_4) + \square \square_5]$
		Z _{ТС,В}	$\alpha_K Z''_{\text{ПВ}}$
		Z _{ТС,АВ}	$\frac{Z''_{\text{ПВ}} (1-\alpha_K) (\gamma_K Z_{a,4} + z_c \ell_5)}{\gamma_K (Z_{a,4} + 4Z''_{\text{ПВ}}) + z_c \ell_5}$
9	K3	Z _{ТС,А}	$0,5[Z''_{\text{ПА}} + z_c (\square_1 + \square_2 + \square'_3)] + z_{p,2} \beta_K (\square_2 + \square_3 + \square_4)$
		Z _{ТС,В}	$0,5Z''_{\text{ПА}} + z_c (\square''_3 + \square_4 + \square_5)$
		Z _{ТС,АВ}	$z_c (\square''_3 + \square_4) + \alpha_K Z_{a,4} + (z_{\text{ф}} + z_{p,2}) \square_5$
	K4	Z _{ТС,А}	$0,5[0,5Z''_{\text{ПА}} + z_c (\square_1 + \square_2 + \square'_3)] + z_{p,2} \beta_K (\square_2 + \square_3 + \square_4)$
		Z _{ТС,В}	$0,5Z''_{\text{ПВ}} + z_c (\square''_3 + \square_4 + \square_5)$
		Z _{ТС,АВ}	$z_c (\square''_3 + \square_4) + (1-\alpha_K) Z_{a,4} + (z_K + z_{p,2}) \square_5$

Окончание таблицы 7.2

Номер схемы рис. 7.4	Расчетная точка	Шифр	Формулы для вычисления сопротивлений замещения, Ом
10	K3	$Z_{TC,A}$	$0,5[0,5Z''_{пА} + z_c(\square_1 + \square_2 + \square'_3)] + z_{p,2}\beta_k(\square_2 + \square_3)$
		$Z_{TC,B}$	$0,5Z''_{пВ} + z_c(\square''_3 + \square_4 + \square_5)$
		$Z_{TC,AB}$	$z_c \square''_3 + \alpha_k Z_{a,3} + (z_\phi + z_{p,2})(\square_4 + \square_5)$
	K4	$Z_{TC,A}$	$0,5[Z''_{пА} + z_c(\square_1 + \square_2 + \square'_3)] + z_{p,2}\beta_k(\square_2 + \square_3)$
		$Z_{TC,B}$	$0,5Z''_{пВ} + z_{cэ}(\square''_3 + \square_4 + \square_5)$
		$Z_{TC,AB}$	$z_c \square''_3 + (1 - \alpha_k)Z_{a,3} + (z_k + z_{p,2})(\square_4 + \square_5)$

7.6. Вычисление параметров короткого замыкания

7.6.1. Значения результирующих эквивалентных токов I_A и I_B схемы замещения тяговой сети напряжением 2×25 кВ, приведенной к тяговой сети напряжением 25 кВ в соответствии с рисунком 7.3, перечисления б) и в), вычисляются по формулам (6.8), (6.9), (6.10) или (6.11), (6.12).

7.6.2. Токи контактной подвески $I_{к,1}$, $I_{к,5}$ и питающего провода $I_{ф,1}$, $I_{ф,5}$ на подстанциях А и В при коротком замыкании за пределами головных участков 1 и 5, примыкающих к тяговым подстанциям соответственно А и В (рисунок 7.3, перечисление а)), вычисляются по формулам, А:

$$I_{к,1} = \frac{\alpha_{к,1}}{m} I_A, \quad (7.8)$$

$$I_{ф,1} = \frac{(1 - \alpha_{к,1})}{m} I_A, \quad (7.9)$$

$$I_{к,5} = \frac{\alpha_{к,5}}{m} I_B, \quad (7.10)$$

$$I_{ф,5} = \frac{(1 - \alpha_{к,5})}{m} I_B, \quad (7.11)$$

в которых $\alpha_{к,1}$, $\alpha_{к,5}$ – доли суммарного тока контактной сети одного пути в контактной подвеске на головных участках;

m – число путей.

Значения $\alpha_{к,1}$ при коротком замыкании за пределами головного участка, примыкающего к тяговой подстанции А, и $\alpha_{к,5}$ при коротком замыкании за пределами головного участка, примыкающего к тяговой подстанции В, вычисляются по формулам:

$$\alpha_{к,1} = \frac{\gamma_k m Z''_{пА} + \alpha_k z_c \ell_1}{2\gamma_k m Z''_{пА} + z_c \ell_1}, \quad (7.12)$$

$$\alpha_{к,5} = \frac{\gamma_k m Z''_{пВ} + \alpha_k z_c \ell_5}{2\gamma_k m Z''_{пВ} + z_c \ell_5}. \quad (7.13)$$

7.6.3. Токи контактной подвески и питающего провода на посту секционирования ПС вычисляют для расчетных схем (рисунок 7.4).

Для схем № 1 и № 6 (короткое замыкание между контактной подвеской и рельсами – точка *K2*) токи вычисляют по формулам, А:

$$I_{к,3} = \alpha_k \frac{I_B(\gamma_k Z_{a,3} + z_c \ell''_3) - I_A(\gamma_k Z_{a,2} + z_c \ell'_3)}{m[\gamma_k(Z_{a,2} + Z_{a,3}) + z_c \ell_3]}, \quad (7.14)$$

$$I'_{ф,3} = \frac{I_A}{m} + I_{к,3}, \quad (7.15)$$

$$I''_{ф,3} = \frac{I_B}{m} - I_{к,3}. \quad (7.16)$$

Для схем № 1 и № 6 (короткое замыкание между питающим проводом и рельсами – точка *K1*) токи вычисляют по формулам, А:

$$I_{ф,3} = (1 - \alpha_k) \frac{I_B(\gamma_k Z_{a,3} + z_c \ell''_3) - I_A(\gamma_k Z_{a,2} + z_c \ell'_3)}{m[\gamma_k(Z_{a,2} + Z_{a,3}) + z_c \ell_3]}, \quad (7.17)$$

$$I'_{к,3} = \frac{I_A}{m} + I_{ф,3}, \quad (7.18)$$

$$I''_{к,3} = \frac{I_B}{m} - I_{ф,3}. \quad (7.19)$$

Для схем № 3 и № 8 токи вычисляют по формулам, А:

$$I_{к,3} = \frac{\alpha_k}{m} I_A, \quad (7.20)$$

$$I_{ф,3} = \frac{1 - \alpha_k}{m} I_A. \quad (7.21)$$

Для схемы №№ 4, 5, 9, 10 токи вычисляют по формулам, А:

$$I_{ф,3} = (1 - \alpha_k)(I_A + I_B), \quad (7.22)$$

$$I_{к,3} = \alpha_k(I_A + I_B). \quad (7.23)$$

7.6.4 Напряжение на подстанции А на шинах питающего провода $U_{А,ф}$ и шинах контактной подвески $U_{А,к}$ вычисляют по формулам, кВ:

$$U_{А,ф} = U_{А,рас} - (I_A Z'_{пА} + m I_{ф,1} Z''_{пА}) 10^{-3} = U_{А,рас} - I_A [Z'_{пА} + (1 - \alpha_{к,1}) Z''_{пА}] 10^{-3}, \quad (7.24)$$

$$U_{А,к} = U_{А,рас} - (I_A Z'_{пА} + m I_{к,1} Z''_{пА}) 10^{-3} = U_{А,рас} - I_A (Z'_{пА} + \alpha_{к,1} Z''_{пА}) 10^{-3}. \quad (7.25)$$

7.6.5 Напряжение на шинах питающего провода и контактной подвески поста секционирования ПС вычисляют по формуле, кВ:

$$U_{ПС} = U_{А,рас} - I_A \left[Z'_{пА} + \frac{z_c}{m} (\ell_1 + \ell_2 + \ell'_3) + \gamma_k \frac{Z_{a,2}}{m} + z_p (\beta_k \ell_2 + \ell'_3) \right] 10^{-3} + (I_A + I_B) R_d 10^{-3}. \quad (7.26)$$

В формуле (7.26) принимают для однопутного участка z_p равным $z_{p,1}$, для двухпутного участка принимают z_p равным $z_{p,2}$.

7.6.6. Сопротивление, измеряемое защитами, для присоединения питающей

линии контактной подвески на тяговой подстанции А (двухполюсный выключатель QA) при любой схеме питания и четных номерах расчетных точек по рисунку 7.4, определяют по формуле, Ом:

$$Z_{QA,к} = \frac{U_{A,к} 10^3}{I_{к,1}}. \quad (7.27)$$

Для присоединения питающей линии питающего провода на тяговой подстанции А (двухполюсный выключатель QA) при любой схеме питания по рисунку 7.4 и нечетных номерах расчетных точек сопротивление определяют по формуле, Ом:

$$Z_{QA,ф} = \frac{U_{A,ф} 10^3}{I_{ф,1}}. \quad (7.28)$$

Для присоединения питающей линии контактной подвески на посту секционирования ПС (двухполюсный выключатель $QPВ$) при расчетной точке $K4$ короткого замыкания для всех схем по рисунку 7.4, на которых обозначена эта точка, сопротивление определяют по формуле, Ом:

$$Z_{QPВ,к} = \frac{U_{ПС} 10^3}{I_{к,3}}. \quad (7.29)$$

Для присоединения питающей линии питающего провода на посту секционирования ПС (двухполюсный выключатель $QPВ$) при расчетной точке $K3$ короткого замыкания всех схем по рисунку 7.4, на которых обозначена эта точка, сопротивление определяют по формуле, Ом:

$$Z_{QPВ,ф} = \frac{U_{ПС} 10^3}{I_{ф,3}}. \quad (7.30)$$

8. Выбор уставок защит и блокировок присоединений вводов распределительных устройств напряжением 25 кВ и 2×25 кВ

8.1. Токовая защита с блокировкой по напряжению

8.1.1. Уставку по току токовой защиты с блокировкой по напряжению выбирают по условиям, А:

$$I_{Т,НОМ} \frac{K_3}{K_B} \leq I_{у,ТЗ} \leq \frac{0,95U_{НОМ}}{Z_{П}K_Ч}, \quad (8.1)$$

где $I_{у,ТЗ}$ – уставка токовой защиты, А;

$I_{Т,НОМ}$ – номинальный ток тяговой обмотки понижающего трансформатора, кВ·А;

$U_{НОМ}$ – номинальное напряжение тяговой обмотки, которое принимают равным 27,5 кВ;

$Z_{П}$ – сопротивление тяговой подстанции в минимальном режиме энергосистемы, Ом;

$k_ч$ – коэффициент чувствительности, значение которого принимают 1,5;

k_3 – коэффициент запаса, значение которого принимают от 1,15 до 1,25;
 k_B – коэффициент возврата, значение которого принимают от 0,85 до 0,9.

Сопротивление тяговой подстанции для системы тягового электроснабжения напряжением 25 кВ принимают по 6.2, а для системы напряжением 2×25 кВ по формуле, Ом:

$$Z_{\Pi} = 2Z'_{\Pi} + Z''_{\Pi}, \quad (8.2)$$

где Z'_{Π} и Z''_{Π} – принимают по (7.4) и (7.5) соответственно.

8.1.2 Уставку блокировки по напряжению выбирают по условию, кВ:

$$U_{y,БН} \leq \frac{0,9U_{НОМ}}{k_3 k_B}, \quad (8.3)$$

где $U_{y,БН}$ – уставка блокировки по напряжению, кВ;

$U_{НОМ}$ – номинальное междуфазное напряжение той стороны трансформатора (среднего напряжения СН или низшего напряжения НН), к которой подключены входные органы минимального напряжения, кВ;

k_3 – коэффициент запаса, значение которого принимают 1,2;

k_B – коэффициент возврата, значение которого принимают от 1,15 до 1,2.

Чувствительность по напряжению не проверяют.

8.2. Направленная дистанционная защита (первая ступень)

8.2.1. Уставку первой ступени направленной дистанционной защиты выбирают по условию, Ом:

$$Z_{y,ДЗ1} \leq k_{отс} Z_K, \quad (8.4)$$

где $Z_{y,ДЗ1}$ – уставка первой ступени направленной дистанционной защиты вводов распределительного устройства, Ом;

$k_{отс}$ – коэффициент отстройки;

Z_K – сопротивление, измеряемое защитой при коротком замыкании, Ом.

Для отдельного режима питания путей системы напряжением 25 кВ принимают $k_{отс}$ равным от 0,5 до 0,6 и

$$Z_K = z_{m1} \square_{AB}, \quad (8.5)$$

где \square_{AB} – расстояние от тяговой подстанции А до смежной тяговой подстанции В, км.

Для узлового и параллельного режимов питания путей принимают $k_{отс}$ равным от 0,8 до 0,9 и

$$Z_K = z_{m1} \square_{АП}, \quad (8.6)$$

где $\square_{АП}$ – расстояния от тяговой подстанции А до поста секционирования ПС в соответствии с рисунком 6.1, перечисление а), км.

Для системы напряжением 2×25 кВ значение $k_{отс}$ принимают от 0,8 до 0,9, а значения Z_K вычисляют: для присоединений питающих линий контактной подвески $Z_K = Z_{QA,к}$ и питающего провода $Z_K = Z_{QA,ф}$ по формулам (7.27) и (7.28) для расчетной схемы № 1 рисунка 7.4.

8.2.2. Угловая характеристика первой ступени должна соответствовать сектору 1 ст ДЗ, приведенному на рисунке А.3 приложения А. Правый радиус сектора 1 ст ДЗ совмещают с осью R или смещают его по часовой стрелке относительно этой оси на угол не более 5 градусов, а левый устанавливают под углом от 110 до 170 градусов.

Допускается правый радиус устанавливать под углом от 50 до 55 градусов против часовой стрелки по отношению к оси R .

Блокировка ступени по фазовому углу наступает при фазовом угле φ_K , выходящим за пределы сектора 1 ст ДЗ по рисунку А.3 приложения А.

8.2.3. Уставка блокировки по току должна отвечать условию, А:

$$I_{y,БТ} \leq k_3 I_{ур,маx}, \quad (8.7)$$

где $I_{y,БТ}$ – уставка блокировки по току, А;

$I_{ур,маx}$ – наибольшее значение уравнильного тока, А;

k_3 – коэффициент запаса, значение которого принимают от 1,15 до 1,25.

8.3. Направленная дистанционная защита (вторая ступень)

8.3.1. Уставку второй ступени направленной дистанционной защиты выбирают по условию, Ом:

$$Z_{y,ДЗ2} \geq k_ч Z_K, \quad (8.8)$$

где $Z_{y,ДЗ2}$ – уставка второй ступени направленной дистанционной защиты вводов распределительного устройства, Ом;

Z_K – сопротивление, измеряемое защитой при коротком замыкании в конце защищаемой зоны, Ом;

$k_ч$ – коэффициент чувствительности, значение которого принимают 1,5.

Значение Z_K вычисляют для схемы питания путей системы электроснабжения напряжением 25 кВ:

- раздельной – по формуле (8.5);

- узловой и параллельной – по формуле (8.6).

Для системы электроснабжения 2×25 кВ принимают $k_ч$ равным 1,5, а значения Z_K вычисляют: для присоединений питающих линий контактной подвески $Z_K = Z_{QA,к}$ и питающего провода $Z_K = Z_{QA,ф}$ по формулам (7.27) и (7.28) для расчетной схемы № 1 по рисунку 7.4.

8.3.2. Блокировку второй ступени по фазовому углу осуществляют за счет применения угловой характеристики в виде сектора 2 ст ДЗ, приведенного на рисунке А.3 приложения А. Правый радиус сектора должен быть повернут против часовой стрелки на угол φ от 45 до 53 градусов. Левый радиус сектора устанавливают под углом от 110 до 120 градусов к оси сопротивлений R . Блокировка наступает при фазовом угле φ_K , выходящем за пределы сектора 2 ст ДЗ.

8.3.3 Уставка блокировки по току должна отвечать 8.2.3.

8.4. Защита минимального напряжения

8.4.1. Уставку защиты минимального напряжения, подключенной к трансформаторам напряжения шин напряжением 25 кВ и 2×25 кВ, выбирают по условию, кВ:

$$U_{y,ЗМН} \leq 0,6 U_{ш,ном}, \quad (8.9)$$

где $U_{y,ЗМН}$ – уставка защиты минимального напряжения, кВ;

$U_{ш,ном}$ – номинальное напряжение шин, принимаемое 27,5 кВ.

Выдержку времени τ принимают не менее $2\Delta t$ по 4.3.2.

8.4.2. Уставку защиты минимального напряжения, подключенной к

трансформаторам напряжения обмотки высшего напряжения ВН (115, 230 кВ) силового трансформатора, выбирают по условию, кВ:

$$U_{y,3MH} \leq 0,2U_{BH}, \quad (8.10)$$

где U_{BH} – номинальное напряжение обмотки высшего напряжения ВН силового трансформатора, кВ.

8.4.3. Блокировку защиты от неисправности цепей напряжения выполняют при срабатывании автомата во вторичных цепях трансформатора напряжения.

8.5. Защита по направлению мощности от подпитки со стороны контактной сети

8.5.1. Угловая характеристика защиты по направлению мощности должна иметь на комплексной плоскости тока вид сектора, два луча которого выходят из начала координат, и иметь длину, ограниченную величиной уравнивающего тока.

Первый луч сектора устанавливают под углом от 90 до 135 градусов по отношению к оси действительных количеств в сторону отставания. Второй луч сектора устанавливают под углом от 225 до 270 градусов в сторону отставания.

При выходе вектора тока подпитки за пределы угла, ограниченного лучами угловой характеристики, защита блокируется.

8.5.2. Уставка блокировки по току должна отвечать условию (8.7).

8.5.3. Блокировка защиты по напряжению должна отвечать требованиям 8.4. Блокировку защиты выполняют также при срабатывании автомата во вторичных цепях трансформатора напряжения.

8.5.4. Уставку защиты от превышения напряжения в фазах А и В выбирают по условию, кВ:

$$U_{y,3PH} \geq k_3 U_{H,НОМ}, \quad (8.11)$$

где $U_{y,3PH}$ – уставка защиты от превышения напряжения (не более 35 кВ), кВ;

$U_{H,НОМ}$ – номинальное напряжение на шинах 27,5 кВ;

k_3 – коэффициент запаса, принимаемый равным 1.1.

9. Выбор уставок защит присоединений питающих линий контактной сети главных путей перегонов для распределительных устройств напряжением 25 кВ и 2×25 кВ тяговых подстанций

9.1. Токовая отсечка

9.1.1. Уставку токовой отсечки выбирают по условию, А:

$$I_{y,TO} \geq K_{отс} I_{K,маx}, \quad (9.1)$$

где $I_{y,TO}$ – уставка токовой отсечки, А;

$I_{K,маx}$ – наибольшее действующее значение тока присоединения при коротком замыкании в заданной точке расчетной схемы питания в режиме максимума энергосистемы, А;

$K_{отс}$ – коэффициент отстройки, значение которого для схемы одностороннего питания, а также для раздельной, узловых и параллельной схемам двухстороннего питания принимают от 1,3 до 1,6, при этом для узловой схемы без выключателей на

посту секционирования допускается принимать $k_{отс} = 1$.

9.1.2. В качестве расчетных схем для системы 25 кВ при вычислении наибольшего значения тока $I_{K,max}$ принимают для присоединений питающих линий контактной сети главных путей перегонов в соответствии с таблицей 6.1:

- при раздельном питании путей – схему № 1;
- при узловом и параллельном питании путей – схему № 5;
- при узловой схеме питания и постах секционирования без выключателей – схему № 6.

9.1.3. Наибольшее значение тока присоединения $I_{K,max}$ системы напряжением 25 кВ при раздельном режиме питания путей для расчетной схемы № 1 таблицы 6.1 вычисляют по формуле, А:

$$I_{K,max} = \frac{U_{рас} 10^3}{Z_{пА} + z_{m1} \ell_{AB}}, \quad (9.2)$$

где $U_{рас}$ – расчетное напряжение тяговой подстанции в соответствии с 6.2.1, кВ;
 $Z_{пА}$ – сопротивление тяговой подстанции А в режиме максимума энергосистемы, которое вычисляют по 6.2, Ом;

z_{m1} – погонное сопротивление 1 км тяговой сети одного пути m -путного участка, Ом/км;

\square_{AB} – расстояние между тяговыми подстанциями А и В в соответствии с рисунком 6.1, перечисление а), км.

Наибольшее значение тока присоединения при узловом и параллельном режиме питания путей для расчетной схемы № 5 таблицы 6.1 вычисляют по формуле, А:

$$I_{K,max} = \frac{U_{рас} 10^3}{Z_{пА} + z_{m1} \ell_{АП}}, \quad (9.3)$$

где $\square_{АП}$ – расстояние от тяговой подстанции А до поста секционирования ПС в соответствии с рисунком 6.1, перечисление а), км.

При узловой схеме питания и постах секционирования без выключателей значение $I_{K,max}$ вычисляют для расчетной схемы № 6 таблицы 6.1 по формуле, А:

$$I_{K,max} = \frac{U_{рас} 10^3}{n_1 (Z_{пА} + z_{mn} \ell_{АП})}. \quad (9.4)$$

9.1.4. Выбранную по условию (9.1) уставку токовой отсечки проверяют на чувствительность к коротким замыканиям в начале защищаемой зоны в режиме минимума энергосистемы по условию:

$$\frac{I_{K,min,н}}{I_{у,ТО}} \geq K_{ч}, \quad (9.5)$$

где $I_{K,min,н}$ – наименьшее значение тока присоединения при коротком замыкании в начале защищаемой зоны в режиме минимума энергосистемы, А;

$I_{у,ТО}$ – выбранная по (9.1) уставка токовой отсечки, А;

$K_{ч}$ – коэффициент чувствительности, значение которого принимают в соответствии с таблицей 4.1. Если условие (9.5) не выполняется, то выбирают меньшее значение уставки $I_{у,ТО}$, не нарушая условия (9.1).

9.1.5. При вычислении значений $I_{K,\min}$ в качестве расчетных схем таблицы 6.1 для системы напряжением 25 кВ принимают для присоединений питающих линий контактной сети главных путей перегонов:

- при раздельном питании путей – схему № 22;
- при узловом и параллельном питании путей – схему № 23;

9.1.6. Наименьшее значение тока присоединения $I_{K,\min,n}$ при раздельном режиме питания путей для схемы № 22 таблицы 6.1 вычисляют по формуле, А:

$$I_{K,\min,n} = U_{\text{рас}} 10^3 \left[\frac{1}{Z_{\text{ПА}}} + \frac{n-1}{n(Z_{\text{ПВ}} + z_{mn} \ell_{\text{AB}})} \right], \quad (9.6)$$

где $U_{\text{рас}}$ – расчетное напряжение тяговых подстанций в соответствии с 6.2.1 в режиме минимума энергосистемы, кВ;

$Z_{\text{ПА}}, Z_{\text{ПВ}}$ – сопротивления тяговых подстанций соответственно А и В по рисунку 6.1, перечисление а), в режиме минимума энергосистемы в соответствии с 6.2, Ом;

n – число электрифицированных путей;

z_{mn} – погонное сопротивление 1 км тяговой сети n электрифицированных путей m -путного участка, Ом/км;

\square_{AB} – расстояние между тяговыми подстанциями А и В в соответствии с рисунком 6.1, перечисление а), км.

При узловом и параллельном режиме питания путей наименьшее значение тока присоединения для расчетной схемы № 23 таблицы 6.1 вычисляют по формуле, А:

$$I_{K,\min,n} = U_{\text{рас}} 10^3 \left[\frac{1}{Z_{\text{ПА}}} + \frac{n_1-1}{n_1(Z_{\text{ПВ}} + z_{mn} \ell_{\text{АП}} + z_{mn} \ell_{\text{ПВ}})} \right], \quad (9.7)$$

где n_1 – число электрифицированных путей на участке $\square_{\text{АП}}$ в соответствии с рисунком 6.1, перечисление а).

При одностороннем питании контактной сети, используют формулу, А:

$$I_{K,\min,n} = \frac{U_{\text{рас}} 10^3}{Z_{\text{ПА}}}. \quad (9.8)$$

9.1.7. Выбранную по условию (9.1) уставку токовой отсечки, отвечающую требованию (9.5), проверяют на отстроенность от максимального тока нормального режима по условию:

$$I_{y,\text{ТО}} \geq k_3 I_{n,\text{max}}, \quad (9.9)$$

где $I_{y,\text{ТО}}$ – выбранное значение уставки токовой отсечки, А;

$I_{n,\text{max}}$ – наибольший ток данного присоединения на тяговой подстанции в нормальном режиме, А;

k_3 – коэффициент запаса, значение которого принимают от 1,1 до 1,3.

Для схемы тягового электроснабжения напряжением 25 кВ значение $I_{n,\text{max}}$ вычисляют по формуле (5.9).

Если условие (9.9) не выполняется, то выбирают большее значение уставки $I_{y,\text{ТО}}$, но не нарушая условие (9.5).

9.1.8. Для системы тягового электроснабжения напряжением 2×25 кВ выбор уставок должен осуществляться по условиям (9.1), (9.5) и (9.9).

В условии (9.1) значение $I_{K,\text{max}}$ вычисляют для присоединений питающих линий контактной подвески при $I_{K,\text{max}} = I_{k,1}$ и для питающего провода при $I_{K,\text{max}} = I_{\phi,1}$ по

формулам (7.8), (7.9) для схем питания № 1 или № 6 по рисунку 7.4 в максимальном режиме энергосистемы.

В условии (9.5) значение $I_{K,\min}$ для присоединения тех же питающих линий при $I_{K,\min} = I_{к,1}$ и $I_{K,\min} = I_{ф,1}$ вычисляют для схем питания № 2 или № 7 по рисунку 7.4 для минимального режима энергосистемы.

В условии (9.9) значение $I_{н,\max}$ для присоединений питающих линий контактной подвески при $I_{н,\max}$ равном $I_{кн,\max}$ и для питающего провода при $I_{н,\max} = I_{фн,\max}$ определяют соответственно по формулам (5.13) и (5.14).

9.2. Ненаправленная дистанционная защита

9.2.1. Уставку ненаправленной дистанционной защиты выбирают по условию, Ом:

$$Z_{у,ННДЗ} \leq k_{отс} Z_K, \quad (9.10)$$

где $Z_{у,ННДЗ}$ – уставка ненаправленной дистанционной защиты по характеристической величине – сопротивлению, Ом;

Z_K – модуль характеристической величины – сопротивления, измеряемого защитой присоединения при коротком замыкании в заданной точке расчетной схемы питания в режиме максимума энергосистемы, Ом;

$k_{отс}$ – коэффициент отстройки.

9.2.2. В качестве расчетных схем при вычислении модуля сопротивления Z_K , Ом, измеряемого защитой, применяют схемы № 1 и № 5 по таблице 6.1 и формулы в соответствии с таблицей 6.4.

9.2.3. При отдельном режиме питания путей для расчетной схемы № 1 таблицы 6.1 принимают коэффициент отстройки $k_{отс}$ от 0,5 до 0,6 и следующее условие, Ом:

$$Z_K = Z_{QA1} = z_{m1} \square_{AB}, \quad (9.11)$$

где z_{m1} – погонное сопротивление 1 км тяговой сети одного пути m -путного участка, принимаемое в соответствии с приложением Г, Ом/км;

\square_{AB} – расстояние между тяговыми подстанциями А и В в соответствии с рисунком 6.1 перечисление а), км.

При узловом и параллельном режимах питания путей для расчетной схемы № 5 таблицы 6.1 принимают $k_{отс}$ от 0,8 до 0,9 и следующее условие, Ом:

$$Z_K = Z_{QA1} = z_{m1} (\square_1 + \square_2) = z_{m1} \square_{АП}, \quad (9.12)$$

где \square_1 , \square_2 – расстояние соответственно от тяговой подстанции А до пункта параллельного соединения ППС1 и от этого пункта до поста секционирования ПС, в соответствии с рисунком 6.1, перечисление а), км;

$\square_{АП}$ – расстояние от тяговой подстанции А до поста секционирования ПС, км;

При постах секционирования без выключателей значение Z_K принимают по формуле (9.12), а уставку допускается вычислять по выражению, Ом:

$$Z_{у,ННДЗ} \leq k_3 Z_K, \quad (9.13)$$

где k_3 – коэффициент запаса, значение которого принимают от 1,0 до 1,2.

9.2.4. Выбранную по (9.10) уставку проверяют на отсутствие ложных отключений при наибольшей нагрузке нормального режима по условию, Ом:

$$Z_{у,ННДЗ} \leq \frac{Z_{н,\min}}{k_3}, \quad (9.14)$$

где $Z_{y, \text{ННДЗ}}$ – выбранная по (9.10) уставка ненаправленной дистанционной защиты, Ом;

$Z_{n, \text{min}}$ – наименьшее сопротивление, измеряемое защитой, при наибольшей нагрузке нормального режима, которое вычисляют в соответствии с разделом 5;

k_3 – коэффициент запаса, который принимают от 1,1 до 1,3.

9.2.5. Для исключения ложных срабатываний при двухстороннем питании и коротком замыкании на шинах распределительного устройства или на питающей линии смежного пути ненаправленная дистанционная защита присоединения питающей линии контактной сети главных путей перегонов должна содержать пуск по току или напряжению. Уставка пуска по току выбирается по условию, А:

$$I_{\text{пуск, ННДЗ}} \geq k_3 I_{K, \text{max}}, \quad (9.15)$$

где $I_{\text{пуск, ННДЗ}}$ – значение уставки пускового органа тока, при достижении или превышении которой защита по своим свойствам становится способной выполнять заданные функции, А;

$I_{K, \text{max}}$ – наибольшее значение тока, протекающего через выключатель рассматриваемого присоединения, при коротком замыкании в заданной точке расчетной схемы в режиме максимума энергосистемы, А;

k_3 – коэффициент запаса, который принимают от 1,2 до 1,3.

9.2.6. При раздельном режиме питания путей значение тока $I_{K, \text{max}}$, используемое в (9.15), вычисляют для расчетной схемы № 3 таблицы 6.1 ($k_{\text{отс}}$ от 0,5 до 0,6) по формуле, Ом:

$$I_{K, \text{max}} = \frac{U_{\text{рас}} 10^3}{Z_{\text{пВ}} + z_{m1} \ell_{\text{АВ}}}, \quad (9.16)$$

где $U_{\text{рас}}$ – расчетное напряжение тяговой подстанции В по рисунку 6.1, перечисление а), в максимальном режиме энергосистемы по 6.2.1, кВ;

$Z_{\text{пВ}}$ – сопротивление тяговой подстанции В, которое вычисляют по формуле (6.4) в максимальном режиме, Ом;

z_{m1} – погонное сопротивление 1 км тяговой сети одного пути m -путного участка, Ом/км;

$\square_{\text{АВ}}$ – расстояние между тяговыми подстанциями А и В, км.

При узловом и параллельном режимах питания контактной сети путей, в том числе при постах секционирования без выключателей, значение тока $I_{K, \text{max}}$ вычисляют для расчетной схемы № 7 таблицы 6.1 по формуле, А:

$$I_{K, \text{max}} = \frac{U_{\text{рас}} 10^3}{Z_{\text{пВ}} + z_{m1} \ell_{\text{АП}} + z_{mn} \ell_{\text{ПВ}}}, \quad (9.17)$$

где z_{mn} – погонное сопротивление 1 км тяговой сети n электрифицированных путей m -путного участка, Ом/км;

$\square_{\text{ПВ}}$ – расстояние от поста секционирования ПС до тяговой подстанции В в соответствии с рисунком 6.1, перечисление а), км.

На однопутном участке при коротком замыкании на шинах тяговой подстанции А вместо (9.17) используют формулу, А:

$$I_{K, \text{max}} = \frac{U_{\text{рас}} 10^3}{Z_{\text{пВ}} + z_{11} \ell_{\text{АВ}}}. \quad (9.18)$$

9.2.7. Пуск по напряжению ненаправленной дистанционной защиты присоединения питающих линий контактной сети главных путей перегонов должен отвечать условию, кВ:

$$U_{\text{пуск,ННДЗ}} \geq k_{\text{ч}} \frac{U_{\text{рас}} R_{\text{д}}}{0,9 Z_{\text{п}} + R_{\text{д}}}, \quad (9.19)$$

где $U_{\text{пуск,ННДЗ}}$ – уставка пускового органа по напряжению ненаправленной дистанционной защиты, при напряжении на шинах равном или выше которого конкретное устройство защиты становится способной выполнять заданные функции, кВ;

$k_{\text{ч}}$ – коэффициент чувствительности, принимаемый равным 1,3.

Расчетное напряжение $U_{\text{рас}}$ и сопротивление тяговой подстанции $Z_{\text{п}}$ принимают по 6.2 в режиме максимума энергосистемы. Переходное сопротивление $R_{\text{д}}$ принимают равным от 0,5 до 1,0 Ом.

Значение выбранной уставки $U_{\text{пуск,ННДЗ}}$ должно отвечать условию, кВ:

$$U_{\text{пуск,ННДЗ}} \leq \frac{U_{\text{А}}}{k_{\text{з}}}, \quad (9.20)$$

где $U_{\text{А}}$ – наименьшее напряжение на шинах тяговой подстанции А при коротком замыкании для расчетной схемы № 6 таблицы 6.1, которое вычисляют по формуле (6.15), кВ;

$k_{\text{з}}$ – коэффициент запаса, который принимают равным от 1,2 до 1,3.

9.2.8. Для системы тягового электроснабжения напряжением 2×25 кВ уставку ненаправленной дистанционной защиты выбирают по условиям (9.10) и (9.14), в которых значения $Z_{\text{К}} = Z_{\text{QA,к}}$ для контактной подвески и $Z_{\text{К}} = Z_{\text{QA,ф}}$ для питающего провода вычисляют соответственно по формулам (7.27) и (7.28) для расчетных схем № 1 и № 6 по рисунку 7.4.

Значение $Z_{\text{н,мин}}$ принимают по формуле (5.12).

Уставку пуска по току выбирают по условию (9.15). В этом условии значения $I_{\text{К,мах}} = I_{\text{к,1}}$ и $I_{\text{Ф,мах}} = I_{\text{ф,1}}$ вычисляют для расчетных схем № 2 и № 7 в предположении, что расчетные точки короткого замыкания К5, К6 расположены на соответствующих шинах подстанции А, по формулам (7.10) и (7.11), в которых значение $\alpha_{\text{к,5}}$ заменяют на $\alpha_{\text{к,1}}$.

Уставку пуска по минимальному напряжению ненаправленной дистанционной защиты $U_{\text{пуск,ННДЗ}}$ соответствующих присоединений выбирают по условию (9.19), в котором в качестве сопротивления тяговой подстанции $Z_{\text{п}}$ принимают сумму значений $Z'_{\text{п}}$ и $Z''_{\text{п}}$ в соответствии с 7.2 в режиме максимума энергосистемы.

Значение выбранной уставки $U_{\text{пуск,ННДЗ}}$ для соответствующих присоединений должно отвечать условию (9.20), в котором значения $U_{\text{А}} = U_{\text{А,ф}}$ и $U_{\text{А}} = U_{\text{А,к}}$ вычисляют по формулам (7.24) и (7.25) для расчетной схемы № 6 рисунка 7.4.

9.3. Направленная дистанционная защита (первая ступень)

9.3.1. На тяговой подстанции первую ступень направленной дистанционной защиты присоединений питающих линий контактной сети главных путей перегонов используют для ускорения отключения коротких замыканий на основе графиков селективности, приведенных в А.1 приложения А.

Уставку первой ступени присоединения выключателя QA1 (рисунок 6.1) для расчетных схем № 1 и № 5 таблицы 6.1 выбирают по условию, Ом:

$$Z_{y,ДЗ1} \leq K_{отс} Z_K, \quad (9.21)$$

где $Z_{y,ДЗ1}$ – уставка первой ступени направленной дистанционной защиты по характеристической величине – сопротивлению, Ом;

Z_K – значение характеристической величины – сопротивления, измеряемого защитой присоединения при коротком замыкании в заданной точке расчетной схемы питания в режиме максимума энергосистемы, вычисляемое в соответствии с 6.6.4, Ом;

$K_{отс}$ – коэффициент отстройки, значение которого принимают от 0,85 до 0,9.

9.3.2. Значение характеристической величины – сопротивления Z_K системы тягового электроснабжения 25 кВ при раздельном режиме питания путей для расчетной схемы № 1 таблицы 6.1 вычисляют по формуле, Ом:

$$Z_K = z_{m1} \square_{AB}. \quad (9.22)$$

При узловом и параллельном питании путей для той же системы для расчетной схемы № 5 таблицы 6.1 эту величину вычисляют по формуле, Ом:

$$Z_K = z_{m1} \square_{АП}. \quad (9.23)$$

При постах секционирования без выключателей значение Z_K выбирают по условию, Ом:

$$Z_K = n_1 z_{mn} \square_{AB}. \quad (9.24)$$

9.3.3. Выбранную по (9.21) уставку проверяют на нечувствительность к максимальным нагрузкам нормального режима по условию

$$Z_{y,ДЗ1} \leq \frac{Z_{н,мин}}{K_3}, \quad (9.25)$$

где $Z_{y,ДЗ1}$ – значение уставки, выбранное по условию (9.21), Ом;

$Z_{н,мин}$ – характеристическая величина – сопротивление, измеряемое защитой присоединения при максимальных нагрузках нормального режима, которое вычисляют для системы напряжением 25 кВ по формулам соответственно (5.9) и (5.12), Ом;

K_3 – коэффициент запаса, значение которого принимают от 1,1 до 1,3.

9.3.4 Угловая характеристика на комплексной плоскости сопротивлений для первой ступени направленной дистанционной защиты должна иметь форму сектора 1 ст ДЗ, приведенную на рисунке А.3 приложения А. Радиус сектора устанавливают равным $Z_{y,ДЗ1}$, правый радиус совпадает с осью активных сопротивлений R ($\varphi = 0$), а левый радиус устанавливают под углом от 110 до 120 градусов по отношению к этой оси.

Если условие (9.25) не выполняется, то допускается правый радиус сектора 1 ст ДЗ установить под углом φ от 50 до 55 градусов по отношению к оси активных сопротивлений R . В этом случае проверка условия (9.25) не производится.

9.3.5 Для системы тягового электроснабжения напряжением 2×25 кВ уставку направленной дистанционной защиты (первая ступень) выбирают по условию (9.21), (9.25) и 9.3.4.

В условии (9.21) значение Z_K принимают для присоединений питающих линий контактной подвески $Z_K = Z_{QA,к}$ и для питающего провода $Z_K = Z_{QA,ф}$ вычисляют соответственно по формулам (7.27) и (7.28) для расчетной схемы № 1 или № 6 по рисунку 7.4.

В условии (9.25) значение $Z_{н,мин}$ для тех же присоединений $Z_{кн,мин}$ и $Z_{фн,мин}$

вычисляют по (5.12), (5.13) и (5.14).

9.4. Направленная дистанционная защита (вторая ступень)

9.4.1. Вторая ступень направленной дистанционной защиты присоединения питающих линий контактной сети главных путей перегонов является основной для защищаемой зоны.

Уставку второй ступени для присоединения выключателя $QA1$ (рисунок 6.1) выбирают по условию, Ом:

$$Z_{y,ДЗ2} \geq k_{\text{ч}} Z_K, \quad (9.26)$$

где $Z_{y,ДЗ2}$ – уставка второй ступени направленной дистанционной защиты по характеристической величине – сопротивлению, Ом;

Z_K – значение характеристической величины – сопротивления, измеряемого защитой присоединения при коротком замыкании в заданной точке расчетной схемы питания в режиме минимума энергосистемы, Ом;

$k_{\text{ч}}$ – коэффициент чувствительности, значение которого принимают не менее 1,25.

9.4.2. В качестве расчетной схемы при вычислении Z_K для второй ступени защиты тягового электроснабжения напряжением 25 кВ принимают по таблице 6.1 для присоединений питающих линий контактной сети главных путей перегонов:

- при раздельном режиме питания путей – схему № 2;
- при узловом и параллельном режимах питания путей – схему № 6.

9.4.3 Значение характеристической величины – сопротивления Z_K для второй ступени при раздельном режиме питания путей для расчетной схемы № 2 таблицы 6.1 и в соответствии с таблицей 6.4, а также для узловой схемы с постом секционирования без выключателей вычисляют по формуле, Ом:

$$Z_K = n z_{mn} \square_{AB}, \quad (9.27)$$

где z_{mn} – погонное сопротивление 1 км n электрифицированных путей m -путного участка, Ом/км;

\square_{AB} – расстояние между тяговыми подстанциями А и В в соответствии с рисунком 6.1, перечисление а), км.

При узловом и параллельном режимах питания путей для расчетной схемы № 6 таблицы 6.1 в соответствии с таблицей 6.4 используют формулу, Ом:

$$Z_K = n_1 z_{mn} \square_{АП}, \quad (9.28)$$

где $\square_{АП}$ – расстояние от тяговой подстанции А до поста секционирования ПС в соответствии с рисунком 6.1, перечисление а), км;

n_1 – число электрифицированных путей на участке $\square_{АП}$.

9.4.4. Для выбора формы угловой характеристики защиты проверяют соблюдение условия, Ом:

$$k_{\text{ч}} Z_K \leq \frac{Z_{H,\min}}{K_3 K_B}, \quad (9.29)$$

где k_B – коэффициент возврата, значение которого принимают от 1,1 до 1,25.

Если условие (9.29) соблюдается, то допускается использовать форму угловой характеристики второй ступени в виде сектора 1 ст ДЗ по 9.3.4. Если условие (9.29) не соблюдается, то угловая характеристика на комплексной плоскости сопротивлений для второй ступени направленной дистанционной защиты должна иметь форму

сектора 2 ст ДЗ, показанную на рисунке А.3 приложения А. Радиус сектора устанавливают равным $Z_{y,ДЗ2}$, правый радиус устанавливают под углом φ от 50 до 53 градусов. Левый радиус устанавливают под углом от 110 до 120 градусов по отношению к оси активных сопротивлений R .

9.4.5. Для системы тягового электроснабжения напряжением 2×25 кВ уставку направленной дистанционной защиты (вторая ступень) выбирают по условию (9.26) и 9.4.4.

В условии (9.26) значение характеристической величины – сопротивления Z_K вычисляют: для присоединений питающих линий контактной подвески $Z_K = Z_{QA,к}$ и питающего провода $Z_K = Z_{QA,ф}$ вычисляют соответственно по формулам (7.27) и (7.28) для расчетных схем № 1 и № 6 по рисунку 7.4.

Для вычисления значений $Z_{н,мин}$ используют формулы (5.12), (5.13) и (5.14).

9.5. Направленная дистанционная защита (третья ступень)

9.5.1. Третья ступень направленной дистанционной защиты присоединения питающих линий контактной сети главных путей перегонов обеспечивает ближнее и дальнее резервирование в межподстанционной зоне.

Уставку третьей ступени для дальнего резервирования выбирают по условию, Ом:

$$Z_{y,ДЗ3} \geq k_ч Z_K, \quad (9.30)$$

где $Z_{y,ДЗ3}$ – уставка третьей ступени направленной дистанционной защиты по характеристической величине – сопротивлению, Ом;

Z_K – значение характеристической величины – сопротивления, измеряемого защитой присоединения при коротком замыкании через переходное сопротивление дуги $R_{пер}$ от 5 до 8 Ом в заданной точке расчетной схемы питания в режиме минимума энергосистемы, Ом;

$k_ч$ – коэффициент чувствительности, значение которого принимают при выборе уставки третьей ступени защиты не менее 1,2.

9.5.2. Уставку третьей ступени, выбранную по условию (9.30), необходимо проверить на обеспечение чувствительности к коротким замыканиям в зоне ближнего резервирования основной защиты с коэффициентом чувствительности 1,5.

9.5.3. В качестве расчетных схем таблицы 6.1 при выбора уставок третьей ступени по условиям дальнего резервирования в системе напряжением 25 кВ принимают для присоединений питающих линий контактной сети главных путей перегонов:

- при раздельном питании путей – расчетную схему № 2;
- при постах секционирования без выключателей – расчетную схему № 8;
- при узлом и параллельном питании путей – расчетную схему № 9.

9.5.4. В качестве расчетных схем для проверки выбора уставки на чувствительность к коротким замыканиям в зоне ближнего резервирования основной защиты принимают схемы по 9.4.2.

9.5.5. Для выбора уставки третьей ступени в системе напряжением 25 кВ значение характеристической величины – сопротивления Z_K – при раздельном режиме питания путей для расчетной схемы № 2 таблицы 6.1, а также при узлом питании с постом секционирования без выключателей для расчетной схемы № 8, вычисляют по формулам, Ом:

$$Z_K = n(z_{mn} \ell_{AB} + R_d \frac{Z_A + Z_B}{Z_B}), \quad (9.31)$$

$$Z_A = Z_{пА} + z_{mn} \ell_{AB}, \quad (9.32)$$

$$Z_B = Z_{пВ}. \quad (9.33)$$

При узловом и параллельном режимах питания путей для расчетной схемы № 9 таблицы 6.1 значение характеристической величины – сопротивления Z_K вычисляют по формуле, Ом:

$$Z_K = n_1 [z_{mn} \ell_{АП} + (z'_{p,m} + z_{-1,n} \frac{Z_A + Z_B}{Z_B}) \ell_{пВ} + R_d \frac{Z_A + Z_B}{Z_B}], \quad (9.34)$$

где Z_A, Z_B – эквивалентные индуктивно развязанные сопротивления схемы замещения тяговой сети, вычисляемые по 6.1 и таблице 6.1, Ом;

$z_{mn}, z'_{p,m}, z_{-1,n}$ – погонные сопротивления 1 км тяговой сети, Ом/км;

R_d – сопротивление дуги в месте короткого замыкания, принимаемое в соответствии с 6.3.2 для третьей ступени защиты от 5 до 8 Ом;

$\ell_{АП}, \ell_{пВ}$ – расстояния от поста секционирования ПС до тяговых подстанций соответственно А и В, км;

n_1 – число электрифицированных путей на участке $\ell_{АП}$.

9.5.6. Выбранную по (9.30) уставку третьей ступени проверяют на обеспечение чувствительности к коротким замыканиям в зоне ближнего резервирования основной защиты по условию:

$$K_{ч} = \frac{Z_{у,ДЗЗ}}{Z_K}, \quad (9.35)$$

где $Z_{у,ДЗЗ}$ – выбранная по (9.30) уставка, Ом;

Z_K – значение характеристической величины – сопротивления, измеряемого защитой присоединения питающих линий при коротком замыкании в заданной точке расчетной схемы питания в соответствии с 9.4.2 и вычисляемое по формулам, приведенным в 9.4.3, Ом.

Защиту признают чувствительной, если коэффициент чувствительности $k_{ч}$, вычисленный по формуле (9.35), имеет значение не менее 1,5.

9.5.7. Угловая характеристика на комплексной плоскости сопротивлений для третьей ступени направленной дистанционной защиты должна иметь форму сектора 3 ст ДЗ, показанную на рисунке А.3 приложения А. Радиус сектора устанавливают равным $Z_{у,ДЗЗ}$, правый радиус устанавливают под углом φ от 45 до 53 градусов, а левый радиус – под углом от 110 до 120 градусов по отношению к оси активных сопротивлений R .

9.5.8. Проверку возможности отказа третьей ступени при коротком замыкании через переходное сопротивление осуществляют в следующей последовательности:

- на основании 9.5.5 выбирают по таблице 6.1 расчетную схему питания;

- для конкретной расчетной схемы по таблице 6.1 вычисляют значение $\underline{Z}_K = \underline{Z}_{QV}$ в комплексной форме и устанавливают его активную $R_K = R_{QV}$ и реактивную $X_K = X_{QV}$ составляющие.

Находят значение фазового угла φ_K вектора короткого замыкания $\underline{Z}_K = \underline{Z}_{QV}$, по формуле:

$$\varphi_K = \arctg \frac{X_{QV}}{R_{QV}} = \arctg \frac{X_K}{R_K}. \quad (9.36)$$

Отказ защиты возможен, если фазовый угол φ_K будет равен или меньше угла φ угловой характеристики третьей ступени направленной дистанционной защиты по рисунку А.3 приложения А.

9.5.9. Для системы тягового электроснабжения 2×25 кВ уставку направленной дистанционной защиты (третья ступень) выбирают по условиям (9.30), (9.35) и 9.5.8.

В условии (9.30) значение Z_K для присоединений питающих линий контактной подвески $Z_K = Z_{QV,кп}$ и питающего провода $Z_K = Z_{QV,ф}$ вычисляют соответственно по формулам (7.27) и (7.28) для расчетных схем № 3 и № 8 по рисунку 7.4.

В условии (9.35) значение Z_K для тех же присоединений вычисляют по формулам (7.27) и (7.28) для расчетных схем № 1 и № 6 по рисунку 7.4.

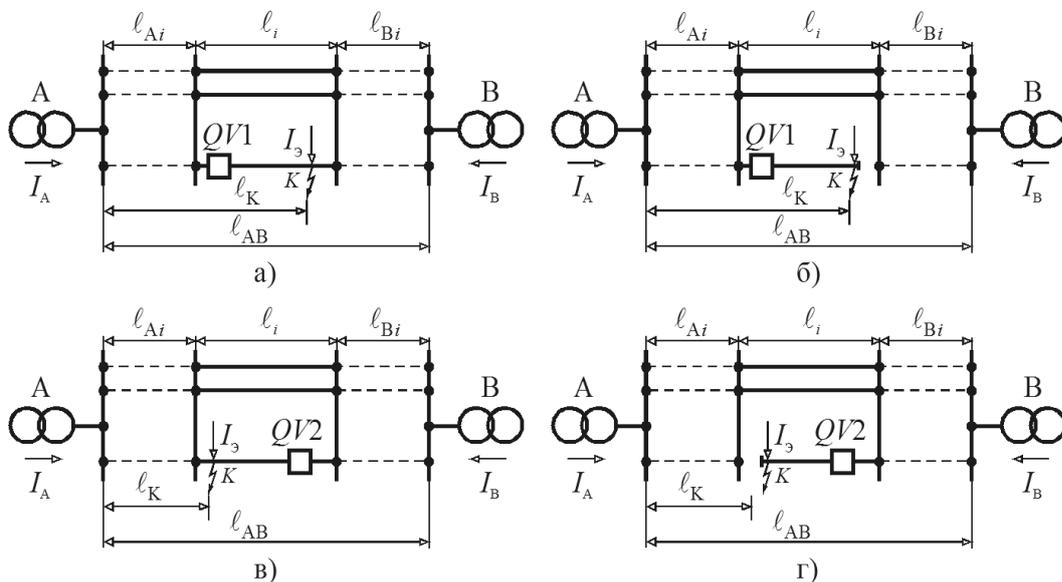
9.6. Направленная дистанционная защита (четвертая ступень)

9.6.1. Четвертая ступень направленной дистанционной защиты присоединения питающих линий контактной сети главных путей перегонов обеспечивает защиту от коротких замыканий через большое переходное сопротивление (свыше значений, указанных в 6.3.2), например, при нарушении изоляции разземлившейся опоры.

9.6.2. Для четвертой ступени направленной дистанционной защиты запрещается применение пуска, уставка которого зависит от соотношения коэффициентов гармоник токов нагрузки и короткого замыкания.

9.6.3. Уставку защиты по осям активных и индуктивных сопротивлений выбирают по условиям чувствительности к коротким замыканиям в любой точке защищаемой зоны l_i . Расчетную точку короткого замыкания K для каждого из выключателей принимают в противоположном конце защищаемой зоны, как показано на рисунке 9.1, перечисления а) и в), для обеспечения селективного отключения обоих выключателей на концах защищаемой зоны независимо один от другого.

9.6.4 Расчетные схемы для выбора уставок, приведенные на рисунке 9.1, используют как при одном, так и при двух постах секционирования в межподстанционной зоне. Показан только тот выключатель, для которого рассчитывают уставку.



а), в) – схемы селективного действия, в которых выключатели по концам защищаемой зоны \square_i включены и при коротком замыкании защиты их присоединений срабатывают одновременно;

б), г) – схемы каскадного действия, в которых при коротком замыкании защита присоединения выключателя на одном конце защищаемой зоны \square_i срабатывает только после отключения выключателя на противоположном конце этой зоны.

На рисунке показан только тот выключатель, для которого рассчитывают уставку.

Рисунок 9.1 – Расчетные для схемы определения уставок защиты ДЗ4

При одном или двух постах секционирования если выключатель $QV1$ находится в распределительном устройстве тяговой подстанции А, то принимают $\square_{Ai} = 0$.

При одном poste секционирования в межподстанционной зоне если выключатель $QV1$ находится в распределительном устройстве этого поста, то принимают $\square_{Bi} = 0$.

При одном или двух постах секционирования если выключатель $QV2$ находится в распределительном устройстве тяговой подстанции В, то принимают $\square_{Bi} = 0$.

При одном poste секционирования в межподстанционной зоне если выключатель $QV2$ находится в распределительном устройстве этого поста, то принимают $\square_{Ai} = 0$.

9.6.5. В том случае, если выбранные уставки не могут обеспечить чувствительность к коротким замыканиям во всей защищаемой зоне, допускается отключение выключателей, когда выключатель на одном конце защищаемой зоны отключается только после отключения выключателя на другом конце этой зоны. Каскадное отключение может быть допущено только при условии обеспечения чувствительности к коротким замыканиям четвертой ступени защиты на каждом из указанных концов не менее, чем на половине защищаемой зоны l_i .

9.6.6. Выбор уставок четвертой ступени направленной дистанционной защиты для обеспечения селективного отключения выключателя на конце защищаемой зоны осуществляют в комплексной форме в следующем порядке:

а) задаются наибольшим значением переходного сопротивления $R_{пер}$ (например, 50 Ом);

б) определяют динамическое сопротивление электровоза Z_3 поезда, который может оказаться в этой же точке пути, где произошло короткое замыкание, Ом:

$$\underline{Z}_3 = \frac{U_3^2 \eta k_M}{P_3 \cdot 10^{-3}} e^{j\varphi_3}, \quad (9.37)$$

где U_3 – номинальное напряжение электровоза, принимаемое равным 25 кВ;

P_3 – мощность продолжительного режима электровоза, кВт;

φ_3 – фазовый угол основной гармоники тока электровоза, принимаемый для режима тяги от 30 до 32 градусов, и для режима рекуперации от 126 до 134 градусов;

η , k_M – коэффициенты полезного действия и мощности электровоза, принимаемые как в 5.5.3;

в) по формулам, приведенным в таблице 9.1 вычисляют для длины зоны защиты \square_i результирующие сопротивления \underline{Z}_A и \underline{Z}_B расчетной схемы, приведенной на рисунке 9.1, перечисление а) или в), и значения коэффициентов \underline{D}_A и \underline{D}_B , учитывающих распределение тока короткого замыкания между смежными

подстанциями, по формулам:

$$\underline{D} = \underline{D}_A = 1 + \frac{\underline{Z}_A}{\underline{Z}_B}, \quad (9.38)$$

$$\underline{D} = \underline{D}_B = 1 + \frac{\underline{Z}_B}{\underline{Z}_A}; \quad (9.39)$$

г) вычисляют комплексное значение характеристической величины – сопротивления Z_{QV} , его активной R_{QV} и X_{QV} индуктивной составляющих, измеряемых четвертой ступенью направленной дистанционной защиты выключателя $QV1$ или $QV2$ при коротком замыкании в точке K в соответствии с рисунком 9.1, перечисление а) или в), по формуле, Ом:

$$\underline{Z}_{QV} = R_{QV} + jX_{QV} = n_i \left(\underline{z}_{mn} \ell_i + \frac{R_{пер} \underline{Z}_\Delta}{R_{пер} + \underline{Z}_\Delta} \underline{D} \right), \quad (9.40)$$

в которой значение \underline{D} :

- для защиты выключателя $QV1$ по рисунку 9.1, перечисление а), – принимают $\underline{D} = \underline{D}_A$;

- для защиты выключателя $QV2$ по рисунку 9.1, перечисление в), – принимают $\underline{D} = \underline{D}_B$;

Таблица 9.1 – Результирующие сопротивления схем замещения на рисунке 9.4

Длина зоны защиты	Шифр рисунка 9.1	Формулы для вычисления результирующих сопротивлений, Ом	
		\underline{Z}_A	\underline{Z}_B
ℓ_i	а)	$\underline{Z}_{\Pi A} + \underline{z}_{mn} \ell_{Ai} + \underline{z}_{mn} \ell_i$	$\underline{Z}_{\Pi B} + \underline{z}_{mn} \ell_{Bi}$
	б)	$\underline{Z}_{\Pi A} + \underline{z}_{mn} \ell_{Ai} + \underline{z}'_{p,m} \ell_i$	$\underline{Z}_{\Pi B} + \underline{z}_{mn} \ell_{Bi} + \frac{\underline{z}_{-1,n}}{n_i - 1} \ell_i$
	в)	$\underline{Z}_{\Pi A} + \underline{z}_{mn} \ell_{Ai}$	$\underline{Z}_{\Pi B} + \underline{z}_{mn} \ell_{Bi} + \underline{z}_{mn} \ell_i$
	г)	$\underline{Z}_{\Pi A} + \underline{z}_{mn} \ell_{Ai} + \frac{\underline{z}_{-1,n}}{n_i - 1} \ell_i$	$\underline{Z}_{\Pi B} + \underline{z}_{mn} \ell_{Bi} + \underline{z}'_{p,m} \ell_i$
$\frac{\ell_i}{2}$	а); в)	$\underline{Z}_{\Pi A} + \underline{z}_{mn} \ell_{Ai} + \underline{z}_{mn} \frac{\ell_i}{2}$	$\underline{Z}_{\Pi B} + \underline{z}_{mn} \ell_{Bi} + \underline{z}_{mn} \frac{\ell_i}{2}$
	б)	$\underline{Z}_{\Pi A} + \underline{z}_{mn} \ell_{Ai} + \underline{z}'_{p,m} \frac{\ell_i}{2}$	$\underline{Z}_{\Pi B} + \underline{z}_{mn} \ell_{Bi} + \left(\frac{\underline{z}_{-1,n}}{n_i - 1} + \underline{z}'_{p,m} + \underline{z}_{m,n-1} \right) \frac{\ell_i}{2}$
$\frac{\ell_i}{2}$	г)	$\underline{Z}_{\Pi A} + \underline{z}_{mn} \ell_{Ai} + \left(\frac{\underline{z}_{-1,n}}{n_i - 1} + \underline{z}'_{p,m} + \underline{z}_{m,n-1} \right) \frac{\ell_i}{2}$	$\underline{Z}_{\Pi B} + \underline{z}_{mn} \ell_{Bi} + \underline{z}'_{p,m} \frac{\ell_i}{2}$

Примечание – $Z_{пА}, Z_{пВ}$ – сопротивления тяговых подстанций А и В, вычисляемые по формуле (6.4), Ом; $z_{mn}, z_{m,n-1}$ – удельное сопротивление тяговой сети m -путного участка при параллельном соединении контактных сетей на n и $n-1$ путях, Ом/км; $z_{-1,n}$ – погонное индуктивно развязанное сопротивление контактной сети одного пути многопутного участка, Ом/км; $z'_{p,m}$ – индуктивно развязанное сопротивление рельсовой цепи m -путного участка с учетом взаимного индуктивного влияния контактных сетей разных путей, Ом/км; n_i – число путей с включенной в работу контактной сетью на расчетном участке ℓ_i . Значения удельных сопротивлений тяговой сети вычисляют в соответствии с приложением Б.

д) выбирают уставку четвертой ступени направленной дистанционной защиты $X_{у,ДЗ4}$ по оси реактивных сопротивлений jX , обеспечивающую чувствительность к коротким замыканиям во всей защищаемой зоне \square_i , по условию, Ом:

$$X_{у,ДЗ4} \geq X_{QV} k_ч, \quad (9.41)$$

где X_{QV} – индуктивная составляющая характеристической величины – сопротивления, измеряемого защитой выключателя $QV1$ или $QV2$, которую определяют по формуле (9.40), Ом;

$k_ч$ – коэффициент чувствительности, значение которого принимают:

- на участках, на которых опоры нормально присоединены к рельсам – не менее 1,2;
- на участках, на которых опоры нормально к рельсам не присоединены (разземленные опоры) – не менее 1,5.

е) выбранную по (9.41) уставку $X_{у,ДЗ4}$ проверяют на отстроенность от режимов нормальной работы по условию, Ом:

$$X_{у,ДЗ4} \leq \frac{U_{н,мин} \sin \varphi_н}{k_з I_{н,макс} \cdot 10^{-3}}, \quad (9.42)$$

где $U_{н,мин}$ – напряжение контактной сети в минимальном режиме энергосистемы, значение которого принимают 25 кВ;

$I_{н,макс}$ – наибольший ток присоединения в нормальном режиме, определяемый по формуле (5.9), А;

$\varphi_н$ – фазовый угол нагрузки, значение которого принимают от 30 до 32 градусов;

$k_з$ – коэффициент запаса, значение которого принимают от 1,15 до 1,25;

ж) выбирают уставку четвертой ступени направленной дистанционной защиты $R_{у,ДЗ4}$ по оси активных сопротивлений R , обеспечивающую необходимую чувствительность к коротким замыканиям, по формуле, Ом:

$$R_{у,ДЗ4} \geq R_{QV} k_ч; \quad (9.43)$$

з) выбранное по формуле (9.41) значение $R_{у,ДЗ4}$ проверяют на выполнение требования соотношения между значениями $R_{у,ДЗ4}$ и X_{QV} , при которых угловая характеристика защиты на комплексной плоскости сопротивлений не заходит в область нормальных нагрузок, определяемых формулами:

$$R_{у,ДЗ4} \leq a X_{QV}, \quad (9.44)$$

$$a = 4,7 + \operatorname{tg}(\alpha_C - 90^\circ), \quad (9.45)$$

где α_C – внутренний угол угловой характеристики в точке C для четвертой ступени направленной дистанционной защиты 4 ст ДЗ (см. рисунок А.3 приложения А), который принимают от 90 до 142 градусов;

и) выбранное по формуле (9.41) значение $R_{у,ДЗ4}$ проверяют также на

выполнение требования отстройки от токов с фазовыми углами менее 15 градусов, к которым относятся уравнильные токи $I_{ур,маx}$ (от 150 до 220 А) и токи нагрузки $I_{н,маx}$ некоторых типов электроподвижного состава, по условию, Ом:

$$R_{у,ДЗ4} \leq \frac{U_{н,мин} 10^3}{K_3 I_{ф,маx}}, \quad (9.46)$$

где $I_{ф,маx}$ – наибольшее из значений $I_{ур,маx}$ и $I_{н,маx}$, А;

к) по формуле, приведенной в таблице 9.2 для защищаемой зоны \square_i ; по рисунку 9.1, перечисления а) и в), вычисляют наибольшее значение переходного сопротивления $R_{пер}$, допустимое при выбранных уставках;

л) если это значение больше того, которым задавались в 9.6.6, перечисление а), то выбор уставок считается законченным и удовлетворяющим условиям чувствительности.

Таблица 9.2 – Наибольшее расчетное значение переходного сопротивления

Длина зоны защиты	Шифр рисунка 9.1	Формулы для определения наибольшего значения $R_{пер}$ по условиям устойчивости функционирования
ℓ_i	а), в)	$R_{пер} \leq \frac{1}{D} \left(\frac{R_{у,ДЗ4}}{K_ч n} - r_{mn} \ell_i \right)$
	б), з)	$R_{пер} \leq \frac{R_{у,ДЗ4}}{K_ч} - r_{m1} \ell_i$
$\frac{\ell_i}{2}$	а), в)	$R_{пер} \leq \frac{D+2}{4D} \left(\frac{R_{у,ДЗ4}}{K_ч} - r_{m1} \frac{\ell_i}{2} \right)$
	б), з)	$R_{пер} \leq \frac{R_{у,ДЗ4}}{K_ч} - r_{m1} \frac{\ell_i}{2}$
Примечание – Для шифра а) рисунка принимают $D = D_A$, для шифра в) рисунка принимают $D = D_B$, вычисляемые по формулам (9.38), (9.39) и таблице 9.1		

Если значение переходного сопротивления $R_{пер}$, вычисленное по формулам таблицы 9.2, оказалось меньше того, которым задавались в 9.6.6, перечисление а), то задаются другим (меньшим) значением $R_{пер}$ и выполняют расчет заново или определяют возможность использования каскадного отключения повреждения.

9.6.7. Выбор уставок четвертой ступени направленной дистанционной защиты для обеспечения каскадного отключения выключателей на обоих концах защищаемой зоны должен состоять из двух этапов:

а) выбор уставок, обеспечивающих требуемую чувствительность к повреждениям на контактной сети во всей защищаемой зоне при отключении одного из выключателей;

б) проверку выбранных уставок на чувствительность к повреждениям на контактной сети по крайней мере на половине защищаемой зоны, когда ни один из выключателей еще не отключился.

9.6.8. Расчеты по выбору уставок четвертой ступени направленной дистанционной защиты по 9.6.7, перечисление а), обеспечивающие требуемую

чувствительность к повреждениям на контактной сети во всей защищаемой зоне \square_i при одном отключенном выключателе, осуществляют в комплексной форме в следующем порядке:

а) задаются наибольшим значением переходного сопротивления $R_{\text{пер}}$ или принимают его в соответствии с выбранным по 9.6.6;

б) определяют динамическое сопротивление электровоза поезда, который может оказаться в той же точке пути, где произошло короткое замыкание, по формуле (9.37), или принимают его в соответствии с выбранным в 9.6.6;

в) вычисляют для длины защищаемой зоны \square_i значения токов I_A, I_B , тяговых подстанций А и В при коротком замыкании в точке К по рисунку 9.1, перечисления б) и г), и находят значения коэффициентов \underline{D}_A и \underline{D}_B по формулам (9.38) и (9.39);

г) определяют комплексное значение характеристической величины – сопротивления Z_{QV} , его активной R_{QV} и индуктивной X_{QV} составляющих, измеряемых четвертой ступенью направленной дистанционной защиты выключателя QV1 или QV2 при коротком замыкании в точке К в соответствии с рисунком 9.1, перечисления б) или г), по формуле, Ом:

$$\underline{Z}_{QV} = R_{QV} + jX_{QV} \approx z_{m1} \ell_i + \frac{R_{\text{пер}} \underline{Z}_\varepsilon}{R_{\text{пер}} + \underline{Z}_\varepsilon}. \quad (9.47)$$

9.6.9. Выбор уставок четвертой ступени направленной дистанционной защиты, обеспечивающий требуемую чувствительность к коротким замыканиям во всей защищаемой зоне \square_i , выполняют в следующем порядке:

а) выбирают уставку $X_{y,д34}$ по оси реактивных сопротивлений jX , по условию (9.41);

б) выбранную по (9.41) уставку $X_{y,д34}$ проверяют на отстроенность от режимов нормальной работы по условию (9.42);

в) выбирают уставку четвертой ступени направленной дистанционной защиты $R_{y,д34}$ по оси активных сопротивлений R , обеспечивающую требуемую чувствительность к коротким замыканиям в защищаемой зоне \square_i , по условию (9.43);

г) выбранную по (9.43) уставку $R_{y,д34}$ проверяют на выполнение требований 9.6.6 по формулам (9.44), (9.45) и (9.46);

д) по формулам, приведенным в таблице 9.2, соответствующим длине защищаемой зоны \square_i и расчетным схемам, показанным на рисунке 9.1, перечисления б) и г), вычисляют наибольшее значение $R_{\text{пер}}$, допустимое по выбранным условиям;

е) если вычисленное наибольшее допустимое значение $R_{\text{пер}}$ меньше того, которым задавались в 9.6.8, перечисление а), то выбранные уставки не обеспечивают чувствительность к коротким замыканиям по всей длине защищаемой зоны \square_i . В этом случае задаются другим (меньшим) значением $R_{\text{пер}}$ и выполняют расчет заново.

Если вычисленное наибольшее значение $R_{\text{пер}}$ больше того, которым задавались выше, то выбранные уставки обеспечивают требуемую чувствительность к коротким замыканиям по всей длине защищаемой зоны \square_i при каскадном отключении выключателя.

9.6.10. Для заключения о применимости каскадного отключения при выбранных уставках выполняют проверку по 9.6.7, перечисление б). Расчеты по проверке выбранных в 9.6.8 и 9.6.9 уставок согласно 9.6.7, перечисление б), на чувствительность к повреждениям на контактной сети по крайней мере на половине защищаемой зоны, когда ни один из выключателей еще не отключился,

осуществляют в комплексной форме в следующем порядке:

а) по формулам, приведенным в таблице 9.1, вычисляют значения результирующих сопротивлений Z_A и Z_B для длины защищаемой зоны $\square_i/2$ при значениях $R_{пер}$ и $Z_э$, принятых в 9.6.8, перечисления а) и б);

б) по формулам (9.38), (9.39) определяют значения \underline{D}_A или \underline{D}_B , учитывающих распределение тока короткого замыкания между смежными тяговыми подстанциями.

Определяют комплексное значение характеристической величины – сопротивления \underline{Z}_{QV} , его активной R_{QV} и индуктивной X_{QV} составляющих, измеряемых четвертой ступенью направленной дистанционной защиты выключателя QV1 или QV2 при коротком замыкании в точке $\square_i/2$, по формуле, Ом:

$$\underline{Z}_{QV} = R_{QV} + jX_{QV} \approx z_{m1} \frac{\ell_i}{2} + \frac{R_{пер} Z_э}{R_{пер} + Z_э} \cdot \frac{4D}{D+2}, \quad (9.48)$$

в которой принимают значение \underline{D} :

- для защиты выключателя QV1 по рисунку 9.1, перечисление а), – принимают $\underline{D} = \underline{D}_A$;

- для защиты выключателя QV2 по рисунку 9.1, перечисление в), – принимают $\underline{D} = \underline{D}_B$.

9.6.11 Проверку на чувствительность к коротким замыканиям в зоне $\square_i/2$ выполняют в следующем порядке:

а) выбранную в 9.6.9, перечисление а), уставку $X_{у,ДЗ4}$ проверяют на чувствительность к коротким замыканиям в зоне $\square_i/2$ по формуле (9.41), в которой X_{QV} принимают как вычисленное по формуле (9.48);

б) выбранную в 9.6.9, перечисление в), уставку $R_{у,ДЗ4}$ проверяют на чувствительность к коротким замыканиям в защищаемой зоне $\square_i/2$ по формуле (9.43), в которой R_{QV} принимают как вычисленное по формуле (9.48);

в) каскадное действие выключателей при наибольшем допустимом сопротивлении $R_{пер}$, выбранном в 9.6.8, перечисление а), и выбранных в 9.6.9, перечисления а) и в), уставках, считают допустимым, если выполняются одновременно условия, указанные в 9.6.11, перечисления а) и б).

9.7. Резервная токовая защита (три ступени)

9.7.1. Уставку $I_{у,РТЗ-1}$ первой ступени резервной токовой защиты принимают равной уставке токовой отсечки, выбранной по 9.1.

9.7.2. Уставку второй и третьей ступеней резервной токовой защиты выбирают как для максимальной токовой защиты по формуле, А:

$$I_{у,РТЗ-2} = I_{у,РТЗ-3} \geq \frac{I_{н,мак}}{K_3 K_B}, \quad (9.49)$$

где $I_{у,РТЗ-2}$, $I_{у,РТЗ-3}$ – уставки соответственно второй и третьей ступеней резервной токовой защиты, А;

$I_{н,мак}$ – максимальный ток в нормальном режиме работы, определяемый по 5.6;

K_3 – коэффициент запаса, который принимают от 1,1 до 1,3;

K_B – коэффициент возврата, который принимают от 1,1 до 1,25.

9.7.3. Если наименьшее значение тока короткого замыкания $I_{K,min}$ в расчетной схеме при минимальном режиме энергосистемы больше максимального тока нормального режима $I_{н,мак}$, то выбранное по формуле (9.49) значение уставки проверяют на выполнение условия, А:

$$I_{y,PT3-2} = I_{y,PT3-3} \leq \frac{I_{K,\min}}{K_{\text{ч}}}, \quad (9.50)$$

где $K_{\text{ч}}$ – коэффициент чувствительности, который принимают равным не менее 1,3.

9.7.4. Значение $I_{K,\min}$ для присоединений питающих линий контактной сети главных путей перегонов системы напряжением 25 кВ при раздельном режиме питания путей для расчетной схемы № 2 таблицы 6.1 вычисляют по формуле, А:

$$I_{K,\min} = \frac{U_{\text{рас}} 10^3}{n(Z_{\text{ПА}} + z_{\text{mn}} \ell_{\text{AB}})}, \quad (9.51)$$

где $U_{\text{рас}}$ – расчетное напряжение на шинах тяговой подстанции в минимальном режиме энергосистемы по 6.1, кВ;

$Z_{\text{ПА}}$ – сопротивление тяговой подстанции в том же режиме по 6.2, Ом;

n – число электрифицированных путей;

\square_{AB} – расстояние между тяговыми подстанциями А и В по рисунку 6.1, перечисление а).

При узловом и параллельном режимах питания путей для расчетной схемы № 6 таблицы 6.1 используют формулу, А:

$$I_{K,\min} = \frac{U_{\text{рас}} 10^3}{n_1(Z_{\text{ПА}} + z_{\text{mn}} \ell_{\text{АП}})}, \quad (9.52)$$

где $\square_{\text{АП}}$ – расстояние между тяговой подстанцией А и постом секционирования ПС по рисунку 6.1, перечисление а);

n_1 – число включенных в работу электрифицированных путей на участке $\square_{\text{АП}}$.

9.7.5. Если условие (9.50) не выполняется, то это означает, что вторая и третья ступени не могут полностью выполнять роль резервных, поскольку чувствительны к коротким замыканиям не во всей защищаемой зоне, а только на некоторой ее части.

9.7.6. Для системы тягового электроснабжения 2×25 кВ уставку первой ступени резервной токовой защиты выбирают по формуле (9.1) с учетом 9.1.8.

Уставки второй и третьей ступеней выбирают по формуле (9.49), в которой значение $I_{\text{н,макс}}$ для присоединений питающих линий контактной подвески и питающего провода определяют по формулам (5.13) и (5.14).

Проверку выбранных уставок на чувствительность к коротким замыканиям выполняют по условию (9.50) с учетом 9.7.5, в котором значение $I_{K,\min}$ в минимальном режиме энергосистемы для присоединений указанных защит вычисляют по формулам (7.8), (7.9) для расчетных схем № 1 и № 6 рисунка 7.4.

9.8. Защита минимального напряжения

9.8.1. Уставку защиты минимального напряжения выбирают по условию:

$$U_{y,3\text{МН}} \geq K_{\text{ч}} U_{K,\text{макс}}, \quad (9.53)$$

где $U_{y,3\text{МН}}$ – уставка защиты минимального напряжения, кВ;

$U_{K,\text{макс}}$ – наибольшее значение напряжения в месте установки защиты при коротком замыкании в расчетной точке, кВ;

$K_{\text{ч}}$ – коэффициент чувствительности, значение которого принимают равным 1,3.

9.8.2. В качестве расчетной для системы тягового электроснабжения

напряжением 25 кВ принимают схемы № 22 и № 23 таблицы 6.1.

Значение напряжения $U_{K,\max}$ вычисляют по формуле, кВ:

$$U_{K,\max} = \frac{U_{\text{рас}} R_{\text{д}}}{\frac{Z_A Z_B}{Z_A + Z_B} + R_{\text{д}}}, \quad (9.54)$$

где $U_{\text{рас}}$ – расчетное напряжение тяговой подстанции в максимальном режиме энергосистемы по 6.2, кВ;

$R_{\text{д}}$ – переходное сопротивление в месте короткого замыкания, значение которого принимают равным 1 Ом;

Z_A, Z_B – результирующие сопротивления схемы замещения, которые вычисляют по формулам, Ом:

$$Z_A = Z_{\text{пА}}, \quad (9.55)$$

$$Z_B = Z_{\text{пВ}} + z_{mn} \square_{\text{АП}} + z_{mn} \square_{\text{ПВ}}, \quad (9.56)$$

где $Z_{\text{пА}}, Z_{\text{пВ}}$ – сопротивления тяговых подстанций А и В в соответствии с рисунком 6.1, перечисление а) и 6.2 в максимальном режиме энергосистемы, Ом;

z_{mn} – погонные сопротивления 1 км тяговой сети на n электрифицированных путях на m -путном участке, Ом/км;

$\square_{\text{АП}}, \square_{\text{ПВ}}$ – расстояния соответственно от тяговой подстанции А до поста секционирования ПС и от поста секционирования ПС до тяговой подстанции В в соответствии с рисунком 6.1, перечисление а), км.

9.8.3 Проверку выбранной уставки на несрабатывание при нормальных режимах работы выполняют по условию, кВ:

$$U_{y,3\text{МН}} \leq \frac{U_{\text{н,мин}}}{K_{\text{в}} K_{\text{з}}}, \quad (9.57)$$

где $U_{\text{н,мин}}$ – наименьшее напряжение на шинах тяговой подстанции в минимальном режиме энергосистемы по 6.2, кВ;

$K_{\text{в}}$ – коэффициент возврата, значение которого принимают от 1,1 до 1,2;

$K_{\text{з}}$ – коэффициент запаса, значение которого принимают от 1,1 до 1,3.

9.8.4. Для системы тягового электроснабжения напряжением 2×25 кВ уставку защиты минимального напряжения отдельно для шин присоединений питающих линий контактной подвески и питающего провода вычисляют по формуле (9.53), в которой принимают, кВ:

$$U_{K,\max} 10^3 \geq 1,2 I_{\text{к,1}} R_{\text{д}}, \quad (9.58)$$

$$U_{K,\max} 10^3 \geq 1,2 I_{\text{ф,1}} R_{\text{д}}, \quad (9.59)$$

где $R_{\text{д}}$ – переходное сопротивление в месте короткого замыкания, принимаемое равным 1 Ом;

$I_{\text{к,1}}, I_{\text{ф,1}}$ – токи присоединений питающих линий соответственно контактной подвески и питающего провода в режиме максимума энергосистемы для расчетных схем № 2 и № 7 по рисунку 7.4, которые вычисляют по формулам (7.8), (7.9), А.

9.8.5. Проверку выбранной уставки на несрабатывание при нормальных режимах работы выполняют по (9.57).

9.9. Защита контактной сети от перегрузки (кваситепловая защита)

9.9.1. Кваситепловая защита может использоваться как:

- защита от отжига;
- защита от недопустимого удлинения проводов, ограниченного максимально возможным перемещением фиксаторов и грузов температурных компенсаторов.

Рассчитываемая защитой температура t определяется как сумма температуры перегрева провода θ (вычисляемая с периодичностью 1 с на основании решения уравнения теплового баланса) и температуры окружающей среды $t_{\text{окр}}$ ($t = \theta + t_{\text{окр}}$) при расчетной скорости ветра 1 м/с.

9.9.2. Для ввода в защиту исходных данных, определяющих параметры срабатывания, необходимо:

- принять значение расчетной температуры окружающей среды $t_{\text{окр}}$;
- установить какой из проводов контактной сети является лимитирующим по нагреву;
- выбрать уставку температуры аварийного отключения t_y и уставку температуры предупреждения $t_{\text{пред}}$;
- определить (вычислить) для лимитирующего провода значения коэффициентов нагрева K_n и охлаждения K_o , входящих в уравнение теплового баланса.

9.9.3. При отсутствии в защите датчика температуры $t_{\text{окр}}$ периодичность оперативного изменения значения температуры окружающей среды $t_{\text{окр}}$, вводимого вручную или по каналу АСУ в терминал кваситепловой защиты, устанавливается местными инструкциями, но не реже двух раз в год. Для каждого сезона значение $t_{\text{окр}}$ принимают как среднее из наибольших показателей за ряд лет.

При плавке гололеда значение $t_{\text{окр}}$ устанавливают равным 0 °С.

9.9.4. В качестве лимитирующего по нагреву провода контактной сети принимают:

- для защиты, предотвращающей отжиг проводов, – тот провод, который ограничивает наибольшее длительно допустимое значение тока присоединения;
- для тепловой защиты, предотвращающей недопустимое удлинение проводов, – контактный провод, который считают лимитирующим.

Для определения лимитирующего по опасности отжига провода рассчитывают коэффициенты распределения суммарного тока контактной сети, соответственно для несущего троса $K_{p,t}$, для контактного провода $K_{p,k}$, для усиливающего провода $K_{p,y}$. Значение тока контактной сети $I_{\text{кс}}$, ограниченного допустимым током несущего троса $I_{\text{т,доп}}$, контактного провода $I_{\text{к,доп}}$ или усиливающего провода $I_{\text{у,доп}}$ находят по формулам, А:

$$I_{\text{кс}} = - \frac{I_{\text{т,доп}}}{K_{p,t}}, \quad (9.60)$$

$$I_{\text{кс}} = - \frac{I_{\text{к,доп}}}{K_{p,k}}, \quad (9.61)$$

$$I_{\text{кс}} = - \frac{I_{\text{у,доп}}}{K_{p,y}}. \quad (9.62)$$

Лимитирующим проводом является тот, для которого значение $I_{\text{кв}}$ оказывается наименьшим.

Ток I_i в лимитирующем проводе i определяют как, А:

$$I_i = K_{p,i} I_{\text{кв}}. \quad (9.63)$$

9.9.5. Уставку аварийного отключения t_y защиты выбирают по условию:

$$t_y \leq 1,05 t_{\text{max}}, \quad (9.64)$$

где t_{max} – наибольшая длительно допустимая температура контролируемого (лимитирующего) провода, °С.

Уставку температуры предупреждения $t_{\text{пред}}$ выбирают по условию:

$$t_{\text{пред}} \leq K_{з,\text{пред}} t_y, \quad (9.65)$$

где $K_{з,\text{пред}}$ – коэффициент запаса, принимаемый равным от 0,8 до 0,9.

9.9.6. Значение наибольшей допустимой температуры t_{max} определяют в зависимости от назначения защиты.

Для тепловой защиты, предотвращающей отжиг проводов контактной сети ее принимают равной наибольшему длительно допустимому значению температуры нагрева для лимитирующего провода в соответствии с нормами, принятыми для железных дорог стран – членов ОСЖД.

Для тепловой защиты, предотвращающей недопустимый поворот фиксатора из-за продольного перемещения контактного провода, значение t_{max} вычисляют по формуле, °С:

$$t_{\text{max}} \leq t_{\text{min}} + \frac{\Delta l_{\text{ф,max}}}{\alpha l_{\text{аф}}}, \quad (9.66)$$

где $\square_{\text{ф,max}}$ – допустимое по нормам перемещение фиксатора вдоль пути от крайнего положения, соответствующего минимальной расчетной температуре окружающей среды, м;

$\square_{\text{аф}}$ – расстояние от ближайшего к компенсатору фиксатора до средней анкеровки, м;

t_{min} – минимальная расчетная температура окружающей среды данного климатического района, °С;

α – температурный коэффициент линейного расширения провода, $1/^\circ\text{C}$.

Для тепловой защиты, предотвращающей опускание груза температурного компенсатора за пределы крайнего нижнего положения, максимальную допустимую температуру t_{max} контактного провода вычисляют по формуле, °С:

$$t_{\text{max}} \leq t_{\text{min}} + \frac{\Delta l_{\text{Г,max}}}{\alpha \cdot p \cdot l_{\text{аГ}}}, \quad (9.67)$$

где $\square_{\text{Г,max}}$ – наибольшая допустимая высота перемещения верхней плоскости грузов компенсатора от крайнего верхнего положения, соответствующего температуре t_{min} , м;

$\square_{\text{аГ}}$ – расстояние от компенсатора до средней анкеровки, м;

p – передаточное число компенсатора.

Температурный коэффициент линейного расширения проводов α принимают, $1/^\circ\text{C}$:

- для медных, низколегированных и бронзовых – $17 \cdot 10^{-6}$;
- для биметаллических сталемедных и сталеалюминиевых – $13 \cdot 10^{-6}$.

Передаточное число температурного компенсатора p принимают для грузовых компенсаторов:

- двухблочного – 2;
- трехблочного – 4;
- блочно-полиспастного и барабанного – 3.

Для компенсаторов других типов значение p принимают по их конструктивным данным.

В качестве расчетного для защиты принимают наименьшее из вычисленных в 9.9.6 значений t_{\max} .

9.9.7. Коэффициент нагревания лимитирующего провода вычисляют по формуле, $^{\circ}\text{C}/(\text{с}\cdot\text{A}^2)$:

$$K_{\text{н}} = \frac{K_{\text{р},i}^2 r_{20,i} 10^{-3}}{M_i \left(1 - \frac{u}{100}\right)^2 C_i}, \quad (9.68)$$

где $K_{\text{р},i}$ – коэффициент распределения тока (доля тока присоединения контактной сети) для лимитирующего провода;

$r_{20,i}$ – сопротивление 1 км неизношенного лимитирующего провода при температуре 20 $^{\circ}\text{C}$, Ом/км;

u – износ контактного провода, %;

M_i – масса неизношенного лимитирующего провода, кг/м;

C_i – удельная теплоемкость лимитирующего провода при температуре близкой к температуре уставки t_y , определяемая в соответствии с таблицей 9.3, Вт·с/(кг· $^{\circ}\text{C}$).

Таблица 9.3 – Тепловые параметры проводов

Тип проводов	$\beta_r, 1/^{\circ}\text{C}$	$C_i, \text{Вт}\cdot\text{с}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$
Медные, медные низколегированные	0,0039	391
Бронзовые	0,0039	394
Сталемедные биметаллические	0,0031	481
Алюминиевые	0,0036	929
Сталеалюминиевые многопроволочные	0,0034	777

Механическому износу подвергаются только контактные провода, поэтому, если лимитирующий провод не является контактным, то для него u принимают равным 0.

Примечание – Если по условиям функционирования программы вычисление перегрева θ значение $K_{\text{н}}$ требуется вычислять при сопротивлении i -го провода (лимитирующего) $r_{0,i}$, соответствующем температуре окружающей среды 0 $^{\circ}\text{C}$, то при отсутствии таких справочных данных для медных, медных низколегированных и бронзовых проводов допускается принимать $r_{0,i} = 0,92 r_{20,i}$.

9.9.8. Коэффициент охлаждения лимитирующего провода для скорости ветра 1 м/с находят по формуле, 1/с:

$$K_o = \frac{\kappa_{T,i} \pi D_{\Delta,i} 10^{-3}}{M_i \left(1 - \frac{u}{100}\right)^{0,5} C_i}, \quad (9.69)$$

где $\kappa_{T,i}$ – коэффициент теплоотдачи лимитирующего провода, Вт/(м²·°С);

$D_{\Delta,i}$ – эквивалентный диаметр неизношенного некруглого провода, пропорциональный его периметру Π_i ($D_{\Delta,i} = \Pi_i / \pi$), мм.

Для неизношенного контактного провода, также как для других проводов контактной сети, износ u принимают равным 0.

Значение $D_{\Delta,i}$ определяют по формулам, мм:

- для витых проводов и тросов:

$$D_{\Delta,i} = 0,5d(p_{\Pi} + 2), \quad p_{\Pi} = \pi \left(\frac{D}{d} - 1 \right); \quad (9.70)$$

- для фасонных контактных проводов марок МФ и БрФ:

$$D_{\Delta,i} = \frac{1,63}{\pi} (A + H); \quad (9.71)$$

- для контактных проводов марки Ri:

$$D_{\Delta,i} = \frac{3,34}{\pi} D, \quad (9.72)$$

где d – диаметр проволок наружного повива витого провода, мм;

p_{Π} – число проволок наружного повива витого провода;

D – справочный диаметр провода, мм;

A и H – справочные размеры поперечного сечения фасонных контактных проводов марок МФ и БрФ, мм.

Значение p_{Π} принимают по справочным данным либо вычисляют по формуле (9.70) с округлением результата до целого числа в меньшую сторону.

Значение $\kappa_{T,i}$ при скорости ветра 1 м/с и его направлении вдоль провода (наихудшие условия охлаждения) вычисляют по формулам, Вт/(м²·°С):

- при $0,1 \leq D_{\Delta,i} \sqrt{1 - \frac{u}{100}} \leq 10$:

$$\kappa_{T,i} = \frac{71,4}{\left(D_{\Delta,i} \sqrt{1 - \frac{u}{100}} \right)^{0,56}} + 7 \xi \pi D_{\Delta,i} \sqrt{1 - \frac{u}{100}} \cdot 10^{-3}; \quad (9.73)$$

- при $D_{\Delta,i} \sqrt{1 - \frac{u}{100}} \geq 10$:

$$\kappa_{T,i} = \frac{51,1}{\left(D_{\Delta,i} \sqrt{1 - \frac{u}{100}} \right)^{0,41}} + 7 \xi \pi D_{\Delta,i} \sqrt{1 - \frac{u}{100}} \cdot 10^{-3}, \quad (9.74)$$

где ξ – степень черноты провода, принимаемая в расчетах для окисленных и загрязненных проводов после одного года эксплуатации равной:

- для медных и бронзовых – 0,8;
- для алюминиевых – 0,6.

10. Выбор уставок защит присоединений питающих линий контактной сети парков станций и депо на тяговых подстанциях

10.1. Токовая отсечка

10.1.1. Уставку токовой отсечки, выполняющей роль основной для питающих линий парков станций и депо, выбирают по условию, А:

$$I_{y,TO} \leq \frac{I_{K,min}}{k_{\chi}}, \quad (10.1)$$

где $I_{y,TO}$ – уставка токовой отсечки, А;

$I_{K,min}$ – минимальное значение тока короткого замыкания в конце защищаемой контактной сети, А;

k_{χ} – коэффициент чувствительности, значение которого принимают равным 1,3.

Значение $I_{K,min}$ для системы тягового электроснабжения напряжением 25 кВ вычисляют по формуле, А:

$$I_{K,min} = \frac{U_{рас} 10^3}{Z_{пА} + z_{m1} \ell}, \quad (10.2)$$

где ℓ – расстояние от тяговой подстанции до конца защищаемой контактной сети, км.

Расчетное напряжение $U_{рас}$ и сопротивление тяговой подстанции $Z_{пА}$ принимают для минимального режима энергосистемы по 6.2.

Погонное сопротивление 1 км контактной сети одного пути z_{m1} на станциях с числом путей m три и более принимают равным z_{31} .

10.1.2. Выбранное значение уставки $I_{y,TO}$ проверяют на выполнение условий (9.5) и (9.9). В формуле (9.5) наименьшее значение тока присоединения $I_{K,min,n}$ при коротком замыкании в начале защищаемой зоны в режиме минимума энергосистемы вычисляют по формуле (9.8), а коэффициент чувствительности k_{χ} в условии (9.5) должен быть не менее 1,2.

Выдержку времени не используют.

10.1.3. Если хотя бы одно из условий (9.5) и (9.9) не выполняется, то токовую отсечку используют не как основную, а как дополнительную. При этом уставку $I_{y,TO}$ выбирают по формуле (9.1).

Входящее в эту формулу значение наибольшего тока короткого замыкания в конце защищаемой линии $I_{K,max}$ вычисляют по формуле (10.2), в которой значение напряжения $U_{рас}$ и сопротивление тяговой подстанции $Z_{пА}$ принимают для максимального режима энергосистемы по 6.2.

10.1.4. Выбранную уставку $I_{y,TO}$ проверяют на выполнение условий (9.5) и (9.9) с учетом 10.1.2.

10.1.5. Для системы тягового электроснабжения напряжением 2×25 кВ уставку токовой отсечки выбирают по условию (10.1), в котором значение $I_{K,min}$ в минимальном режиме энергосистемы вычисляют для присоединения питающей линии контактной подвески при коротком замыкании по формуле, А:

$$I_{K,\min} = \frac{U_{\text{рас}} 10^3}{2(Z'_{\Pi} + Z''_{\Pi}) + z_{m1} \ell}, \quad (10.3)$$

где Z'_{Π} , Z''_{Π} – сопротивления энергосистемы и расщепленной обмотки силового трансформатора по 7.2, Ом.

Проверку выбранной уставки по условию (9.5) осуществляют при значении $I_{K,\min}$, которое вычисляют по формуле (10.3) при \square равном 0.

Проверку выбранной уставки по условию (9.9) осуществляют с учетом 5.6.3 и 5.6.4.

10.2. Ненаправленная дистанционная защита присоединений на тяговой подстанции

10.2.1. Уставку ненаправленной дистанционной защиты $Z_{y,\text{ННДЗ}}$ выбирают по условию, Ом:

$$Z_{y,\text{ННДЗ}} \geq k_{\text{ч}} Z_K, \quad (10.4)$$

где Z_K – значение характеристической величины – сопротивления, измеряемого защитой присоединения при коротком замыкании в конце защищаемой контактной сети в режиме минимума энергосистемы, Ом;

$k_{\text{ч}}$ – коэффициент чувствительности, значение которого принимают равным 1,5.

Значение Z_K вычисляют по формуле, Ом:

$$Z_K = z_{m1} \square, \quad (10.5)$$

где \square – расстояние от тяговой подстанции до конца защищаемой контактной сети, км.

10.2.2. Выбранную уставку $Z_{y,\text{ННДЗ}}$ проверяют на отстроенность от максимальных нагрузок нормального режима по условию, Ом:

$$Z_{y,\text{ННДЗ}} \leq \frac{Z_{\text{н},\min}}{k_3}, \quad (10.6)$$

где $Z_{\text{н},\min}$ – сопротивление, измеряемое защитой при максимальной нагрузке нормального режима по 5.6, Ом;

k_3 – коэффициент запаса, значение которого принимают от 1.1 до 1.3.

10.3. Максимальная токовая защита присоединения на тяговой подстанции

10.3.1. Уставку максимальной токовой защиты (резервной) выбирают по условию, А:

$$I_{y,\text{МТЗ}} \geq \frac{k_3}{k_{\text{в}}} I_{\text{н},\max}, \quad (10.7)$$

где $I_{y,\text{МТЗ}}$ – уставка максимальной токовой защиты, А;

$I_{\text{н},\max}$ – наибольшее значение тока в нормальном режиме, А;

k_3 – коэффициент запаса, значение которого принимают от 1,1 до 1,3;

$k_{\text{в}}$ – коэффициент возврата, значение которого принимают от 0,85 до 0,9.

Значение $I_{\text{н},\max}$ для питающих линий контактной сети парков станций принимают по 5.6.3, а для питающих линий депо – по 5.6.4.

10.3.2. Выбранную по формуле (10.7) уставку $I_{y,\text{МТЗ}}$ проверяют на чувствительность к коротким замыканиям по условию, А:

$$I_{y,MTЗ} \leq \frac{I_{K,min}}{k_{\text{ч}}}, \quad (10.8)$$

где $I_{K,min}$ – минимальное значение тока короткого замыкания в конце защищаемой контактной сети, которое для системы тягового электроснабжения напряжением 25 кВ вычисляют по формуле (10.2), А;

$k_{\text{ч}}$ – коэффициент чувствительности, значение которого принимают равным не менее 1,2.

10.3.3. Если условия (10.7) или (10.8) не выполняются, то вместо максимальной токовой защиты используют ненаправленную дистанционную защиту.

10.3.4. Для системы тягового электроснабжения напряжением 2×25 кВ уставку максимальной токовой защиты определяют по формуле (10.7), в которой значение $I_{н,max}$ принимают с учетом 5.6.3 и 5.6.4.

Выбранное значение уставки проверяют по формуле (10.8), в которой параметр $I_{K,min}$ в режиме минимума энергосистемы определяют по формуле (10.3).

11. Выбор уставок защит выключателей постов секционирования присоединения питающих линий контактных сетей главных путей перегонов

11.1. Токовая отсечка

11.1.1. Уставку токовой отсечки $I_{y,TO}$, выбирают по условию (9.1).

В качестве расчетной схемы при вычислении наибольшего значения тока $I_{K,max}$ для системы тягового электроснабжения напряжением 25 кВ принимают схему № 11 таблицы 6.1.

Значение $I_{K,max}$ вычисляют по формуле, А:

$$I_{K,max} = \frac{U_{\text{рас}} 10^3}{n_2 (Z_{\text{ПА}} + z_{mn} \ell_{\text{АП}} + z_{mn} \ell_{\text{ПВ}})}, \quad (11.1)$$

где $U_{\text{рас}}$ – расчетное напряжение тяговой подстанции в соответствии с 6.2.1, кВ;
 $Z_{\text{ПА}}$ – сопротивление тяговой подстанции А в режиме максимума энергосистемы, которое для системы тягового электроснабжения напряжением 25 кВ вычисляют по 6.2, Ом;

z_{mn} – погонное сопротивление 1 км тяговой сети n электрифицированных путей на m -путном участке, Ом/км;

$\square_{\text{АП}}$ и $\square_{\text{ПВ}}$ – расстояния до поста секционирования ПС соответственно от тяговых подстанций А и В, которые принимают в соответствии с рисунком 6.1, перечисление а), км;

n_2 – число электрифицированных путей на участке $\square_{\text{ПВ}}$.

11.1.2. Выбранную в 11.1.1 уставку $I_{y,TO}$ проверяют на чувствительность к коротким замыканиям по условию (9.5) для расчетной схемы № 15 таблицы 6.1, в которой значение тока $I_{K,min,н}$ вычисляют по формуле, А:

$$I_{K,min,н} = U_{\text{рас}} 10^3 \left[\frac{1}{Z_{\text{ПА}} + z_{mn} \ell_{\text{АП}}} + \frac{n_2 - 1}{n_2 (Z_{\text{ПВ}} + z_{mn} \ell_{\text{ПВ}})} \right]. \quad (11.2)$$

Значение расчетного напряжения тяговых подстанций А и В и их

сопротивлений $Z_{пА}$, $Z_{пВ}$ вычисляют в соответствии с 6.2 для режима минимума энергосистемы.

11.1.3. Выбранную в 11.1.1 уставку проверяют на отстроенность от максимального тока нормального режима по условию (9.9), в котором значение $I_{н,маx}$ для энергосистемы напряжением 25 кВ определяют по формуле (5.10).

11.1.4. Для системы тягового электроснабжения 2×25 кВ выбор уставок токовой отсечки должен осуществляться по условиям (9.1) и (9.9).

В условии (9.1) значение $I_{к,маx}$ вычисляют для присоединений питающей линии контактной подвески $I_{к,маx} = I_{к,3}$ и питающего провода $I_{к,маx} = I_{ф,3}$ по формулам (7.20), (7.21) для расчетных схем № 3 и № 8 по рисунку 7.4 в максимальном режиме энергосистемы.

В условии (9.9) значение $I_{н,маx}$ для присоединений питающих линий контактной подвески $I_{н,маx} = I_{кн,маx}$ и питающего провода $I_{н,маx} = I_{фн,маx}$ определяют соответственно по формулам (5.15) и (5.16).

11.2. Направленная дистанционная защита (первая ступень)

11.2.1. Уставку первой ступени направленной дистанционной защиты $Z_{у,д31}$ выбирают по условию (9.21) для расчетной схемы № 11 таблицы 6.1, в котором значение Z_K вычисляют по формуле, Ом:

$$Z_K = n_2 z_{mn} \ell_{пВ}. \quad (11.3)$$

11.2.2. Выбранную уставку проверяют по условию (9.25).

11.2.3. Угловая характеристика на комплексной плоскости сопротивлений должна иметь форму сектора 1 ст ДЗ (рисунок А.3 приложения А), правый радиус которого проведен под углом φ относительно оси активных сопротивлений R от 50 до 53 градусов, а левый радиус устанавливают под углом от 110 до 120 градусов по отношению к этой оси. Радиус сектора устанавливают равным $Z_{у,д31}$.

11.2.4. Для системы тягового электроснабжения напряжением 2×25 кВ уставки направленной дистанционной защиты (первая ступень) выбирают по условиям (9.21), (9.25) и 11.2.3.

В условии (9.21) значение Z_K принимают равным для присоединений питающих линий контактной подвески $Z_K = Z_{QпВ,к}$ и питающего провода $Z_K = Z_{QпВ,ф}$, которые вычисляют соответственно по формулам (7.20), (7.21) для расчетных схем № 3 и № 8 по рисунку 7.4.

В условии (9.25) значение $Z_{н,мин}$ для тех же присоединений соответственно $Z_{кпн,мин}$ и $Z_{фн,мин}$ вычисляют по (5.12), (5.15) и (5.16).

11.3. Направленная дистанционная защита (вторая ступень)

11.3.1. Уставку второй ступени направленной дистанционной защиты $Z_{у,д32}$ выбирают по условию (9.26) для расчетной схемы № 11 таблицы 6.1, в котором значение Z_K вычисляют по формуле (11.3).

11.3.2. Угловая характеристика на комплексной плоскости сопротивлений должна иметь форму сектора 2 ст ДЗ (рисунок А.3 приложения А), правый радиус которого проведен под углом φ относительно оси активных сопротивлений R от 50 до 53 градусов, а левый радиус устанавливают под углом от 110 до 120 градусов по отношению к этой оси. Радиус сектора устанавливают равным $Z_{у,д32}$.

11.3.3. Для системы тягового электроснабжения напряжением 2×25 кВ уставки направленной дистанционной защиты (вторая ступень) выбирают по условиям (9.26)

и 11.3.2.

В условии (9.26) значение Z_K принимают равным для присоединений питающих линий контактной подвески $Z_K = Z_{QПВ,к}$ и питающего провода $Z_K = Z_{QПВ,ф}$, которые вычисляют по формулам (7.20), (7.21) для расчетных схем № 3 и № 8 по рисунку 7.4.

Значение $Z_{н,мин}$ принимают по 9.3.5.

11.4. Дистанционная защита (третья ступень)

11.4.1. Третью ступень дистанционной защиты допускается выполнять как ненаправленную с угловой характеристикой в виде окружности с центром в начале координат комплексной плоскости, так и направленную с угловой характеристикой в виде сектора 3 ст ДЗ, приведенной на рисунке А.3 приложения А. Ненаправленная защита является предпочтительной, поскольку она автоматически реализует дополнительную функцию «Устройство резервирования отказа выключателей (УРОВ)». Направленную защиту следует применять, если ненаправленная защита не обеспечивает отстройку от больших нагрузок нормального режима.

Уставку третьей ступени дистанционной защиты $Z_{у,ДЗ3}$ выбирают по условию (9.30) для расчетной схемы № 11 таблицы 6.1, в котором значение Z_K вычисляют по формуле, Ом:

$$Z_K = n_2 z_{m1} \square_{АП} + (R_d + Z_{тгз}) \frac{Z_A + Z_B}{Z_B}, \quad (11.4)$$

где Z_A , Z_B – результирующие сопротивления схемы замещения, которые вычисляют по формулам, Ом:

$$Z_A = Z_{пА} + z_{m1} \square_{ПВ}, \quad (11.5)$$

$$Z_B = Z_{пВ}. \quad (11.6)$$

Сопротивления тяговых подстанций $Z_{пА}$ и $Z_{пВ}$ принимают по 6.2 для минимального режима энергосистемы.

Выбранную уставку проверяют на отсутствие ложных отключений при наибольшей нагрузке нормального режима по условию (9.14), в котором для вычисления $Z_{н,мин}$ используют выражения (5.10) и (5.12). Если условия (9.14) и (9.30) соблюдаются одновременно, то третью ступень дистанционной защиты выполняют ненаправленной. В противном случае эту ступень выполняют направленной.

11.4.2. Угловую характеристику на комплексной плоскости сопротивлений направленной защиты принимают по 9.5.7.

Проверку возможности отказа третьей ступени при коротком замыкании через переходное сопротивление (согласно 6.3) определяют в следующей последовательности:

- вычисляют значение Z_K по формуле (11.4) в комплексной форме и устанавливают его активную $R_K = R_{QV}$ и реактивную $X_K = X_{QV}$ составляющие, где QV – шифр выключателя, для которого рассчитывают защиту;

- по формуле (9.36) вычисляют значение фазового угла φ_k при коротком замыкании;

- сравнивают значения углов φ_k и φ угловой характеристики защиты 3 ст ДЗ по рисунку А.3 приложения А;

- если соблюдается условие $\varphi \leq \varphi_k$, то наличие переходного сопротивления отказа защиты не вызывает.

11.4.3. Для системы тягового электроснабжения напряжением 2×25 кВ уставки дистанционной защиты (третья ступень) выбирают по условиям (9.14), (9.30) и 9.5.7 отдельно для присоединений питающих линий контактной подвески и питающего провода. Для вычисления сопротивления $Z_{н, \min}$ в условии (9.14) для этих присоединений используют выражения (5.12), (5.14) и (5.15).

В условии (9.30) значение Z_K принимают равным для присоединений питающих линий контактной подвески $Z_K = Z_{QПВ,к}$ и питающего провода $Z_K = Z_{QПВ,ф}$, которые вычисляют по формулам (7.20), (7.21) для расчетных схем № 3 и № 8 по рисунку 7.4.

11.5. Направленная дистанционная защита (четвертая ступень)

11.5.1. Защищаемыми зонами четвертой степени направленной дистанционной защиты выключателей на посту секционирования, обеспечивающей защиту от коротких замыканий через переходное сопротивление больше указанного в 6.3.2, являются расстояния $\square_{АП}$ и $\square_{ПВ}$ по рисунку 6.1, перечисление а). В качестве расчетных схем для участка $\square_{ПВ} = \square_i$ принимают схемы по рисунку 9.1, перечисления а) и б) при $\square_{Вi} = 0$, и для участка $\square_{АП} = \square_i$ – схемы по рисунку 9.1, перечисления в) и г), при $\square_{Ai} = 0$.

11.5.2. Для четвертой степени направленной дистанционной защиты запрещается применение пуска или торможения, уставку которого зависит от соотношения коэффициентов гармоник токов нагрузки и короткого замыкания.

11.5.3. Уставку защиты принимают в соответствии с 9.6. При этом в формуле (9.42) значение тока $I_{н, \max}$ определяют по формуле (5.10).

11.6. Защита минимального напряжения

11.6.1. Уставку защиты минимального напряжения $U_{у,ЗМН}$ системы тягового электроснабжения напряжением 25 кВ вычисляют по формуле (9.53).

11.6.2. В качестве расчетной принимают схему № 15 таблицы 6.1, а напряжение $U_{к, \max}$ на шинах поста секционирования вычисляют по формуле (9.54), в которой принимают, Ом:

$$Z_A = Z_{пА} + z_{mn} \square_{АП}, \quad (11.7)$$

$$Z_B = Z_{пВ} + z_{mn} \square_{ПВ}, \quad (11.8)$$

$$Z_{AB} = R_d. \quad (11.9)$$

11.6.3. Выбранную по формуле (9.53) уставку проверяют по условию (9.57) при наименьшем по нормам напряжении $U_{н, \min}$ на шинах поста секционирования (21 кВ).

11.6.4. Для системы тягового электроснабжения напряжением 2×25 кВ уставку защиты минимального напряжения для присоединений контактного провода и питающего провода $U_{у,ЗМН}$ выбирают по условию, кВ:

$$U_{у,ЗМН} \geq k_{ч} U_{к, \max}, \quad (11.10)$$

где $U_{к, \max}$ – напряжение на соответствующих шинах при коротком замыкании для расчетных схем № 1 и № 6 рисунка 7.4 в режиме максимума энергосистемы, вычисляемое по формуле (7.26), кВ;

$k_{ч}$ – коэффициент чувствительности, который принимают не менее 1,2.

Переходное сопротивление R_d принимают 1 Ом.

11.6.5. Проверку выбранной по (11.10) уставки $U_{у,ЗМН}$ на несрабатывание при

нормальном режиме работы выполняют по условию (9.57), в котором наименьшее значение напряжения $U_{н,мин}$ на шинах поста секционирования принимают в соответствии с принятыми нормами (21 кВ).

12. Выбор уставок защит выключателей постов секционирования на присоединениях питающих линий контактных сетей депо и парков станций

12.1. Максимальная токовая защита

12.1.1. Уставку максимальной токовой защиты $I_{у,МТЗ}$ для системы тягового электроснабжения напряжением 25 кВ выбирают по условию (10.7).

Проверку не чувствительность к коротким замыканиям осуществляют по формуле (10.8), в которой принимают значение коэффициента чувствительности $k_ч$ равным 1,5.

Значение тока короткого замыкания при включенных тяговых подстанциях А и В вычисляют по формуле, А:

$$I_{K,мин} = \frac{U_{рас} 10^3}{\frac{Z_A Z_B}{Z_A + Z_B} + z_{m1} \ell}, \quad (12.1)$$

где ℓ – расстояние от поста секционирования до конца защищаемой контактной сети, км.

Значение тока короткого замыкания при отключении тяговой подстанции В вычисляют по формуле, А:

$$I_{K,мин} = \frac{U_{рас} 10^3}{Z_A + z_{m1} \ell}. \quad (12.2)$$

Значения Z_A и Z_B вычисляют по формулам, Ом:

$$Z_A = Z_{пА} + z_{mn} \ell_{АП}, \quad (12.3)$$

$$Z_B = Z_{пВ} + z_{mn} \ell_{ПВ}. \quad (12.4)$$

Значения $U_{рас}$ и $Z_{пА}$ определяют по 6.2 для минимального режима энергосистемы.

12.1.2. Для системы тягового электроснабжения напряжением 2×25 кВ уставку присоединений максимальной токовой защиты выбирают по 10.3.1. Проверку на чувствительность к коротким замыканиям осуществляют по формуле (10.8) при значении $I_{K,мин}$, определяемом по формуле, А:

$$I_{K,мин} = \frac{U_{рас} 10^3}{2Z'_{п} + 0,5Z''_{п} + z_{с,э} \ell_{АП} + \gamma_k Z_{а,т} + z_p (\beta_k \ell_2 + \ell'_3) + z_{m1} \ell}, \quad (12.5)$$

где $U_{рас}$ – расчетное напряжение тяговой подстанции в минимальном режиме энергосистемы, кВ;

$Z'_{п}$, $Z''_{п}$, $Z_{а,т}$ – сопротивления трансформатора и автотрансформатора, принимаемые по 7.2, Ом;

$z_{с,э}$, z_p , β_k , γ_k – параметры эквивалентной тяговой сети, определяемые в соответствии с приложением Б;

- $\square_{\text{АП}}$ – расстояние от тяговой подстанции А до поста секционирования ПС, км;
- \square_2, \square'_3 – расстояния в соответствии с рисунком 7.1, км;
- \square – расстояние от поста секционирования ПС до конца защищаемой контактной сети, км;
- z_{m1} – погонное сопротивление 1 км контактной сети одного пути m -путного участка, принимаемое в соответствии с приложением Б, Ом/км.

Примечание – На станциях с числом путей m три и более принимают в формуле (12.5) z_{m1} равным z_{31} .

12.2. Токовая отсечка

12.2.1. Уставку токовой отсечки $I_{y,TO}$ для системы тягового электроснабжения напряжением 25 кВ выбирают по условию (10.1), в котором значение минимального тока короткого замыкания $I_{K,min}$ вычисляют по формулам (12.1) или (12.2).

12.2.2. Выбранное значение уставки $I_{y,TO}$ проверяют на выполнение условия (9.5), при коэффициенте чувствительности не менее 1,2.

Значение $I_{K,min}$ в условии (9.5) определяют по формуле (12.2) при $\square = 0$.

12.2.3. Выбранное значение уставки $I_{y,TO}$ проверяют также по условию (9.9), в котором наибольший ток нагрузки нормального режима принимают для питающих линий:

- депо – по 5.6.4;
- парков станций – по 5.6.3.

12.2.4. Для системы тягового электроснабжения напряжением 2×25 кВ уставку токовой отсечки выбирают по условию (10.1), в котором значение $I_{K,min}$ в минимальном режиме энергосистемы вычисляют по формуле (12.5).

Проверку выбранной уставки по условию (9.5) осуществляют при значении $I_{K,min}$, которое вычисляют по формуле (12.5) при $\square = 0$.

Проверку выбранной уставки по условию (9.9) осуществляют с учетом 5.6.3 и 5.6.4.

13. Выбор уставок защит на выключателе пункта параллельного соединения

13.1. Защита минимального напряжения

13.1.1. Уставку защиты минимального напряжения $U_{y,зМН}$ для системы тягового электроснабжения напряжением 25 кВ выбирают по условию (9.53) для расчетной схемы № 20 таблицы 6.1 при коэффициенте чувствительности не менее 1,5. Напряжение $U_{K,max}$ в условии (9.53) вычисляют по формуле, кВ:

$$U_{K,max} = I_A z_{nm} \ell_4 = \frac{U_{\text{рас}} z_{nm} \ell_4 10^3}{Z_{\text{ПА}} + z_{nm} \ell_{\text{АП}} + z_{nm} \ell_{\text{ПВ}}}, \quad (13.1)$$

где $U_{\text{рас}}$ – расчетное напряжение тяговой подстанции А, кВ;

$Z_{\text{ПА}}$ – сопротивление тяговой подстанции А, Ом;

$\ell_{\text{АП}}, \ell_{\text{ПВ}}$ – расстояния соответственно между тяговой подстанцией А и постом секционирования ПС и между постом секционирования ПС и тяговой подстанцией В, км;

l_4 – расстояние между пунктом параллельного соединения ППС2 и тяговой подстанцией В в соответствии с рисунком 6.1, перечисление а), км.

Значения $U_{\text{рас}}$ и $Z_{\text{пА}}$ принимают по 6.2 для максимального режима энергосистемы.

Примечание – На пункте параллельного соединения защита минимального напряжения является единственной, срабатывание которой при коротком замыкании на контактной сети не зависит от срабатывания выключателей тяговой подстанции или поста секционирования. Все остальные защиты срабатывают каскадно, т.е. после отключения выключателя на тяговой подстанции или на посту секционирования.

13.1.2. Выбранную уставку $U_{\text{у,ЗМН}}$ проверяют по условию (9.57), в котором значение наименьшего напряжения в нормальном режиме $U_{\text{у,ЗМН}}$ принимают в соответствии с принятыми нормами (21 кВ).

13.2. Ненаправленная дистанционная защита

13.2.1. Уставку ненаправленной дистанционной защиты $Z_{\text{у,ННДЗ}}$ выбирают по условию, Ом:

$$Z_{\text{у,ННДЗ}} \geq k_{\text{ч}} Z_{\text{К}}, \quad (13.2)$$

где $Z_{\text{у,ННДЗ}}$ – уставка ненаправленной дистанционной защиты по характеристической величине – сопротивлению, Ом;

$Z_{\text{К}}$ – значение характеристической величины – сопротивления, измеряемого защитой при коротком замыкании через переходное сопротивление $R_{\text{д}}$ по 6.3 в заданной точке расчетной схемы питания в режиме минимума энергосистемы, Ом;

$k_{\text{ч}}$ – коэффициент чувствительности, значение которого принимают не менее 1,2.

13.2.2. В качестве расчетной схемы принимают схему № 19 таблицы 6.1, для которой значение $Z_{\text{К}}$ определяют по формуле, Ом:

$$Z_{\text{К}} = \frac{n_3 - 1}{n_3} (z_{\text{м1}} l_4 + R_{\text{д}}), \quad (13.3)$$

где n_3 – число включенных в работу электрифицированных путей на участке l_3 ;
 l_4 – расстояние от пункта параллельного соединения ППС2 до тяговой подстанции В, км.

Расстояния l_3 и l_4 принимают в соответствии с рисунком 6.1, перечисление а).

13.2.3. Выбранное по 13.2.1 значение уставки $Z_{\text{у,ННДЗ}}$ проверяют на выполнение условия, Ом:

$$Z_{\text{у,ННДЗ}} \leq \frac{Z_{\text{н,мин}}}{k_3}, \quad (13.4)$$

где $Z_{\text{н,мин}}$ характеристическая величина – сопротивление, измеряемое защитой при наибольших нагрузках нормального режима, определяемая по формулам (5.11) и (5.12) с учетом 5.6.5, Ом;

k_3 – коэффициент запаса, значение которого принимают от 1,1 до 1,3.

13.3. Токовая отсечка

13.3.1. Уставку токовой отсечки $I_{y,TO}$ выбирают по условию (10.1) для расчетной схемы № 17 таблицы 6.1, в которой значение тока $I_{K,min}$ вычисляют по формуле, А:

$$I_{K,min} = I_{QП21} = \frac{n_3 - 1}{n_3} I_A + I_B. \quad (13.5)$$

Значения токов I_A и I_B вычисляют по формулам (6.11), (6.12), в которых результирующие сопротивления схемы замещения определяют по формулам (6.1), (6.2), (6.3) и таблице 6.1 для схемы № 17 в минимальном режиме энергосистемы при $R_d = 0$.

13.3.2. Выбранное по 13.3.1 значение уставки $Z_{y,TO}$ проверяют на выполнение условия, А:

$$I_{y,TO} \geq k_3 I_{n,max}, \quad (13.6)$$

где $I_{n,max}$ – наибольший ток нагрузки нормального режима работы, вычисляемый по формуле (5.11), А;

k_3 – коэффициент запаса, принимаемый от 1,1 до 1,3.

13.4. Максимальная токовая защита

13.4.1. Уставку максимальной токовой защиты $I_{y,MTЗ}$ выбирают по формуле, А:

$$I_{y,MTЗ} \geq k_3 I_{n,max}. \quad (13.7)$$

где k_3 и $I_{n,max}$ выбирают как в 13.3.2.

13.4.2. Выбранное значение уставки $I_{y,MTЗ}$ проверяют на выполнение условия (10.1) для расчетной схемы № 19 таблицы 6.1 в минимальном режиме энергосистемы при отсутствии переходного сопротивления в месте короткого замыкания.

Значение тока $I_{K,min}$ равно $I_{QП21}$ вычисляют по формуле, А:

$$I_{K,min} = \left(\frac{n_3 - 1}{n_3} \right) \frac{U_{рас} 10^3}{Z_{ПА} + z_{mn} \ell_1 + z_{mn} \ell_2 + z_{mn} \ell_3 + z_{m1} \ell_4}. \quad (13.8)$$

14. Выбор уставок защит присоединений поперечной компенсации реактивной мощности

14.1. Уставку $I_{y,MTЗ}$ максимальной токовой защиты вычисляют по формуле, А:

$$I_{y,MTЗ} \geq 2k_3 I_{НОМ}, \quad (14.1)$$

где $I_{НОМ}$ – номинальный ток установки поперечной компенсации реактивной мощности, А;

k_3 – коэффициент запаса, принимаемый равным от 1,15 до 1,25.

Значение номинального тока установки вычисляют по формуле, А:

$$I_{НОМ} = \frac{U_{ш,НОМ} 10^3}{\frac{x_c M}{N} - X_L}, \quad (14.2)$$

где $U_{ш,НОМ}$ – номинальное напряжение на шинах, кВ;

x_c – емкостное сопротивление одного конденсатора, Ом;

M – число последовательно соединенных рядов конденсаторов;

N – число параллельно соединенных конденсаторов в одном ряду;

X_L – индуктивное сопротивление реактора, Ом.

Значение емкостного сопротивления x_c одного конденсатора вычисляют по формуле, Ом:

$$x_c = \frac{U_{c,ном}^2 \cdot 10^3}{q}, \quad (14.3)$$

где $U_{c,ном}$ – номинальное напряжение одного конденсатора, кВ;

q – номинальная реактивная мощность одного конденсатора, кВ·Ар.

Защиту выполняют без выдержки времени. Зона ее действия – несколько платформ установки вблизи высоковольтного выключателя. Защита срабатывает также при замыкании на землю разрядного трансформатора напряжения.

14.2. Уставку продольной дифференциальной токовой защиты, являющейся основной, определяют по условию, А:

$$I_{y,ПДТЗ} \geq \Delta f_{max} K_3 K_{одн} 3,5 I_{ном}, \quad (14.4)$$

где $I_{y,ПДТЗ}$ – уставка продольной дифференциальной токовой защиты, А;

Δf_{max} – допустимая погрешность трансформаторов тока, принимаемая равной 0,1;

K_3 – коэффициент запаса, значение которого принимают равным 1,5;

$K_{одн}$ – коэффициент однотипности, значение которого принимают равным 1;

$I_{ном}$ – номинальный ток установки, вычисляемый по формуле (14.2), А.

Выбранную по условию (14.4) уставку проверяют на чувствительность к коротким замыканиям по формуле, А:

$$I_{y,ПДТЗ} \leq \frac{I_{K,min}}{K_ч}, \quad (14.5)$$

где $I_{K,min}$ – минимальное значение тока короткого замыкания установки, А;

$K_ч$ – нормированное значение коэффициента чувствительности, значение которого принимают равным 2.

Значение $I_{K,min}$ соответствует замыканию на землю последней платформы установки поперечной компенсации реактивной мощности или нарушению изоляции вводного изолятора реактора. При этих условиях принимают, А:

$$I_{K,min} = 0,89 I_{ном}. \quad (14.6)$$

14.3. Уставку $I_{y,пер}$ максимальной токовой защиты от перегрузки вычисляют по формуле, А:

$$I_{y,пер} \geq \frac{1,3 K_3}{K_B} I_{ном}, \quad (14.7)$$

где $I_{ном}$ – номинальный ток установки, значение которого вычисляют по формуле (14.2), А;

K_3 – коэффициент запаса, значение которого принимают равным от 1,1 до 1,2;

K_B – коэффициент возврата, значение которого принимают равным от 0,8 до 0,9.

Выдержку времени защиты от перегрузки устанавливают до 9 с.

14.4. Защиту от повышения напряжения используют, если не применяют устройства автоматического регулирования напряжения. Уставку защиты от повышения напряжения определяют по условию, кВ:

$$U_{y,3ПН} \geq \frac{K_3}{K_B} 1,1 U_{н,маx}, \quad (14.8)$$

где $U_{y,3ПН}$ – уставка защиты от повышения напряжения, кВ;
 $U_{н,маx}$ – наибольшее допустимое напряжение на шинах, значение которого принимают равным 29 кВ;

k_3 – коэффициент запаса;

k_B – коэффициент возврата, значение которого принимают равным от 0,8 до 0,9.

Значение коэффициента запаса вычисляют по формуле:

$$K_3 = \frac{1,1}{1 - \frac{X_L N}{x_c M}}, \quad (14.9)$$

в которой значения входящих в формулу параметров принимают как в 14.1.

Выдержка времени – от 3 до 5 мин.

14.5. Защита минимального напряжения контролирует целостность первичной обмотки разрядного трансформатора напряжения, необходимого по условиям электробезопасности, а также частично резервирует защиты от коротких замыканий. Уставку защиты определяют по условию, кВ:

$$U_{y,3МН} \leq \frac{1}{K_3 K_B} U_{н,мин}, \quad (14.10)$$

где $U_{y,3МН}$ – уставка защиты минимального напряжения, кВ;

$U_{н,мин}$ – минимальное напряжение нормального режима, значение которого принимают для установки поперечной компенсации на тяговой подстанции 25 кВ, а на посту секционирования 21 кВ;

k_3 – коэффициент запаса, значение которого принимают равным от 1,15 до 1,25;

k_B – коэффициент возврата, значение которого принимают равным от 1,1 до 1,25.

Выдержку времени на отключение принимают 0,5 с.

14.6. Чувствительность дифференциальной защиты по напряжению проверяется по короткому замыканию в одном из рядов конденсаторов, при котором весь ряд оказывается закороченным. Напряжение небаланса $U_{нб}$ на входе измерительного органа указанной защиты в этом режиме вычисляют по формуле, В:

$$U_{нб} = \frac{K_{сн} U_{н,мин} 10^3}{K_U n_{пт} [M(1-n) - 1]}, \quad (14.11)$$

где $U_{н,мин}$ – минимальное напряжение нормального режима, значение которого принимают равным 25 кВ для установки поперечной емкостной компенсации, размещенной на тяговой подстанции и равным 21 кВ при размещении ее на посту секционирования, кВ;

$K_{сн}$ – коэффициент снижения напряжения в органе регулировки, значение которого принимают равным 0,6;

K_U – коэффициент трансформации трансформаторов напряжения;

$n_{пт}$ – коэффициент трансформации промежуточных трансформаторов.

Значение n вычисляют по одной из следующих формул:

$$n = \left(\frac{50}{f_0} \right)^2, \quad (14.12)$$

$$n = \frac{X_L}{X_C} = \frac{X_L N}{x_c M}, \quad (14.13)$$

где f_0 – резонансная частота установки поперечной емкостной компенсации, Гц.
Коэффициент чувствительности $k_{\text{ч}}$ определяют по формуле:

$$k_{\text{ч}} = \frac{U_{\text{нб}}}{U_{\text{ср}}}, \quad (14.14)$$

где $U_{\text{ср}}$ – напряжение срабатывания измерительного органа, В.

Защита признается отвечающей требованиям чувствительности при коэффициенте чувствительности не менее 1,5.

Выдержку времени принимают 0,5 с.

Общие сведения о графиках селективности и угловых характеристиках дистанционных защит

А.1. Графики селективности защит в межподстанционной зоне

А.1.1. Графики селективности определяют выдержку времени защит в зависимости от удаленности короткого замыкания. В соответствии с этими графиками зоны действия и выдержки времени защит присоединений всех выключателей в межподстанционной зоне должны быть согласованы между собой таким образом, чтобы было обеспечено выполнение принципов селективности и устойчивости функционирования.

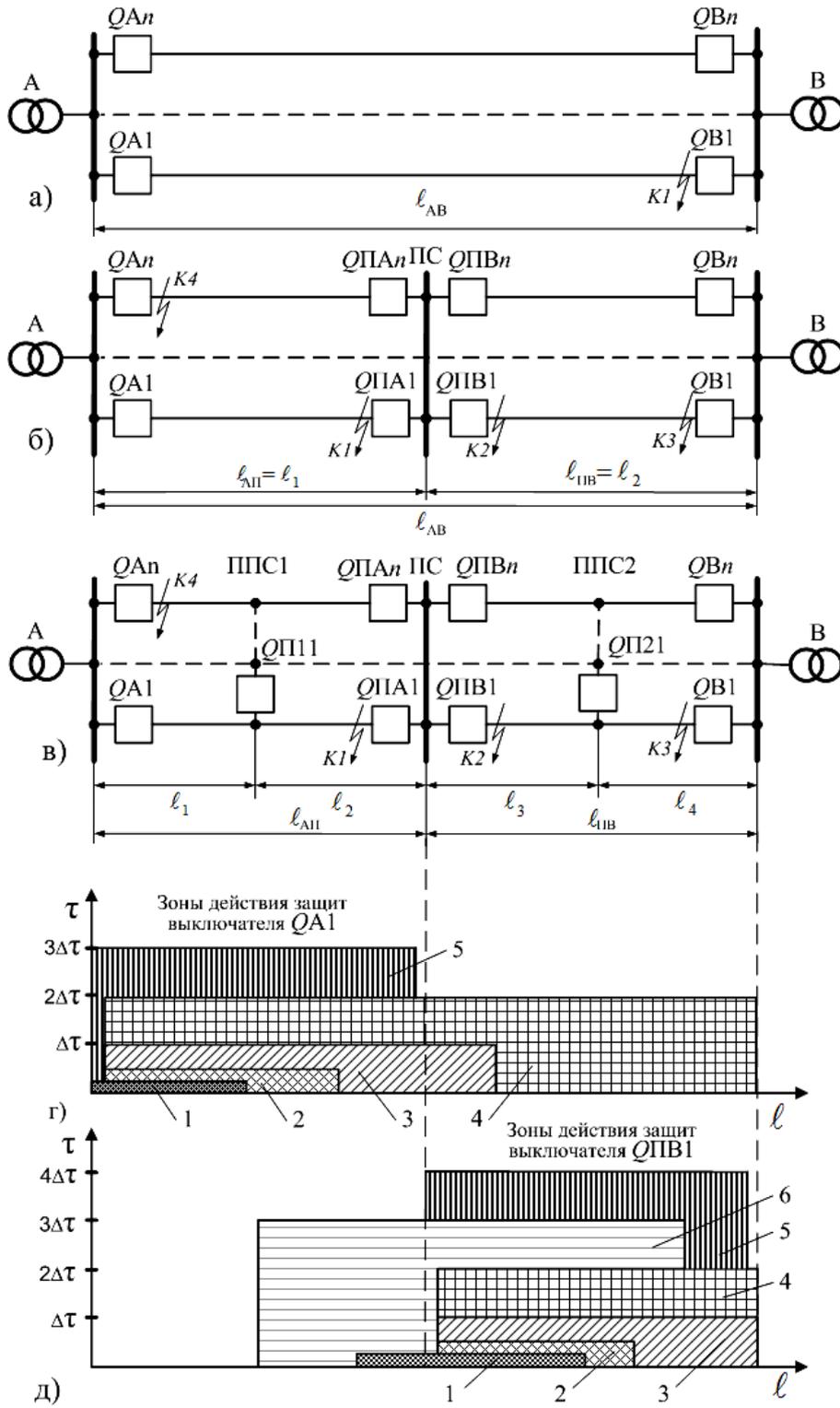
Для контактной сети главных путей систем тягового электроснабжения эти принципы реализуют комплексом защит, включающих токовую отсечку ТО, ненаправленную дистанционную защиту (только на тяговых подстанциях) и три ступени направленной дистанционной защиты ДЗ1, ДЗ2, ДЗ3. Четвертая ступень направленной дистанционной защиты ДЗ4 и защита минимального напряжения ЗМН относятся к дополнительным защитами, не влияющим на указанные принципы.

Примечание – Первая ступень направленной дистанционной защиты путем предусмотренных в комплекте защиты регулировок может быть преобразована в ступень ненаправленной дистанционной защиты (только на тяговых подстанциях системы тягового электроснабжения напряжением 25 кВ).

А.1.2. Графики селективности, удовлетворяющие условиям А.1.1, для разных схем питания (рисунки А.1 и А.2) межподстанционной зоны для защит присоединений по одному выключателю на тяговой подстанции и постах секционирования приведены на рисунке А.1, перечисления г) и д), и на рисунке А.2, перечисления б), в), г). Графики селективности защит присоединений других выключателей, подключенных к тем же шинам, что и указанные на рисунках, должны иметь аналогичный вид, но в зависимости от выбранной уставки, могут иметь несколько различающиеся длины зон действия.

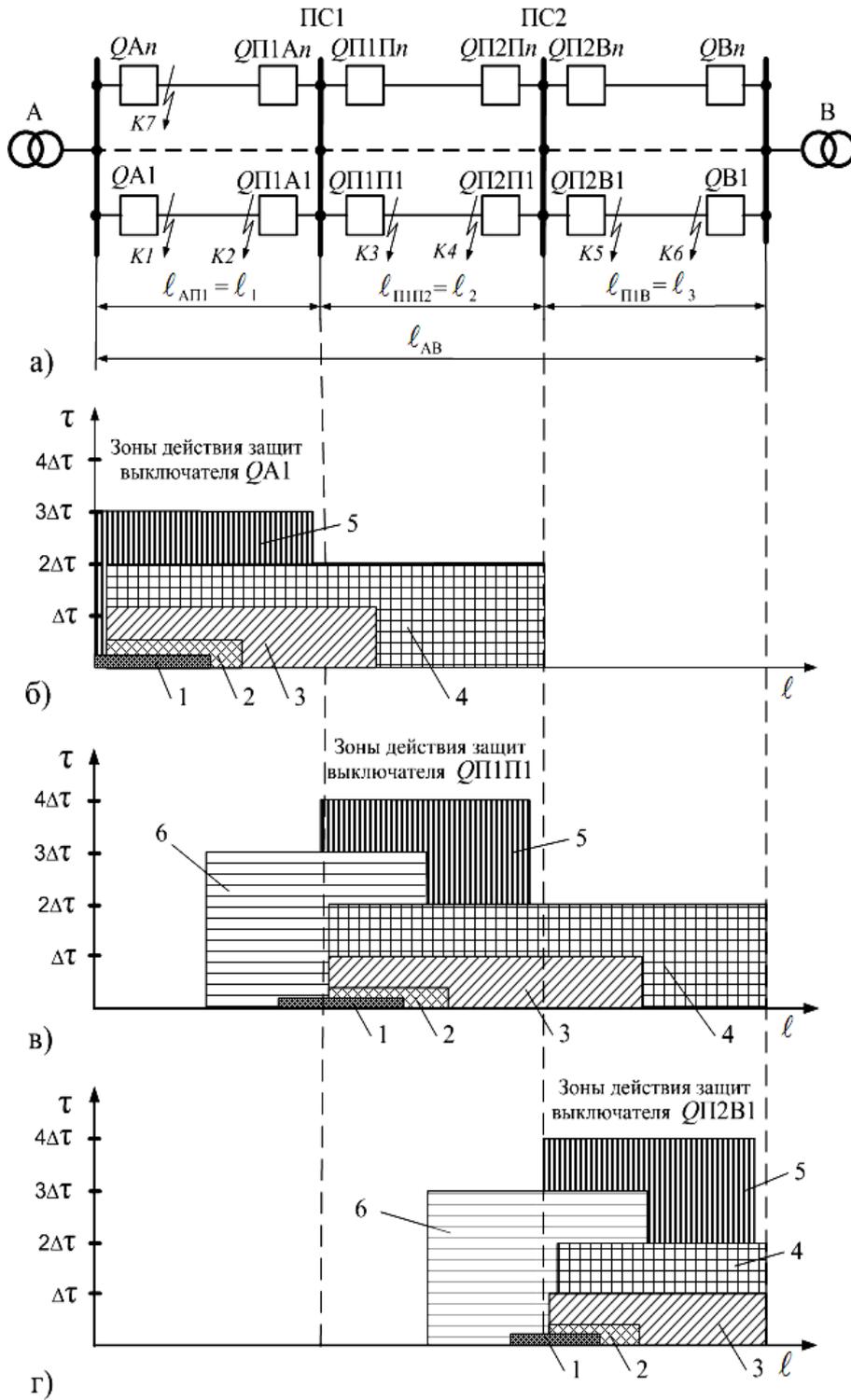
Выдержку времени τ принимают в соответствии с 4.3.

Длины зон действия защит, указанные на графиках селективности и определяемые выбранными уставками, являются приближенными из-за их нестабильности, вызванной изменениями режимов работы энергоснабжающей системы, наличия или отсутствия переходного сопротивления в месте повреждения и некоторых других причин. Нестабильность и различие длин зон действия защит допускаются в пределах, не нарушающих условия А.1.1.



1 – зона действия ТО; 2 – зона действия ДЗ1; 3 – зона действия ДЗ2;
 4 – зона действия ДЗ3; 5 – зона действия ДЗ4; 6 – зона действия ЗМН

Рисунок А.1 – Раздельная а), узловая б), параллельная в) схемы питания межподстанционной зоны и графики г) и д) селективности защит присоединений контактной сети соответственно на тяговой подстанции А и на посту секционирования ПС



1 – зона действия ТО; 2 – зона действия ДЗ1; 3 – зона действия ДЗ2; 4 – зона действия ДЗ3; 5 – зона действия ДЗ4; 6 – зона действия ЗМН

Рисунок А.2 – Схема питания межподстанционной зоны с двумя постами секционирования а) и графики б), в) и г) селективности соответственн ьзащит присоединений контактной сети на тяговой подстанции А, на посту секционирования ПС1, на посту секционирования ПС2

А.1.3. Для схемы отдельного питания путей по рисунку А.1, перечисление а), в качестве расчетной точки короткого замыкания для всех защит присоединения питающей линии контактной сети на тяговой подстанции А принимают точку $K1$.

По отношению к защищаемой зоне \square_{AB} зона действия защит должна быть:

- а) токовой отсечки – не более $0,5 \square_{AB}$;
- б) ненаправленной дистанционной защиты – не менее зоны действия токовой отсечки, но не более $0,6 \square_{AB}$;
- в) направленной дистанционной защиты:
 - 1) первой ступени – не менее зоны действия ненаправленной дистанционной защиты, но не более $0,8 \square_{AB}$;
 - 2) второй ступени – не менее $1,2 \square_{AB}$;
 - 3) третьей ступени – не менее $1,5 \square_{AB}$.

А.1.4. Для схемы узлового и параллельного питания по рисунку А.1, перечисления б) и в), для защит присоединения питающей линии контактной сети на тяговой подстанции А в качестве расчетных точек короткого замыкания принимают точки $K1$ (для основной, дополнительных и защит ближнего резерва) и $K3$ (для защиты дальнего резерва).

Зоны действия защит должны быть:

- а) токовой отсечки – не более $0,5 \square_{AP}$;
- б) ненаправленной дистанционной защиты – не менее зоны действия токовой отсечки, но не более $0,9 \square_{AP}$;
- в) направленной дистанционной защиты:
 - 1) первой ступени – не менее зоны действия ненаправленной дистанционной защиты, но не более $0,8 \square_{AP}$;
 - 2) второй ступени – не менее $1,2 \square_{AP}$;
 - 3) третьей ступени – не менее $1,5 \square_{AB}$.

Для узловой схемы питания с постами секционирования без выключателей зоны действия этих защит принимают как в А.1.3.

А.1.5. Для схемы узлового и параллельного питания по рисунку А.1, перечисления б) и в), для защит присоединения питающей линии контактной сети на посту секционирования ПС в качестве расчетной точки короткого замыкания для всех защит принимают точку $K3$.

Зоны действия защит должны быть:

- а) токовой отсечки – не более $0,5 \square_{PB}$;
- б) направленной дистанционной защиты:
 - 1) первой ступени – не менее зоны действия токовой отсечки, но не более $0,9 \square_{PB}$;
 - 2) второй ступени – не менее $1,2 \square_{PB}$;
 - 3) третьей ступени – не менее $1,5 \square_{PB}$.

А.1.6. Для схемы питания с двумя постами секционирования по рисунку А.2, перечисление а), в качестве расчетных точек короткого замыкания для защит присоединений питающих линий принимают:

а) на тяговой подстанции А:

- 1) для основной, дополнительных и защит ближнего резерва – точку $K2$;
- 2) для защиты дальнего резерва – $K4$;

б) на посту секционирования ПС1:

- 1) для основной, дополнительных и защит ближнего резерва – точку $K4$;
- 2) для защиты дальнего резерва – $K6$;

в) на посту секционирования ПС2 для всех защит – точку Кб.

Зоны действия защит должны быть:

а) на тяговой подстанции А:

1) токовой отсечки – не более $0,5 \square_1$;

2) ненаправленной дистанционной защиты – не менее зоны действия токовой отсечки, но не более $0,6 \square_1$;

3) направленной дистанционной защиты:

- первой ступени – не менее зоны действия ненаправленной дистанционной защиты, но не более $0,9 \square_1$;

- второй ступени – не менее $1,2 \square_1$;

- третьей ступени – не менее $1,5 \square_{AB}$;

б) на посту секционирования ПС1:

1) токовой отсечки – не более $0,5 \square_2$;

2) направленной дистанционной защиты:

- первой ступени – не менее зоны действия токовой отсечки, но не более $0,9 \square_2$;

- второй ступени – не менее $1,2 \square_2$;

- третьей ступени – не менее $1,5 \square_{AB}$;

б) на посту секционирования ПС2:

1) токовой отсечки – не более $0,5 \square_3$;

2) направленной дистанционной защиты:

- первой ступени – не менее зоны действия токовой отсечки, но не более $0,9 \square_3$;

- второй ступени – не менее $1,2 \square_3$;

- третьей ступени – не менее $1,5 \square_3$.

А.2. Угловые характеристики дистанционных защит

А.2.1. В защитах присоединений питающих линий контактной сети главных путей перегонов и активных постов секционирования используют направленные дистанционные защиты с различной формой угловых характеристик на комплексной плоскости сопротивлений, типичный вид которых приведен на рисунке А.3.

Угловые характеристики 1 ст ДЗ, 2 ст ДЗ и 3 ст ДЗ соответственно первой второй и третьей ступеней направленной дистанционной защиты должны обеспечивать селективность действия и чувствительность защит в межподстанционной зоне.

Угловая характеристика 4 ст ДЗ (четвертой ступени ДЗ) должна обеспечивать срабатывание защиты при коротких замыканиях через большое переходное сопротивление (больше расчетного по 6.3), например, при коротком замыкании на разземлившейся опоре.

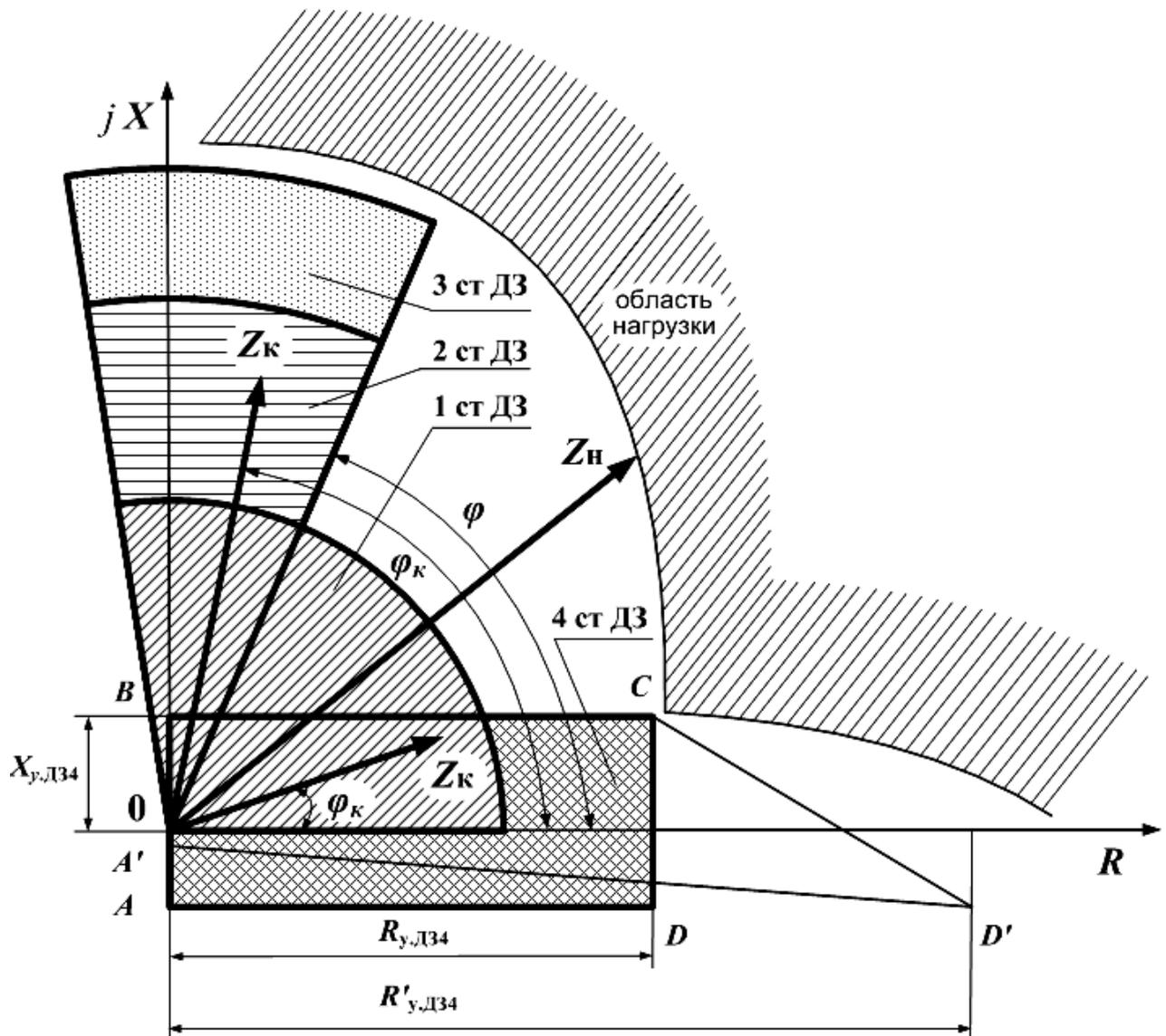


Рисунок А.3 – Угловые характеристики на комплексной плоскости сопротивлений для направленной дистанционной защиты присоединений питающих линий контактной сети

Ни одна из угловых характеристик не должна касаться области нагрузки или заходить в нее.

А.2.2. Угловую характеристику 1 ст ДЗ первой ступени выполняют в виде сектора, правый радиус которого направлен вдоль оси активных сопротивлений R комплексной плоскости сопротивлений, или повернут относительно этой оси на угол до минус 5 градусов, а левый необходимо устанавливать к ней под углом от 110 до 120 градусов. Значения этих радиусов зависят от выбранной уставки. Такую форму угловой характеристики применяют, если выполняется условие:

$$Z_{y,ДЗ1} \leq \frac{Z_{н,мин}}{K_3 K_B}, \quad (A.1)$$

где $Z_{y,ДЗ1}$ – уставка первой ступени дистанционной защиты, равная радиусу сектора 1 ст ДЗ, Ом;

$Z_{н, \min}$ – наименьшее значение характеристической величины – сопротивления, измеряемого защитой при максимальной нагрузке нормального режима, Ом;

$k_з, k_в$ – коэффициенты запаса и возврата ($k_з > 1, k_в \geq 1$).

Если это условие не выполняется, то правый радиус угловой характеристики 1 ст ДЗ поворачивают против часовой стрелки на угол φ от 50 до 55 градусов.

А.2.3. Угловые характеристики 2 ст ДЗ и 3 ст ДЗ, соответственно второй и третьей ступеней направленной дистанционной защиты, выполняют в виде секторов, длина радиусов которых зависит от выбранной уставки соответствующих ступеней. Левый радиус необходимо устанавливать под углом к оси активных сопротивлений R от 110 до 120 градусов. Угол φ правого радиуса каждой из указанных угловых характеристик отдельно принимают от 45 до 53 градусов.

Для обеспечения более уверенной отстройки от нормальных режимов работы, при которой фазовый угол нагрузки находится в диапазоне от 20 до 40 градусов, принимают более высокие значения угла φ угловой характеристики в пределах, указанных в А.2.2. Для второй ступени направленной дистанционной защиты этот угол принимают в диапазоне от 50 до 53 градусов.

При коротком замыкании через переходное сопротивление может наступить отказ из-за снижения величины φ_K вектора сопротивления Z_K (рисунок А.3), измеряемого защитой, если наступит условие $\varphi_K < \varphi$.

Для третьей ступени направленной дистанционной защиты значение угла φ угловой характеристики принимают наибольшим в диапазоне от 45 до 53 градусов при условии $\varphi < \varphi_K$, в котором значение φ_K определяют по 9.5.7.

А.2.4. Угловая характеристика 4 ст ДЗ четвертой ступени направленной дистанционной защиты имеет вид вытянутого по оси активных сопротивлений R (рисунок А.3) четырехугольника $ABCD$, размеры сторон которого можно изменять регулировкой и деформировать его форму (например, $A'BCD'$).

Уставки четвертой ступени по активной $R_{у, ДЗ4}$ и индуктивной $X_{у, ДЗ4}$ составляющим характеристической величины Z_K выбирают как по условиям чувствительности при коротком замыкании, так и по условию отстройки от режима нормальной нагрузки с фазовым углом 30 градусов и более и нагрузки с малым фазовым углом (от 5 до 7 градусов), а также от уравнительных токов значением от 150 до 200 А с фазовым углом от минус 15 до плюс 15 градусов.

При коротком замыкании через большое переходное сопротивление и наличии в межподстанционной зоне электровазов в режиме рекуперации может наступить отказ четвертой ступени.

При коротком замыкании через большое переходное сопротивление напряжение контактной сети может снизиться менее, чем в два раза. При этом силовая цепь выпрямительной установки электроваза не запирается и гармонический состав тока присоединения практически не изменяется или изменяется незначительно. Поэтому для четвертой ступени не допускается использовать пуск или торможение, зависящие от коэффициентов гармоник тока присоединения питающей линии контактной сети.

А.2.5. В защите присоединений питающих линий контактной сети на тяговых подстанциях в качестве дополнительной используют ненаправленную дистанционную защиту с угловой характеристикой в виде окружности с центром в начале координат комплексной плоскости и радиусом, равным уставке по характеристической величине, которую определяют по модулю сопротивления, измеряемого защитой.

Ненаправленная дистанционная защита перекрывает мертвую зону первой ступени направленной дистанционной защиты и является резервной для токовой отсечки.

Для исключения излишних срабатываний при коротком замыкании на шинах тяговой подстанции или на контактной сети смежного пути ненаправленную дистанционную защиту необходимо выполнять с пуском по току или напряжению.

В системе тягового электроснабжения напряжением 2×25 кВ ненаправленная защита не используется.

Формулы для вычисления расчетных электрических параметров тяговой сети

Б.1. Сопротивления тяговой сети

Б.1.1. Сопротивление 1 км тяговой сети вычисляют для определения граничных значений воздействующих на защиту величин при коротком замыкании контактной сети. По результатам расчетов должна быть составлена справочная таблица их значений применительно к особенностям выполнения контактной сети и рельсового пути (марки проводов контактной сети, расстояние между проводами и между проводами и рельсами и др.) на железных дорогах стран – членов ОСЖД.

При вычислении коротких замыканий следует использовать не формулы для определения сопротивлений 1 км тяговой сети, а табличные значения этих сопротивлений.

Формулы приведены для условия, что контактные сети на каждом пути содержат одинаковое число проводов, причем провода соответствующего назначения (контактный, усиливающий, несущий трос) выполнены аналогичными марками. Рельсы на всех путях одинаковы.

Б.1.2. Сопротивление 1 км тяговой сети $\underline{z}_{m,n}$ для m -путного участка, на котором n путей электрифицировано ($n < m$) и по контактным сетям которых протекает ток короткого замыкания, вычисляют по формуле, Ом/км:

$$\underline{z}_{m,n} = \underline{z}_{к,n} + v \underline{z}_{р,m}, \quad (\text{Б.1})$$

где $\underline{z}_{к,n}$ – результирующее индуктивно развязанное сопротивление 1 км контактных сетей n путей, по которым протекают токи одинаковые по величине и направлению, Ом/км;

$\underline{z}_{р,m}$ – результирующее полное индуктивно развязанное сопротивление 1 км рельсового пути m -путного участка, Ом/км;

v – коэффициент, учитывающий усредненную по длине рельсового пути утечку тока из рельсов в землю, примерное значение которого допускается принимать по таблице Б.1.

Таблица Б.1 – Значение коэффициента v

Наличие обратных проводов	Средние значения коэффициента v для числа путей			
	1	2	3	4
Нет	0,56	0,67	0,74	0,77
Есть	0,71	0,85	0,90	0,92

Б.1.3. Исходным для вычисления значения $\underline{z}_{к,n}$ является сопротивление контура «контактная сеть – земля» $\underline{z}_{к-з,1}$ для одного пути, значение которого определяют по формуле, Ом/км:

$$\underline{z}_{к-з,1} = \frac{1}{\frac{q_{п}}{\underline{z}_{п-з} - \underline{z}_{м,q}} + \frac{q_{т}}{\underline{z}_{т-з} - \underline{z}_{м,q}} + \frac{q_{у}}{\underline{z}_{у-з} - \underline{z}_{м,q}}} + \underline{z}_{м,q}, \quad (\text{Б.2})$$

где $\underline{z}_{п-з}$ – сопротивление контура «контактный провод – земля», Ом/км;
 $\underline{z}_{т-з}$ – сопротивление контура «несущий трос – земля», Ом/км;
 $\underline{z}_{у-з}$ – сопротивление контура «усиливающий провод – земля», Ом/км;
 $\underline{z}_{м,q}$ – среднее сопротивление взаимной индукции для q проводов контактной сети одного пути, Ом/км;

$q_{п}$, $q_{т}$, $q_{у}$ – соответственно число контактных проводов, несущих тросов и усиливающих проводов в контактной сети одного пути.

Общее число проводов контактной сети одного пути вычисляют по формуле:

$$q = q_{п} + q_{т} + q_{у}. \quad (\text{Б.3})$$

Разность сопротивлений вида $\underline{z}_{i-з} - \underline{z}_{м,q}$, входящих в формулу (Б.2), в которой в качестве i -го провода принимают контактный провод «п», несущий трос «т» или усиливающий провод «у», вычисляют по формуле, Ом/км:

$$\underline{z}_{i-з} - \underline{z}_{м,q} = r_i + j \left(x_{внт,i} + 0,0628 \ln \frac{\bar{D}_q}{R_i \cdot 10^{-3}} \right), \quad (\text{Б.4})$$

где r_i – активное сопротивление i -го провода, Ом/км;
 $x_{внт,i}$ – внутреннее индуктивное сопротивление i -го провода, Ом/км;
 R_i – расчетный радиус i -го провода, мм;
 \bar{D}_q – среднее геометрическое расстояние между проводами контактной сети одного пути, вычисляемое по выражению, м:

$$\bar{D}_q = \left(\text{Произведение расстояний между каждой парой проводов контактной сети одного пути} \right)^{\frac{2}{q(q-1)}}. \quad (\text{Б.5})$$

Примечание – При определении расстояний между несущим тросом и другими проводами провисающий несущий трос заменяется прямолинейным проводом, расположенным на расстоянии 1/3 стрелы провеса выше наинизшей точки несущего троса.

Значение сопротивления $\underline{z}_{м,q}$ вычисляют по формуле, Ом/км:

$$\underline{z}_{м,q} = 0,05 + j0,0628 \ln \frac{93}{\bar{D}_q \sqrt{\gamma_3}}, \quad (\text{Б.6})$$

где γ_3 – проводимость земли, См/м.

Для контактной сети, состоящей из одного контактного провода и одного несущего троса, вместо (Б.2) используют формулу, Ом/км:

$$\underline{z}_{к-з,1} = \frac{(\underline{z}_{п-з} - \underline{z}_{м,q})(\underline{z}_{т-з} - \underline{z}_{м,q})}{(\underline{z}_{п-з} - \underline{z}_{м,q}) + (\underline{z}_{т-з} - \underline{z}_{м,q})} + \underline{z}_{м,q}, \quad (\text{Б.7})$$

а в формулах (Б.4) и (Б.6) принимают \bar{D}_q равным расстоянию $D_{пт}$ между контактным проводом и несущим тросом.

Значение r_i для проводов из цветного металла допускается принимать по справочным данным как сопротивления для постоянного тока. Значение внутреннего индуктивного сопротивления $x_{внт,i}$ для таких проводов принимают равным 0,016

Ом/км.

Проводимость земли γ_3 для разных районов изменяется, как правило, от 10^{-3} См/м (сухой грунт) до 10^{-2} См/м (влажный грунт). Допускается принимать в расчетах $\gamma_3 = 5 \cdot 10^{-3}$ См/м. Для участков, проходящих по особо сырым или скальным грунтам, значение γ_3 принимают в соответствии с местными условиями.

Б.1.4. Значение индуктивно развязанного сопротивления $\underline{z}_{к,n}$ для контактных сетей n путей вычисляют по формуле, Ом/км:

$$\underline{z}_{к,n} = \frac{1}{n} \left(\underline{z}_{к-3,1} - 0,05 - j0,0628 \ln \frac{93 \overline{D}_{к,a}^{n-1}}{\overline{D}_h^n \sqrt{\gamma_3}} \right), \quad (\text{Б.8})$$

где $\overline{D}_{к,a}$ – среднее геометрическое расстояние между проводами контактных сетей n путей, м;

\overline{D}_h – среднее геометрическое расстояние между проводами контактных сетей n путей и рельсовой цепью m -путного участка, м.

Значения $\overline{D}_{к,a}$ и \overline{D}_h вычисляют по выражениям, м:

$$\overline{D}_{к,a} = \left(\begin{array}{l} \text{Произведение расстояний от каждого из } q \text{ проводов} \\ \text{контактной сети одного пути до каждого} \\ \text{из проводов контактных сетей остальных } n-1 \text{ путей} \end{array} \right)^{\frac{2}{q^2 n(n-1)}}, \quad (\text{Б.9})$$

$$\overline{D}_h = \left(\begin{array}{l} \text{Произведение расстояний от каждого провода} \\ \text{контактных сетей } n \text{ путей до каждого из проводников} \\ \text{(рельсов и обратных проводов)} \\ \text{рельсовой цепи } m \text{- путного участка} \end{array} \right)^{\frac{1}{smqn}}, \quad (\text{Б.10})$$

в которых q и s принимают соответственно по формулам (Б.3) и (Б.12).

Б.1.5. Исходным для вычисления значения $\underline{z}_{р,m}$ является сопротивление контура «рельсы – земля» $\underline{z}_{р-3,1}$ для одного пути, значение которого определяют по формуле, Ом/км:

$$\underline{z}_{р-3,1} = \frac{1}{\frac{2}{\underline{z}_{р-3} - \underline{z}_{м,s}} + \frac{q_0}{\underline{z}_{о-3} - \underline{z}_{м,s}}} + \underline{z}_{м,s}, \quad (\text{Б.11})$$

где $\underline{z}_{р-3}$ – сопротивление контура «один рельс – земля», Ом/км;

$\underline{z}_{о-3}$ – сопротивление контура «один обратный провод – земля», Ом/км;

$\underline{z}_{м,s}$ – среднее сопротивление взаимной индукции для s проводников в рельсовой цепи (рельсов и обратных проводов) одного пути, Ом/км.

Общее число проводников s одного рельсового пути равно:

$$s = 2 + s_0, \quad (\text{Б.12})$$

где s_0 – число обратных проводов, соединенных с рельсами для одного пути, Ом/км.

Разность сопротивлений вида $\underline{z}_{i-3} - \underline{z}_{м,s}$, входящих в формулу (Б.11), в которой в качестве i -го провода принимают один рельс «р» или один обратный провод «о», вычисляют по формуле, Ом/км:

$$\underline{z}_{i-3} - \underline{z}_{M,s} = r_i + j \left(x_{\text{внт},i} + 0,0628 \ln \frac{\pi \bar{D}_s}{\Pi_p \sqrt{\gamma_3}} \right), \quad (\text{Б.13})$$

где Π_p – периметр поперечного сечения рельса, м;

\bar{D}_s – среднее геометрическое расстояние между s проводниками одного рельсового пути, вычисляемое по выражению, м:

$$\bar{D}_s = \left(\frac{\text{Произведение расстояний между каждой парой проводников рельсовой цепи одного пути}}{s(s-1)} \right)^{\frac{2}{s-1}}. \quad (\text{Б.14})$$

Значение $\underline{z}_{M,s}$ вычисляют по формуле (Б.6), в которой вместо \bar{D}_q используют параметр \bar{D}_s .

Для рельсовой цепи без обратных проводов вместо (Б.11) используют формулу, Ом/км:

$$\underline{z}_{p-3,1} = \frac{\underline{z}_{p-3} + \underline{z}_{M,s}}{2}, \quad (\text{Б.15})$$

и в формулах (Б.6) и (Б.13) принимают \bar{D}_s равным расстоянию D_{pp} между двумя рельсами одного пути.

Сопротивления рельсов $r_i = r_p$ и $x_{\text{внт},i} = x_{\text{внт},p}$ нелинейно зависят от тока. В расчетах параметров удаленного короткого замыкания для выбора уставок защит принимают указанные сопротивления постоянными, соответствующими току в рельсе, равном 300 А. При отсутствии таких сведений допускается для рельсов массой от 50 до 65 кг принимать усредненное значение:

$$r_p = 0,180 \text{ Ом/км}, \quad x_{\text{внт},p} = 0,135 \text{ Ом/км}.$$

Сопротивления обратных проводов $r_i = r_o$ и $x_{\text{внт},i} = x_{\text{внт},o}$ принимают как для проводов из цветных металлов по Б.1.3.

Значения проводимости земли γ_3 принимают как указано в Б.1.3.

Б.1.6. Значение индуктивно развязанного сопротивления $\underline{z}_{p,m}$ 1 км рельсовой цепи m -путного участка вычисляют по формуле, Ом/км:

$$\underline{z}_{p,m} = \frac{1}{m} \left(\underline{z}_{p-3,1} - 0,05 - j0,0628 \ln \frac{93 \bar{D}_{p,a}^{m-1}}{D_h^m \sqrt{\gamma_3}} \right), \quad (\text{Б.16})$$

где $\bar{D}_{p,a}$ – среднее геометрическое расстояние между проводниками (рельсами и обратными проводами) рельсовой цепи m -путного участка, вычисляемое по выражению, м:

$$\bar{D}_{p,a} = \left(\frac{\text{Произведение расстояний от каждого проводника одного рельсового пути до каждого из проводников остальных } m-1 \text{ рельсовых цепей}}{s^{2m(m-1)}} \right)^{\frac{2}{s-1}}. \quad (\text{Б.17})$$

Значение s принимают по (Б.12)

Б.1.7. Значение индуктивно развязанного сопротивления $\underline{z}_{-1,m}$ контактной сети одного пути при условии, что по контактным сетям остальных $n-1$ путей протекает суммарный ток такой же величины, как и по контактной сети указанного одного пути, но противоположного направления, вычисляют по формуле, Ом/км:

$$\underline{z}_{-1,n} = \underline{z}_{к-3,1} - 0,05 - j0,0628 \ln \frac{93}{D_{к,a} \sqrt{\gamma_3}}, \quad (\text{Б.18})$$

в которой значение $\overline{D}_{к,a}$ находят по формуле (Б.9).

Б.1.8. Значение индуктивно развязанного сопротивления $\underline{z}'_{р,m}$ рельсовой цепи m -путного участка, учитывающего кроме прочего взаимные индуктивные связи между проводами контактной сети и между контактными сетями n путей и рельсовой цепью m -путного участка, вычисляют по формуле, Ом/км:

$$\underline{z}'_{р,m} = \nu \underline{z}_{р,m} + j0,0628 \ln \frac{\overline{D}_h}{D_{к,a}}. \quad (\text{Б.19})$$

Б.2. Тяговые сети 2×25 кВ

Б.2.1. Электрические параметры 1 км тяговой сети 2×25 кВ, вычисляемые по приведенным формулам, являются приближенными, однако степень их приближения достаточна для целей определения граничных значений воздействующих на защиту величин при коротком замыкании контактной сети. Особенности вычисления этих параметров соответствуют Б.1.1.

Б.2.2. Индуктивно развязанное сопротивление $\underline{z}_к$ 1 км контактной подвески вычисляют по формулам (Б.6) и (Б.7), Ом/км:

$$\underline{z}_к = \frac{(\underline{z}_{п-3} - \underline{z}_{м,q})(\underline{z}_{т-3} - \underline{z}_{м,q})}{(\underline{z}_{п-3} - \underline{z}_{м,q}) + (\underline{z}_{т-3} - \underline{z}_{м,q})} - 0,05 - j0,0628 \ln \frac{93 D_q}{D_{кф} \overline{D}_{h,к} \sqrt{\gamma_3}}, \quad (\text{Б.20})$$

где $\underline{z}_{п-3}$ – сопротивление контура «контактный провод – земля», Ом/км;

$\underline{z}_{т-3}$ – сопротивление контура «несущий трос – земля», Ом/км;

$\underline{z}_{м,q}$ – сопротивление взаимной индукции между контурами «контактная подвеска – земля» и «несущий трос – земля», Ом/км;

D_q – расстояние между контактными проводом и несущим тросом, м;

$\overline{D}_{кф}$ – среднее геометрическое расстояние между проводами контактной подвески и проводниками питающего провода, м;

$\overline{D}_{h,к}$ – среднее геометрическое расстояние между проводами контактной подвески одного пути ($n=1$) и рельсами, вычисляемое по формуле (Б.10).

Разность сопротивлений вида $\underline{z}_{i-3} - \underline{z}_{м,q}$, входящих в формулу (Б.20), вычисляют по выражению (Б.4) при \overline{D}_q равном расстоянию D_q между контактными проводом и несущим тросом. Значение $\overline{D}_{кф}$ вычисляют по формуле, м:

$$\overline{D}_{кф} = \left(\begin{array}{l} \text{Произведение расстояний от каждого из } q_k \text{ проводов} \\ \text{контактной подвески одного пути до каждого из } q_\phi \\ \text{проводников питающего провода} \end{array} \right)^{\frac{1}{q_k q_\phi}}. \quad (\text{Б.21})$$

Б.2.3. Индуктивно развязанное сопротивление \underline{z}_ϕ 1 км питающего провода, состоящего из одного, двух или нескольких отдельных проводников (проводов) вычисляют по формуле, Ом/км:

$$\underline{z}_{\phi} = \frac{\underline{z}_{\phi-3} - \underline{z}_{M,\phi}}{q_{\phi}} - 0,05 - j0,0628 \ln \frac{93\bar{D}_{\phi}}{\bar{D}_{к\phi}\bar{D}_{h,\phi}\sqrt{\gamma_3}}, \quad (\text{Б.22})$$

где $\underline{z}_{\phi-3}$ – сопротивление контура «питающий проводник – земля» для одного проводника питающего провода одного пути, Ом/км;

$\underline{z}_{M,\phi}$ – среднее сопротивление взаимной индукции между проводниками питающего провода, Ом/км;

q_{ϕ} – число проводников (отдельных проводов) питающего провода;

\bar{D}_{ϕ} – среднее геометрическое расстояние между проводниками питающего провода, м;

$\bar{D}_{к\phi}$ – среднее геометрическое расстояние между проводами контактной подвески и питающего провода, м;

$\bar{D}_{h,\phi}$ – среднее геометрическое расстояние между проводниками питающего провода и рельсами, м.

Разность сопротивлений, входящих в выражение (Б.22) вычисляют по формуле, Ом/км:

$$\underline{z}_{\phi-3} - \underline{z}_{M,\phi} = r_{\phi} + j \left(x_{\text{внт}} + 0,0628 \ln \frac{\bar{D}_{\phi}}{R_{\phi} \cdot 10^{-3}} \right), \quad (\text{Б.23})$$

где r_{ϕ} – активное сопротивление одного проводника (провода) питающего провода, Ом/км;

$x_{\text{внт}}$ – внутреннее индуктивное сопротивление одного проводника питающего провода, принимаемое равным 0,016 Ом/км для проводов из цветного металла, Ом/км;

R_{ϕ} – расчетный радиус одного проводника питающего провода, м.

Значения \bar{D}_{ϕ} и $\bar{D}_{h,\phi}$ вычисляют по выражениям, м:

$$\bar{D}_{\phi} = \left(\text{Произведение расстояний между каждой парой проводников питающего провода} \right)^{\frac{2}{q_{\phi}(q_{\phi}-1)}}, \quad (\text{Б.24})$$

$$\bar{D}_{h,\phi} = \left(\text{Произведение расстояний от каждого из проводников питающего провода одного пути до каждого из рельсов } m \text{ - путевого участка} \right)^{\frac{1}{2q_{\phi}m}}, \quad (\text{Б.25})$$

где q_{ϕ} – число проводников питающего провода.

Значение $\bar{D}_{к\phi}$ вычисляют по выражению (Б.21).

Если питающий провод состоит из одного проводника, то его индуктивно развязанное сопротивление вычисляют по формуле, Ом/км:

$$\underline{z}_{\phi} = r_{\phi} - 0,05 + j \left(x_{\text{внт}} - 0,0628 \ln \frac{93R_{\phi}}{\bar{D}_{к\phi}\bar{D}_{h,\phi}\sqrt{\gamma_3}} \right). \quad (\text{Б.26})$$

Б.2.4. Эквивалентное сопротивление $\underline{z}_{с,э}$ контактной сети вычисляют по формуле, Ом/км:

$$\underline{z}_{c,э} = \frac{\underline{z}_k \underline{z}_\phi}{\underline{z}_k + \underline{z}_\phi}, \quad (\text{Б.27})$$

в которой значение \underline{z}_k вычисляют по формуле (Б.20), а значение \underline{z}_ϕ – по формулам (Б.22) или (Б.26).

Б.2.5. Сопротивление рельсовой цепи вычисляют по формуле, Ом/км:

$$\underline{z}_p = v \underline{z}_{p,m} + j0,0628 \ln \frac{\overline{D}_h}{D_{кф}}, \quad (\text{Б.28})$$

где \overline{D}_h – среднее геометрическое расстояние между проводами контактной сети и рельсами, вычисляемое по формуле, м:

$$\overline{D}_h = \left(\begin{array}{l} \text{Произведение расстояний от каждого из } q_k \text{ проводов контактной} \\ \text{подвески и каждого из } q_\phi \text{ проводников питающего провода} \\ \text{до каждого из рельсов } m \text{- путного участка} \end{array} \right)^{\frac{1}{2m(q_k+q_\phi)}}. \quad (\text{Б.29})$$

Б.2.6. При удаленных коротких замыканиях доля тока $\alpha_{к,1}$ в контактной подвеске по отношению к алгебраической сумме токов контактной подвески и питающего провода на участке длиной \square_1 между тяговой подстанцией и ближайшим автотрансформатором определяют по формуле:

$$\alpha_{к,1} = \left| \frac{m \underline{Z}''_T + \underline{z}_\phi \ell_1}{2m \underline{Z}''_T + (\underline{z}_k + \underline{z}_\phi) \ell_1} \right|, \quad (\text{Б.30})$$

где \underline{Z}''_T – сопротивление лучей схемы замещения трансформатора, приведенное к напряжению его вторичных полуобмоток, определяемое в соответствии с 7.2, Ом;

Долю тока α_k в контактной подвеске на неповрежденном участке между смежными автотрансформаторами вычисляют по формуле:

$$\alpha_k = \left| \frac{\underline{z}_\phi}{\underline{z}_k + \underline{z}_\phi} \right|. \quad (\text{Б.31})$$

Долю β_k суммарного тока контактной сети в рельсах на неповрежденных участках между смежными автотрансформаторами вычисляют по формуле:

$$\beta_k = \alpha_k - 1. \quad (\text{Б.32})$$

Долю γ_k суммарного тока контактной сети в полуобмотках смежных автотрансформаторов, ограничивающих участок с поврежденной контактной сетью, определяют по формуле:

$$\gamma_k = \alpha_k (1 - \alpha_k). \quad (\text{Б.33})$$

**Параметры тяговой сети напряжением 25 кВ
Российских железных дорог**

Таблица В.1 – Значения погонных сопротивлений z_{mn} тяговой сети ТП

Шифр сопротивления	Значения усредненных ¹⁾ погонных сопротивлений тяговой сети, Ом/км, для контактной сети вида ²⁾		
	ТП	ТПУ	ТПУЭ
r_{11}	0,224	0,134	0,125
x_{11}	0,464	0,361	0,272
z_{11}	0,515	0,385	0,300
r_{21}	0,204	0,114	0,109
x_{21}	0,423	0,320	0,229
z_{21}	0,470	0,339	0,254
r_{22}	0,117	0,072	0,067
x_{22}	0,278	0,222	0,151
z_{22}	0,301	0,234	0,165
r_{31}	0,196	0,106	0,101
x_{31}	0,400	0,299	0,207
z_{31}	0,446	0,317	0,230
r_{32}	0,109	0,064	0,059
x_{32}	0,255	0,202	0,129
z_{32}	0,278	0,212	0,142
r_{33}	0,079	0,047	0,042
x_{33}	0,195	0,165	0,095
z_{33}	0,211	0,172	0,104
$r_{-1,2}$	0,175	0,085	0,085
$x_{-1,2}$	0,287	0,204	0,158
$z_{-1,2}$	0,336	0,221	0,179
$r_{-1,3}$	0,175	0,085	0,085
$x_{-1,3}$	0,298	0,198	0,168
$z_{-1,3}$	0,346	0,215	0,188
$r'_{p,2}$	0,029	0,029	0,024
$x'_{p,2}$	0,136	0,116	0,071
$z'_{p,2}$	0,139	0,119	0,075

Окончание таблицы В.1

Шифр сопротивления	Значения погонных сопротивлений тяговой сети, Ом/км, для контактной сети вида ²⁾		
	ТП	ТПУ	ТПУЭ
$r'_{p,3}$	0,021	0,021	0,016
$x'_{p,3}$	0,102	0,101	0,039
$z'_{p,3}$	0,104	0,103	0,042
¹⁾ Усреднение выполнено для контактных проводов МФ100, НлОФ100, Брф100, несущих тросов ПБСМ70, ПБСМ95, ПБСА50/70, усиливающего и обратного проводов А185.			
²⁾ Обозначения видов контактной сети: ТП – контактная сеть содержит несущий трос (Т) и контактный провод (П); ТПУ – контактная сеть содержит несущий трос (Т), контактный провод (П) и усиливающий (У) провод; ТПУЭ – контактная сеть содержит несущий трос (Т), контактный провод (П), усиливающий (У) и экранирующий (Э) провода.			

Таблица В.2 – Значения погонных сопротивлений тяговой сети ТП

Шифр сопротивления	Значения погонных сопротивлений тяговой сети ТП, Ом/км, для номера ¹⁾ контактной подвески						
	1	2	3	4	5	6	7
r_{11}	0,212	0,206	0,196	0,180	0,166	0,141	0,143
x_{11}	0,469	0,467	0,441	0,431	0,424	0,421	0,413
z_{11}	0,515	0,510	0,483	0,467	0,455	0,444	0,437
r_{21}	0,192	0,186	0,176	0,160	0,146	0,121	0,123
x_{21}	0,435	0,433	0,407	0,397	0,390	0,387	0,371
z_{21}	0,475	0,471	0,443	0,428	0,416	0,405	0,391
r_{22}	0,111	0,108	0,103	0,095	0,088	0,075	0,076
x_{22}	0,286	0,285	0,272	0,267	0,263	0,263	0,253
z_{22}	0,307	0,315	0,291	0,283	0,277	0,273	0,264
$r_{-1,2}$	0,163	0,157	0,147	0,131	0,117	0,092	0,094
$x_{-1,2}$	0,292	0,290	0,264	0,254	0,254	0,251	0,236
$z_{-1,2}$	0,334	0,330	0,302	0,286	0,280	0,267	0,254
$r'_{p,2}$	0,029						
$x'_{p,2}$	0,136						
$z'_{p,2}$	0,139						
¹⁾ Номерам контактной подвески соответствуют следующие марки проводов: 1 – ПБСМ70+МФ100, 2 – ПБСМ95+МФ100 и ПБСМ50/70+МФ100, 3 – МСН70+МФ100, 4 – МСН95+МФ100, 5 – МСН120+МФ100, 6 – М95+МФ100, 7 – М120+МФ100.							

Таблица В.3 – Значения погонных сопротивлений тяговой сети ТПУ

Шифр сопротивления	Значения погонных сопротивлений тяговой сети ТПУ с усиливающим проводом марки А185, Ом/км, для номера ¹⁾ контактной подвески						
	1	2	3	4	5	6	
r_{11}	0,134	0,132	0,130	0,124	0,118	0,107	0,103
x_{11}	0,356	0,355	0,344	0,339	0,336	0,334	0,324
z_{11}	0,380	0,379	0,368	0,361	0,356	0,351	0,340
r_{21}	0,114	0,112	0,110	0,104	0,098	0,087	0,083
x_{21}	0,320	0,319	0,308	0,303	0,300	0,298	0,273
z_{21}	0,340	0,338	0,327	0,320	0,316	0,310	0,285
r_{22}	0,072	0,071	0,070	0,065	0,064	0,058	0,056
x_{22}	0,218	0,217	0,212	0,210	0,208	0,207	0,199
z_{22}	0,230	0,228	0,223	0,220	0,218	0,215	0,207
$r_{-1,2}$	0,085	0,083	0,081	0,075	0,069	0,058	0,054
$x_{-1,2}$	0,204	0,203	0,192	0,187	0,184	0,182	0,167
$z_{-1,2}$	0,221	0,219	0,208	0,201	0,197	0,191	0,176
$r'_{p,2}$	0,029						
$x'_{p,2}$	0,116						
$z'_{p,2}$	0,120						
¹⁾ Номерам контактной подвески соответствуют следующие марки проводов: 1 – ПБСМ70+МФ100, 2 – ПБСМ95+МФ100 и ПБСМ50/70+МФ100, 3 – МСН70+МФ100, 4 – МСН95+МФ100, 5 – МСН120+МФ100, 6 – М95+МФ100, 7 – М120+МФ100.							

Таблица В.4 – Значения погонных сопротивлений тяговой сети ТПУЭ

Шифр сопротивления	Значения погонных сопротивлений тяговой сети ТПУЭ с усиливающим и экранирующим проводами марки А185, Ом/км, для номера ¹⁾ контактной подвески					
	1	2	3	4	5	6
r_{11}	0,125	0,123	0,121	0,115	0,109	0,098
x_{11}	0,271	0,270	0,259	0,254	0,251	0,249
z_{11}	0,298	0,297	0,282	0,279	0,274	0,268
r_{21}	0,109	0,107	0,105	0,099	0,093	0,082
x_{21}	0,250	0,249	0,238	0,233	0,230	0,228
z_{21}	0,273	0,271	0,260	0,253	0,248	0,242
r_{22}	0,067	0,066	0,065	0,060	0,059	0,053
x_{22}	0,160	0,160	0,155	0,153	0,151	0,150
z_{22}	0,173	0,173	0,168	0,164	0,162	0,159
$r_{-1,2}$	0,085	0,083	0,081	0,075	0,069	0,058
$x_{-1,2}$	0,223	0,222	0,211	0,206	0,203	0,201
$z_{-1,2}$	0,239	0,237	0,226	0,219	0,214	0,209
$r'_{p,2}$	0,024					
$x'_{p,2}$	0,071					
$z'_{p,2}$	0,075					
¹⁾ Номерам контактной подвески соответствуют следующие марки проводов: 1 – ПБСМ70+МФ100, 2 – ПБСМ95+МФ100 и ПБСМ50/70+МФ100, 3 – МСН70+МФ100, 4 – МСН95+МФ100, 5 – МСН120+МФ100, 6 – М95+МФ100.						

Таблица В.5 – Погонные сопротивления тросов группового заземления

Марка провода	Активная r и индуктивная x составляющие и модуль z индуктивно развязанного сопротивления провода, Ом/км		
	r	x	z
АС 70/11	0,549	0,466	0,720
АС 95/16	0,450	0,439	0,629
АС 120/27	0,253	0,416	0,487
АС 150/34	0,201	0,408	0,455
АС 185/43, А185	0,158	0,400	0,430
А95	0,308	0,428	0,527
А120	0,246	0,421	0,488
А150	0,194	0,414	0,457
ПБСМ 70	0,794	0,550	0,966
ПБСМ 95	0,724	0,561	0,916
ПБСА 50/70	0,690	0,574	0,898

Таблица В.6 – Значения погонных сопротивлений питающих линий напряжением 25 кВ

Число и марка проводов	Значение активной $r_{пл}$ и индуктивной $x_{пл}$ составляющих, а также полного сопротивления $z_{пл}$ питающих линий, Ом/км		
	$r_{пл}$	$x_{пл}$	$z_{пл}$
A150	0,194	$\frac{0,448}{0,559}$	$\frac{0,488}{0,532}$
2×A150	0,097	$\frac{0,370}{0,481}$	$\frac{0,383}{0,491}$
3×A150	0,065	$\frac{0,330}{0,441}$	$\frac{0,336}{0,446}$
4×A150	0,049	$\frac{0,320}{0,431}$	$\frac{0,324}{0,434}$
A185	0,154	$\frac{0,441}{0,552}$	$\frac{0,468}{0,577}$
2×A185	0,079	$\frac{0,370}{0,481}$	$\frac{0,378}{0,487}$
3×A185	0,053	$\frac{0,330}{0,441}$	$\frac{0,334}{0,444}$
4×A185	0,040	$\frac{0,320}{0,431}$	$\frac{0,323}{0,433}$
Примечание – Числитель – при размещении питающих линий на опорах контактной сети, знаменатель – при размещении питающих линий на самостоятельных опорах за пределами станционных путей			

**Параметры тяговой сети тяговой сети напряжением 2×25 кВ
Российских железных дорог**

Таблица Г.1 – Значения сопротивлений z_k и z_ϕ

Марка проводов	Индуктивно развязанные сопротивления ¹⁾ контактной подвески z_k и питающей линии z_ϕ , Ом/км		
	r_k, r_ϕ	x_k, x_ϕ	z_k, z_ϕ
ПБСМ95+МФ00	0,175	<u>0,328</u> 0,300	<u>0,372</u> 0,347
М95+МФ100	0,102	<u>0,280</u> 0,252	<u>0,298</u> 0,272
A120	0,246	<u>0,468</u> 0,479	<u>0,529</u> 0,538
A150	0,194	<u>0,461</u> 0,472	<u>0,500</u> 0,510
A185	0,157	<u>0,455</u> 0,466	<u>0,481</u> 0,492
2A95	0,154	<u>0,398</u> 0,408	<u>0,426</u> 0,436
2A120	0,123	<u>0,390</u> 0,401	<u>0,409</u> 0,419

¹⁾Числитель – для однопутного, знаменатель – для двухпутного участков

Таблица Г.2 – Усредненные значения сопротивлений рельсовой цепи

Число путей	Индуктивно развязанные сопротивления рельсовой цепи, Ом/км		
	r_p	x_p	z_p
1	0,048	0,149	0,157
2	0,029	0,113	0,117

Таблица Г.3 – Параметры эквивалентной контактной сети

Марка проводов контактной сети	Марка питающего провода	Параметры эквивалентной контактной сети системы 2×25 кВ, приведенной к системе переменного тока 25 кВ					
		$r_{c,э},$ Ом/км	$x_{c,э},$ Ом/км	$z_{c,э},$ Ом/км	α_k	β_k	γ_k
ПБСМ95+ +МФ100	A120	0,103	0,178	0,206	0,605	0,210	0,239
	A150	0,095	0,177	0,201	0,593	0,186	0,241
	A185	0,087	0,178	0,198	0,583	0,166	0,243
	2A95	0,085	0,167	0,187	0,552	0,104	0,247
	2A120	0,078	0,167	0,184	0,543	0,086	0,248
М95+ +МФ100	A120	0,073	0,157	0,173	0,665	0,330	0,223
	A150	0,067	0,158	0,171	0,650	0,300	0,228
	A185	0,062	0,157	0,169	0,641	0,282	0,230
	2A95	0,061	0,149	0,161	0,611	0,222	0,238
	2A120	0,056	0,148	0,159	0,602	0,204	0,240