

ОРГАНИЗАЦИЯ СОТРУДНИЧЕСТВА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ (ОСЖД)

I издание

Разработано экспертами Комиссии ОСЖД по инфраструктуре и подвижному составу, 3-5 сентября 2013 г.,
Комитет ОСЖД, г. Варшава

Утверждено совещанием Комиссии ОСЖД по инфраструктуре и подвижному составу, 28 – 31 октября 2013 г.,
Комитет ОСЖД, г. Варшава

Дата вступления в силу: 31 октября 2013 г.

P 606

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

Содержание

1. Общие положения	3
2. Основные требования к защитам	4
2.1. Общие требования	4
2.2. Выдержка времени	6
2.3. Показатели устойчивости функционирования	6
3. Расчетные параметры нормального режима	10
3.1. Общие положения	10
3.2. Пусковые токи поездов	11
3.3. Средние токи присоединений	12
3.4. Граничные значения воздействующих величин тока, напряжения и сопротивления	15
4. Схемы питания и расчетные схемы	18
4.1. Схемы питания	18
4.2. Расчетные схемы	24
4.3. Параметры схем питания и замещения	25
4.4. Вычисление параметров короткого замыкания для расчетных схем	32
5. Выбор уставок защит	35
5.1. Общие положения	35
5.2. Максимальная импульсная токовая защита	41
5.3. Токовая отсечка	43
5.4. Максимальная токовая защита прямого направления	45
5.5. Максимальная токовая защита обратного направления	47
5.6. Защита минимального напряжения	48
5.7. Дистанционная защита	50
5.8. Защита по скорости нарастания тока	53
5.9. Защита по приращению тока	55
5.10. Тепловая и квазитепловая защиты	58
5.11. Выбор уставок защиты при профилактическом подогреве проводов и плавке гололеда	66

1. Общие положения

1.1. Настоящий Порядок следует применять на железных дорогах, электрифицированных по системе постоянного тока, стран – членов ОСЖД.

1.2. Порядок распространяется на все устройства, комплекты и полный состав защит от токов короткого замыкания в тяговой сети постоянного тока вне зависимости от их конструктивного выполнения, реагирующих на следующие воздействующие величины: ток, напряжение, отношение напряжения к току, скорость нарастания и приращение тока, а также температуру проводов.

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

Для селективных защит этими условиями являются:

а) чувствительность к коротким замыканиям в пределах защищаемой зоны (внутренние короткие замыкания);

б) отстроенность от режимов нормальной работы защищаемого присоединения;

в) отстроенность от коротких замыканий за пределами защищаемой зоны (внешние короткие замыкания).

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

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

Примечания

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

2. Под комплектом защит понимают конструктивный блок или интеллектуальный терминал присоединения, состоящий из нескольких устройств защиты, исключая защиту, осуществляемую автоматическим быстродействующим выключателем. Комплект защит совместно с защитой, реализуемой автоматическим быстродействующим выключателем, образуют полный состав защит.

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

4. Под зоной действия устройства защиты понимают наибольшую длину тяговой сети, начиная от места установки выключателя с рассматриваемой защитой, короткие замыкания в пределах которой данное устройство способно надежно обнаружить. Длина зоны действия

устройства защиты, в зависимости от ее свойств, может быть как меньше, так и больше длины защищаемой зоны.

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

1.4. Если выбранная защита не удовлетворяет требованиям устойчивости функционирования по 1.3, то рекомендуется рассмотреть возможность использования следующих мер:

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

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

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

- увеличение сечения проводов контактной сети;

- применение в межподстанционной зоне короткозамыкателей;

- другие возможные меры.

2. Основные требования к защитам

2.1. Общие требования

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

Кроме того, должны быть определены особые (меньшие по току, большие по сопротивлению) уставки, соответствующие вынужденной схеме питания контактной сети (отключение одной смежной тяговой подстанции, при временном ограничении размеров движения (пропуск одного поезда максимальной массы в межподстанционной зоне).

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

2.1.2. Уставку выключателя, не снабженного дополнительно отдельными самостоятельными устройствами защит или их комплектом, следует выбирать

по 2.3 и формулам (2.4) или (2.5) и (2.8).

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

- основная;
- резервная;
- дополнительная.

2.1.4. Основной признается та защита, зона действия которой полностью перекрывает длину защищаемой зоны, а время действия меньше, чем у других защит, перекрывающих эту же защищаемую зону. Защиты с более высоким быстродействием, но с зоной действия только на части защищаемой зоны, к основной не относятся.

Уставку основной защиты необходимо выбирать с учетом 2.3.2. Выдержку времени не используют. При уставке быстродействующего выключателя, выбранной в соответствии с 2.1.2, он и в полном составе защит, как правило, осуществляет основную защиту.

2.1.5. Резервная защита обеспечивает повышение надежности за счет дублирования действия основной защиты (осуществляет ближнее резервирование). Зона ее действия должна быть не меньше, чем длина защищаемой зоны. Уставку резервной защиты необходимо выбирать по 2.3 с учетом требований по 1.3. Для выполнения условия в) по 1.3 в устройстве резервной защиты может быть предусмотрена выдержка времени в соответствии с 2.2. Допускается использование резервной защиты без выдержки времени при условии исправления ее излишних действий при внешних коротких замыканиях с помощью АПВ.

В качестве резервной на тяговых подстанциях могут быть использованы дистанционная защита, максимальная токовая защита (если ее уставка отвечает формулам (2.5) и (2.8), т.е. обеспечивает выполнение условий а) и б) по 1.3), защита по приращению тока, а также тепловая защита.

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

Примечание: Если уставка выключателя, выбранная по условию (2.8) отстройки от максимальных нагрузок нормального режима, не удовлетворяет условию (2.4) чувствительности к коротким замыканиям в конце защищаемой зоны, то выключатель с

такой уставкой может осуществлять только дополнительную защиту в виде токовой отсечки на части межподстанционной зоны. В этом случае в качестве основной следует использовать дистанционную защиту, при условии что ее уставка в соответствии с 2.3.2 удовлетворяет условиям (2.3) и (2.10).

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

2.2. Выдержка времени

2.2.1. При наличии выдержки времени возрастает время воздействия электрической дуги тока короткого замыкания на провода контактной сети и вероятность их пережога. В целях снижения этой вероятности предпочтительно все устройства защиты выполнять без выдержки времени (неселективными). Для исправления возникающих в этом случае излишних действий защиты при внешних (за пределами защищаемой зоны) коротких замыканиях рекомендуется предусматривать автоматическое повторное включение (АПВ) с предварительным испытанием контактной сети на наличие короткого замыкания.

2.2.2. Если при использовании защит, которые воздействуют на цепь управления выключателя без выдержки времени, число излишних (при внешних коротких замыканиях) действий признается в условиях эксплуатации слишком большим, то для контактной сети с двумя контактными проводами сечением 100 мм^2 или одним контактными проводом сечением 150 мм^2 допускается в резервных устройствах защиты применить выдержку времени.

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

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

2.3. Показатели устойчивости функционирования

2.3.1. Состав защит каждого из выключателей должен обеспечить требования по 1.3.

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

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к, min}}}{I_{\text{y}}}, \quad (2.1)$$

$$k_{\text{ч}} = \frac{U_{\text{y}}}{U_{\text{к, max}}}, \quad (2.2)$$

$$k_{\text{ч}} = \frac{R_{\text{y}}}{R_{\text{к, max}}}, \quad (2.3)$$

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

$U_{\text{к, max}}$ – наибольшее значение напряжения на шинах, к которым подключен выключатель с рассматриваемой защитой, при коротком замыкании в конце зоны защиты с учетом параметров места повреждения в соответствии с 4.3.3;

$R_{\text{к, max}}$ – наибольшее значение отношения напряжения на шинах, к которым подключен выключатель с рассматриваемой защитой, к протекающему через этот выключатель току (сопротивление цепи короткого замыкания) при повреждении в конце защищаемой зоны или зоны резервирования;

I_{y} , U_{y} , R_{y} – уставки защит, реагирующих, соответственно, на возрастание тока, на снижение напряжения, на снижение отношения напряжения к току (сопротивление).

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

Для максимальной токовой защиты, реализуемой выключателями или комплектом защиты, уставка которых не зависит или мало зависит от параметров переходного процесса (скорости нарастания или приращения) при возрастании тока присоединения, коэффициент чувствительности следует определять по выражению (2.1).

Для максимальной импульсной токовой защиты, реализуемой выключателями с индуктивным шунтом или реле с дифференциальным шунтом (РДШ), реагирующей одновременно на ток, его приращение и скорость нарастания, т.е. чувствительной к параметрам переходного процесса короткого

замыкания, коэффициент чувствительности $k_{\text{ч}}$ непосредственно не определяют. Соотношение между параметрами I_{y} и $I_{\text{к, min}}$ для них должно отвечать условию:

$$I_{\text{y}} \leq k_{\text{yз}} I_{\text{к, min}}, \quad (2.4)$$

где $k_{\text{yз}}$ – коэффициент усиления при приращениях тока в переходном режиме за счет индуктивного шунта или реле РДШ.

Значения коэффициента усиления $k_{\text{yз}}$ для выключателей тяговых подстанций должны быть указаны предприятием-изготовителем, специализированным испытательным центром или другим уполномоченным органом с учетом приращений и скорости нарастания тока, характерных для режима короткого замыкания в контактной сети.

Примечание – Чрезмерное увеличение значения $k_{\text{yз}}$ (например, свыше 1,05) может привести к недопустимо большому числу ложных отключений выключателя в нормальных эксплуатационных режимах.

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

Кроме того, для максимальной токовой защиты, реализуемой выключателями, уставка которых не зависит от параметров переходного процесса при приращениях тока, некоторыми заводами-изготовителями выключателей рекомендуется выполнение условия, А:

$$I_{\text{y}} < I_{\text{к, min}} - \delta I, \quad (2.5)$$

где δI – запас по надежности отключения, принимаемый, как правило, не менее 300 А.

2.3.3. Коэффициент чувствительности $k_{\text{ч}}$ для основных и резервных защит, вычисленный по формулам (2.1), (2.2) и (2.3), должен быть не менее рекомендуемых значений, указанных в таблице 2.1, при учете в соответствии с 4.3.3 параметров места повреждения.

Таблица 2.1 – Значения коэффициента чувствительности $k_{\text{ч}}$

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

2.3.4. Отстройку от внешних коротких замыканий дополнительных защит, действующих без выдержки времени, осуществляют путем ограничения

зоны действия. Для этого уставку I_y токовой отсечки и R_y дистанционной защиты (если она используется как дополнительная) следует вычислять по формулам:

$$I_y \geq K_{отс} I_{к,маx}, \quad (2.6)$$

$$R_y \leq K_{отс} R_{к,мин}, \quad (2.7)$$

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

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

$K_{отс}$ – коэффициент отстройки.

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

Значения $I_{к,маx}$ и $R_{к,мин}$ вычисляют при металлическом коротком замыкании без учета сопротивления места повреждения.

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

$$I_y \geq \frac{K_3}{K_B} I_{н,маx}, \quad (2.8)$$

$$U_y \leq \frac{U_{н,мин}}{K_3 K_B}, \quad (2.9)$$

$$R_y \leq \frac{K_a R_{н,мин}}{K_3 K_B} = \frac{K_a U_{н,мин}}{K_3 K_B I_{н,маx}}, \quad (2.10)$$

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

$U_{н,мин}$ – наименьшее допустимое напряжение в нормальном режиме на

тех шинах, к которым подключен данный выключатель;

$R_{н,мин}$ – отношение наименьшего допустимого напряжения $U_{н,мин}$ к максимальному току $I_{н,маx}$ в нормальном режиме;

$k_з$, $k_в$, $k_а$ – коэффициенты соответственно запаса, возврата и адаптации.

Коэффициент запаса $k_з$ для выключателей рекомендуется принимать не менее 1,15, для других защит – не менее чем от 1,1 до 1,3.

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

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

Для защит по скорости нарастания тока dI/dt или приращению тока ΔI в условии (2.8) вместо I_y и $I_{н,маx}$ используют соответствующие параметры, на которые реагирует защита, т.е. $(dI/dt)_y$ и $(dI/dt)_{н,маx}$ или ΔI_y и $\Delta I_{н,маx}$.

3. Расчетные параметры нормального режима

3.1. Общие положения

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

- для токовых защит – максимальный ток присоединения $I_{н,маx}$, определяемый по 3.6.1;

- для защиты минимального напряжения – минимальное напряжение на шинах $U_{н,мин}$, определяемое по 3.6.4;

- для дистанционной защиты – отношение минимального напряжения на шинах к максимальному току присоединения (сопротивление, измеряемое защитой присоединения) $R_{н,мин}$, определяемое по 3.6.5.

Для защит, реагирующих на переходные процессы (скорость изменения тока или приращение тока) расчетными параметрами в нормальном режиме являются наибольшие значения скорости нарастания тока $(dI/dt)_{н,маx}$ и приращения тока $\Delta I_{н,маx}$, определяемые по 5.8 и 5.9.

3.1.2. В качестве расчетных рекомендуется принимать следующие схемы питания:

- для тяговых подстанций – раздельное питание контактной сети путей 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, а остальные поезда равномерно распределены в зоне питания;

- для поста секционирования контактной сети главных путей – схема узлового питания 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, а остальные поезда равномерно распределены в зоне питания;

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

3.1.3. Максимальное число поездов на одном пути, одновременно находящихся в зоне питания тяговой подстанции $n_э$ или поста секционирования $n'_э$ следует принимать по правилам, принятым на железных дорогах каждой из стран – членов ОСЖД.

В число поездов $n_э$ ($n'_э$) включаются поезда только максимальной и расчетной массы. Число поездов максимальной массы $n_{э,ГМ}$ ($n'_{э,ГМ}$), входящих в состав $n_э$ ($n'_э$), и их масса $Q_{ГМ}$ должны быть заданы.

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

3.2. Пусковые токи поездов

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

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

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

3.2.2. При отсутствии справочных данных допускается наибольшее пиковое значение пускового $I_{\text{тр}}$ тока для ЭПС со ступенчатым реостатным регулированием определять по формуле:

$$I_{\text{тр}} = (1,4...1,6) I_{\text{ч}} = (1,4...1,6) \frac{P_{\text{ч}} \cdot 10^3}{U_{\text{э}} \eta}, \quad (3.1)$$

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

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

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

η – коэффициент полезного действия.

Для ЭПС с импульсным регулированием значение пускового тока вычисляют по формуле:

$$I_{\text{тр}} = 1,05 \frac{(P_{\text{ч}} + P_{\text{сн}}) \cdot 10^3}{U_{\text{э}}}, \quad (3.2)$$

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

3.2.3. Допускается принимать в качестве $I_{\text{тр}}$ наибольшее пиковое значение пускового тока, соответствующее реальным условиям принятого режима трогания на данном участке.

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

3.3. Средние токи присоединений

3.3.1. Средние токи определяют в предположении, что в зоне питания присоединения тяговой подстанции или поста секционирования одновременно находится соответственно $n_{\text{э}} - 1$ или $n'_{\text{э}} - 1$ поездов (не учитывается поезд максимальной массы, находящийся в режиме трогания соответственно возле тяговой подстанции или поста секционирования), среди которых соответственно $n_{\text{э,ГМ}} - 1$ и $n'_{\text{э,ГМ}} - 1$ поездов максимальной массы, а остальные поезда расчетной массы по 3.1.3.

Значения токов $I_{\text{ср}}$ и $I'_{\text{ср}}$ при максимальном числе поездов в зоне питания $n_{\text{э}} - 1$ и $n'_{\text{э}} - 1$ рекомендуется определять одним из следующих методов:

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

3.3.2. Для вычисления средних токов присоединений $I_{\text{ср}}$ и $I'_{\text{ср}}$ с помощью электрических расчетов системы электроснабжения для данной

межподстанционной зоны необходимо выполнение тяговых расчетов для всех категорий поездов, серий электровозов (электropоездов), профиля пути и длины зоны питания для рассматриваемого присоединения, а также составления графика движения поездов установленных категорий с интервалом попутного следования.

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

- для присоединений тяговых подстанций:

$$I_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{рас}}(n_{\text{э}} - n_{\text{э,ГМ}}) + I_{\text{ГМ}}(n_{\text{э,ГМ}} - 1)}{k}; \quad (3.3)$$

- для присоединений постов секционирования контактной сети главных путей:

$$I'_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{рас}}(n'_{\text{э}} - n'_{\text{э,ГМ}}) + I_{\text{ГМ}}(n'_{\text{э,ГМ}} - 1)}{k}; \quad (3.4)$$

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;

$n_{\text{э,ГМ}}$ – заданное число поездов максимальной массы;

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

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

Для участков железных дорог при обращении пассажирских поездов со скоростями 161 км/ч и более вычисление токов $I_{\text{ср}}$ и $I'_{\text{ср}}$ по формулам (3.3) и (3.4) в интенсивный час осуществляют как для режима движения только пассажирских поездов, так и для режима движения грузовых поездов максимальной и расчетной массы. В качестве расчетного принимают наибольшее из полученных значений.

Для режима движения только пассажирских поездов следует принимать $I_{\text{рас}}$, равным среднему по длине зоны эффективному току пассажирского поезда, $I_{\text{ГМ}} = 0$, $n_{\text{э,ГМ}} = n'_{\text{э,ГМ}} = 0$.

Для участков железных дорог преимущественно с пригородным движением в формулах (3.3) и (3.4) следует принимать $I_{\text{рас}}$, равным среднему по длине зоны питания эффективному току пригородного поезда, $I_{\text{ГМ}} = 0$, $n_{\text{э,ГМ}} = n'_{\text{э,ГМ}} = 0$.

3.3.4. Среднее по длине зоны питания эффективное значение тока I поезда расчетной массы ($I = I_{\text{рас}}$), грузового поезда максимальной массы ($I = I_{\text{ГМ}}$),

пассажирского ($I = I_{\text{пас}}$) или пригородного ($I = I_{\text{приг}}$) поезда принимают по данным тяговых расчетов. Допускается вычислять эти токи по формулам:

$$I = \frac{66A_{\text{зп}}k_{\text{эф}} \cdot 10^3}{U\tau_{\text{зп}}\eta} = \frac{1,1A_{\text{зп}}V k_{\text{эф}} \cdot 10^3}{U\ell_{\text{зп}}\eta}, \quad (3.5)$$

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

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

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

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

$\ell_{\text{зп}}$ – длина зоны питания рассматриваемого присоединения, км;

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

η – коэффициент полезного действия (можно принимать для грузовых поездов – 0,88, для пассажирских и электропоездов – 0,83).

Значения $A_{\text{зп}}$ и $\tau_{\text{зп}}$ принимают по результатам тягового расчета, выполненного, например, с помощью компьютерной программы для заданного профиля пути, длины зоны питания, серии ЭПС, категории поезда и его массы.

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

$$A_{\text{зп}} = \eta w Q \ell_{\text{зп}} \cdot 10^{-3}, \quad (3.6)$$

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

Q – масса поезда, т.

Значение удельного расхода электроэнергии на движение поезда w можно принимать по таблице 3.1.

Таблица 3.1 – 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

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 следует принимать для грузовых и пассажирских поездов 1,26, для пригородных поездов 1,65.

3.4. Граничные значения воздействующих величин тока, напряжения и сопротивления

3.4.1. Пиковое значение максимального тока присоединений вычисляют по формулам:

- для тяговой подстанции:

$$I_{H,max} = I_{Tp} + I_{cp}; \quad (3.7)$$

- для поста секционирования контактной сети главных путей:

$$I_{H,max} = (I_{Tp} + I'_{cp}) \left(\frac{m-1}{m} + \frac{\ell_{ПВ}}{m\ell_{AB}} \right); \quad (3.8)$$

- для пункта параллельного соединения:

$$I_{H,max} = \frac{m-1}{m} I_{Tp}, \quad (3.9)$$

где I_{Tp} – пусковой ток поезда, А;

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

m – число путей с включенной контактной сетью;

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

$\ell_{ПВ}$ – длина зоны питания присоединения поста секционирования, км.

3.4.2. Значение максимального тока $I_{H,max}$ присоединения, питающего контактную сеть станции или ее отдельных парков, рекомендуется принимать как сумму пускового тока I_{Tp} одного поезда и среднего тока I_{cp} другого поезда, проходящего станцию без остановки. Допускается принимать $I_{H,max} = 1,5 I_{Tp}$.

3.4.3. Значение максимального тока $I_{H,max}$ присоединения, питающего локомотивное депо, принимают как сумму токов трех электровозов (электropоездов) двигающихся по деповским путям на маневровых позициях.

3.4.4. Минимальные значения напряжения $U_{H,min}$ для тяговых подстанций, постов секционирования и пунктов параллельного соединения в нормальном режиме работы, а также для постов секционирования и пунктов параллельного соединения для слабо загруженных участков и при отключении одной тяговой подстанции принимают в соответствии с установленными нормами и правилами.

3.4.5. Значение сопротивления $R_{H,min}$, измеряемое защитами выключателей подстанций и постов секционирования контактной сети постоянного тока в нормальном режиме работы, вычисляют по формуле:

$$R_{н, \min} = \frac{U_{н, \min}}{I_{н, \max}}. \quad (3.10)$$

Пример 3.1 Вычислить значения чисел поездов в интенсивный час в зоне питания присоединений тяговой подстанции номинальным напряжением 3,3 кВ и поста секционирования и средних по длине эффективных токов поездов для двухпутного участка длиной $\ell_{AB} = 18$ км при параллельной схеме питания в нормальном режиме. Пост секционирования находится в середине межподстанционной зоны с расстоянием до смежной тяговой подстанции $\ell_{ПВ} = 9$ км.

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

Число грузовых поездов максимальной массы в зоне питания тяговой подстанции в интенсивный час $n_{э, гм} = 2$, а в зоне питания присоединения поста секционирования $n'_{э, гм} = 1$.

Максимальная масса грузового поезда $Q_{гм} = 6000$ т, масса остальных грузовых поездов $Q_{гр} = 4000$ т, масса пассажирских поездов $Q_{п} = 1200$ т. Средняя скорость движения грузового поезда по межподстанционной зоне $V = 50$ км/ч. Профиль пути – холмисто-горный.

Зона питания присоединения тяговой подстанции A равна расстоянию от этой подстанции до смежной тяговой подстанции B ($\ell_{зп} = \ell_{AB} = 18$ км).

Зона питания присоединения поста секционирования ПС равна расстоянию от этого поста до смежной тяговой подстанции B ($\ell'_{зп} = \ell_{ПВ} = 9$ км).

Находим расчетную массу поезда $Q_{рас}$:

$$Q_{рас} = \frac{Q_{гм} + Q_{гр} + Q_{п}}{3} = \frac{6000 + 4000 + 1200}{3} = 3700 \text{ т.}$$

Определяем значение расчетного числа поездов $n_э$ в межподстанционной зоне и расчетного числа поездов $n'_э$ в зоне между постом секционирования ПС и тяговой подстанцией B :

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

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

Производим округление до целого в большую сторону: $n_{э, гм} = 3$, $n'_э = 2$.

Поскольку данные тяговых расчетов не заданы, то средний по зоне ток поездов будем находить на основании расчетного удельного расхода электроэнергии w на тягу поездов в грузовом движении, определяемого по таблице 3.1, $w = 17,0$ Вт·ч/(т·км).

По формуле (3.6) находим значение расхода электроэнергии на движение по зоне питания $\ell_{зп} = \ell_{AB} = 18$ км поезда:

- расчетной массы:

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

- максимальной массы:

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

По формуле (3.5) находим средние по длине эффективные значения токов поездов:

- расчетной массы:

$$I = I_{рас} = \frac{1,1 A_{зп, рас} I_{к эф} \cdot 10^3}{U \ell_{зп} \eta} = \frac{1,1 \cdot 996,3 \cdot 50 \cdot 1,26 \cdot 10^3}{3000 \cdot 18 \cdot 0,88} = 1450 \text{ А;}$$

- максимальной массы:

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

Пример 3.2 Для двухпутного участка ($m = 2$) с параллельной схемой питания и длиной межподстанционной зоны $\ell_{AB} = 18$ км определить расчетные значения токов и сопротивлений, измеряемых защитами на тяговой подстанции A и на посту секционирования ПС, и ток пункта параллельного соединения ППС в режиме интенсивного движения поездов при нормальной схеме питания. Пост секционирования расположен в середине межподстанционной зоны, расстояние от поста ПС до смежной подстанции B $\ell_{\text{ПВ}} = 9$ км. Число грузовых поездов в интенсивный час на одном пути в межподстанционной зоне $n_3 = 3$, а в зоне между постом секционирования и смежной подстанцией $n'_3 = 2$; число грузовых поездов максимальной массы в межподстанционной зоне $n_{\text{э,ГМ}} = 2$ и в зоне питания от поста секционирования до смежной подстанции $n'_{\text{э,ГМ}} = 1$; наибольшее пиковое значение тока трогания поезда $I_{\text{тр}} = 4100$ А; средние токи грузовых поездов максимальной и расчетной масс равны, соответственно, $I_{\text{ГМ}} = 2360$ А, $I_{\text{рас}} = 1450$ А.

Средний ток присоединения тяговой подстанции (без учета поезда, находящегося возле нее в режиме пуска) находим по формуле (3.3):

$$I_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{рас}}(n_3 - n_{\text{э,ГМ}}) + I_{\text{ГМ}}(n_{\text{э,ГМ}} - 1)}{k} = \frac{1450(3 - 2) + 2360(2 - 1)}{2} = 1910 \text{ А.}$$

Максимальное пиковое значение тока этого присоединения определяем по формуле (3.7):

$$I_{\text{н,макс}} = I_{\text{тр}} + I_{\text{ср}} = 4100 + 1910 = 6010 \text{ А.}$$

При минимальном напряжении на шинах тяговой подстанции $U_{\text{н,мин}} = 3000$ В находим по формуле (3.10) значение минимального сопротивления, измеряемого защитой присоединения на тяговой подстанции в режиме интенсивного движения поездов

$$R_{\text{н,мин}} = \frac{U_{\text{н,мин}}}{I_{\text{н,макс}}} = \frac{3000}{6010} = 0,5 \text{ Ом.}$$

Средний ток присоединения поста секционирования (без учета поезда, находящегося возле него в режиме пуска) находим по формуле (3.4):

$$I'_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{рас}}(n'_3 - n'_{\text{э,ГМ}}) + I_{\text{ГМ}}(n'_{\text{э,ГМ}} - 1)}{k} = \frac{1450(2 - 1) + 2360(1 - 1)}{2} = 725 \text{ А.}$$

Максимальное пиковое значение тока этого присоединения находим по формуле (3.8):

$$I_{\text{н,макс}} = (I_{\text{тр}} + I'_{\text{ср}}) \left(\frac{m-1}{m} + \frac{\ell_{\text{ПВ}}}{m \ell_{AB}} \right) = (4100 + 725) \left(\frac{2-1}{2} + \frac{9}{2 \cdot 18} \right) = 3620 \text{ А.}$$

Принимая на посту секционирования $U_{\text{н,мин}} = 2700$ В, получаем по формуле (3.10) для защиты поста секционирования ПС:

$$R_{\text{н,мин}} = \frac{U_{\text{н,мин}}}{I_{\text{н,макс}}} = \frac{2700}{3620} = 0,75 \text{ Ом.}$$

Максимальное пиковое значение тока выключателя пункта параллельного соединения находим по формуле (3.9):

$$I_{\text{н,макс}} = \frac{m-1}{m} I_{\text{тр}} = \frac{2-1}{2} 4100 = 2050 \text{ А.}$$

4. Схемы питания и расчетные схемы

4.1. Схемы питания

4.1.1. Параметры коротких замыканий для выбора уставок каждой из защит вычисляют для установленных расчетных схем. В расчетной схеме место короткого замыкания соответствует наиболее удаленной точке защищаемой зоны для основной и резервной защит.

4.1.2. Основные схемы питания, для которых рассматриваются режимы короткого замыкания в межподстанционной зоне для m -путного участка, на котором n путей имеют контактную сеть, находящуюся под напряжением, приведены на рисунках 4.1 и 4.2. На этих схемах приняты следующие обозначения:

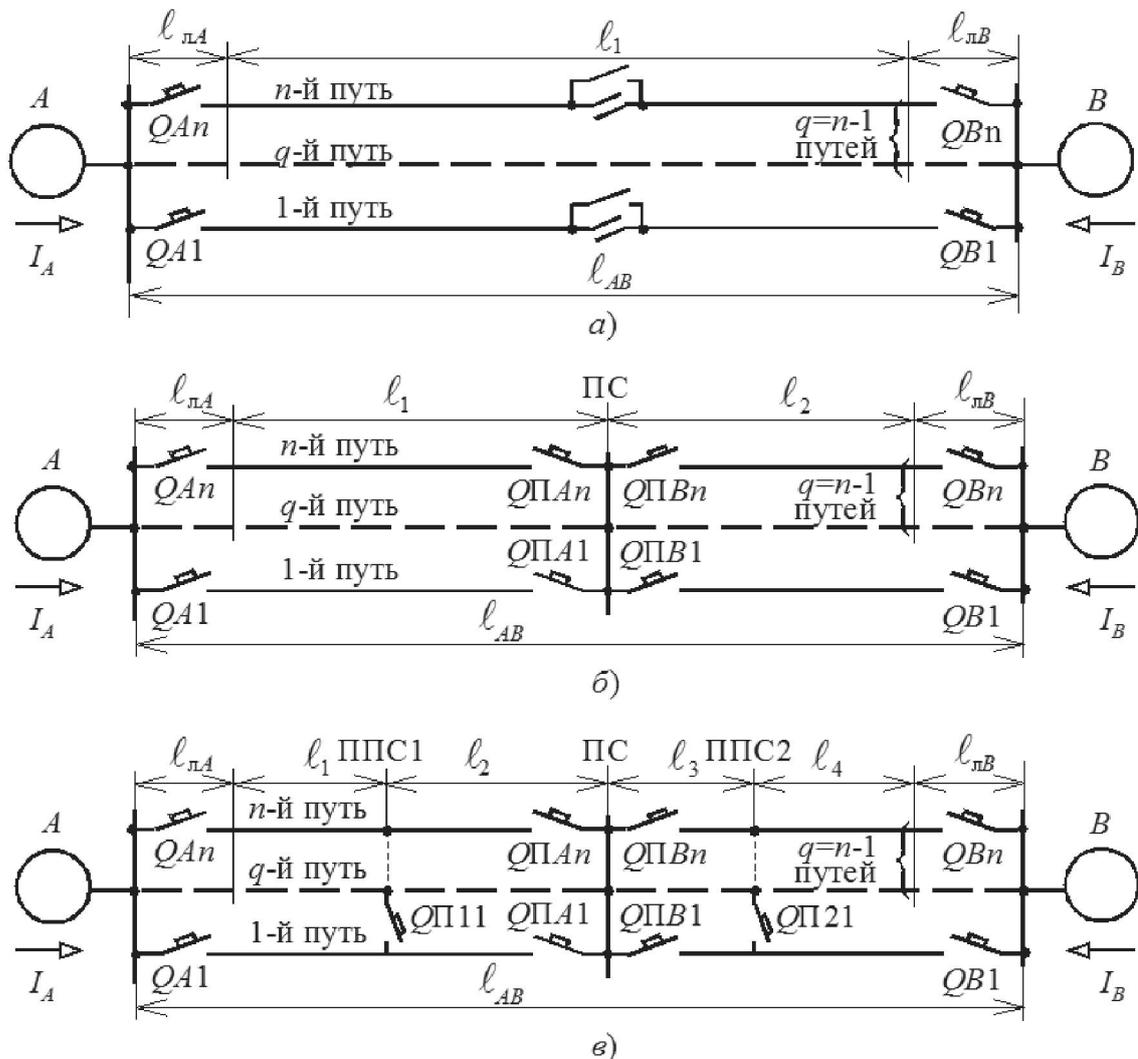


Рисунок 4.1 – Основные схемы питания
а) раздельная, б) узловая, в) параллельная

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

ПС, ПС1, ПС2 – посты секционирования;

ППС1, ППС2, ППС3, ППС4 – пункты параллельного соединения;

$QA1, \dots, QAn, QB1, \dots, QBn$ – выключатели присоединений контактной сети на тяговых подстанциях соответственно A и B ;

$QПA1, \dots, QПAn, QПB1, \dots, QПBn, QП1A1, \dots, QП1An, QП1C1, \dots, QП1Cn, QП2C1, \dots, QП2Cn, QП2B1, \dots, QП2Bn$ – выключатели на постах секционирования;

$l_{лA}, l_{лB}$ – длины питающих линий соответственно на подстанциях A и B , км;

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

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

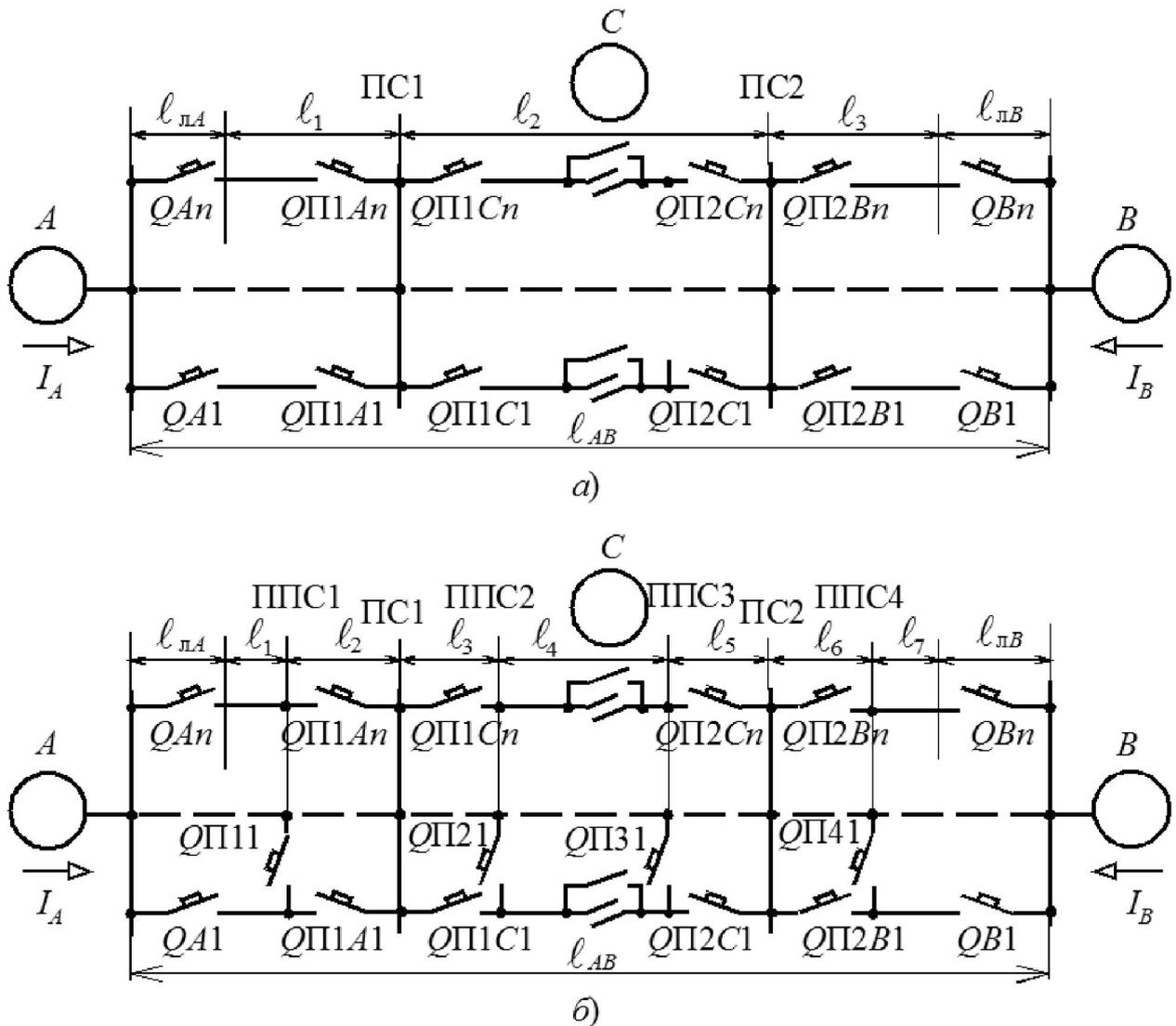


Рисунок 4.2 – Схемы питания при отключении промежуточной подстанции C
 а) узловая при отключении промежуточной тяговой подстанции C ,
 б) параллельная при отключении промежуточной тяговой подстанции C

4.1.3. Вычисление параметров короткого замыкания для всех расчетных схем питания осуществляется на основе схем замещения. Любая схема замещения тяговой сети при питании от одной или двух тяговых подстанций

может быть приведена к Т-образному виду. Значения результирующих сопротивлений такой расчетной схемы вычисляют по формулам, Ом:

$$\begin{aligned} R_A &= R_{пА} + R_{тсА}; \\ R_B &= R_{пВ} + R_{тсВ}; \\ R_{AB} &= R_{тсAB} + R_{тгз}, \end{aligned} \quad (4.1)$$

где $R_{пА}$, $R_{пВ}$ – сопротивления тяговых подстанций в межподстанционной зоне ℓ_{AB} , вычисляемые по 4.3.2;

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

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

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

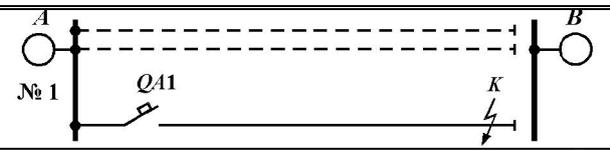
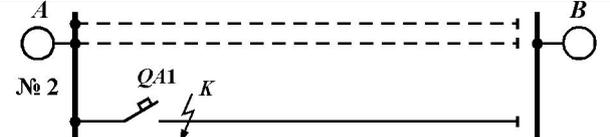
$R_{тгз}$ – сопротивление троса группового заземления, вычисляемое по 4.3.3.

Значения сопротивлений $R_{тсА}$, $R_{тсВ}$, $R_{тсAB}$ вычисляют по формулам, приведенным в таблицах 4.1 и 4.2.

В схемах питания, приведенных в таблицах 4.1 и 4.2 указаны только те выключатели, на которых уставка срабатывания защиты подлежит расчету. Все указанные выключатели находятся во включенном положении. Ток I_Q , протекающий через указанный в таблице выключатель, может быть определен через токи I_A , I_B соответствующих тяговых подстанций A и B , и число путей n_i на соответствующем i -м участке, контактные сети которых находятся под напряжением, как указано в таблицах 4.1 и 4.2.

Так, например, для схемы № 1 таблицы 4.1 имеем $I_Q = I_{QА1} = I_A$, для схемы № 6 этой же таблицы $I_Q = I_{QА1} = I_A/n_1$, где n_1 – число путей на участке ℓ_1 (рисунок 4.1, б), контактная сеть которых находится под напряжением, $I_{QПВ1} = I_A + I_B$, а для схемы № 17 $I_Q = I_{QП21} = I_A + I_B - I_B/n_4$, где n_4 – число путей на участке ℓ_4 (рисунок 4.1, в), контактная сеть которых находится под напряжением.

Таблица 4.1 – Расчетные схемы при коротком замыкании для нормальной схемы питания

Расчетная схема	Расчетные формулы
1	2
	$\begin{aligned} I_{QА1} &= I_A, \\ R_{тсА} &= r_p \ell_{AB}, \quad R_{тсВ} = \infty, \\ R_{тсAB} &= r_{лА} \ell_{лА} + r_{к} \ell_{AB} + r_{лВ} \ell_{лВ}, \\ R_{к, \max} &= R_{QА1} = R_{тсА} + R_{тсAB} + R_{тгз} + R_{л} \end{aligned}$
	$\begin{aligned} I_{QА1} &= I_A, \\ R_{тсА} &= 0, \quad R_{тсВ} = \infty, \\ R_{тсAB} &= 0 \end{aligned}$

<p>№ 3</p>	$I_{QA1} = I_A/n_1,$ $R_{TC A} = (r_{\lambda A} \ell_{\lambda A} + r_K \ell_1)/n_1 + r_p \ell_1,$ $R_{TC B} = (r_{\lambda B} \ell_{\lambda B} + r_K \ell_2)/n_2 + r_p \ell_2,$ $R_{TC AB} = 0,$ $R_{K, \max} = R_{QA1} = n_1 [R_{TC A} + (R_{TГ3} + R_D)(1 + R_A/R_B)]$
<p>№ 3/4</p>	$I_{QA1} = I_B/n_1,$ $R_{TC A} = 0,$ $R_{TC B} = (r_{\lambda A} \ell_{\lambda A} + r_K \ell_1)/n_1 + (r_{\lambda B} \ell_{\lambda B} + r_K \ell_2)/n_2 + r_p(\ell_1 + \ell_2),$ $R_{TC AB} = 0$
<p>№ 4</p>	$I_{QA1} = I_A,$ $R_{TC A} = r_p \ell_1, \quad R_{TC B} = \infty,$ $R_{TC AB} = r_{\lambda A} \ell_{\lambda A} + r_K \ell_1,$ $R_{K, \max} = R_{QA1} = R_{TC A} + R_{TC AB} + R_{TГ3} + R_D$

Продолжение таблицы 4.1

1	2
<p>№ 5</p>	$I_{QA1} = I_A,$ $R_{тсА} = 0, \quad R_{тсВ} = \infty,$ $R_{тсАВ} = 0$
<p>№ 6</p>	$I_{QA1} = I_A/n_1, \quad I_{QПВ1} = I_A + I_B$ $R_{тсА} = (r_{лА}l_{лА} + r_кl_1)/n_1 + r_p l_{AB},$ $R_{тсВ} = (r_{лВ}l_{лВ} + r_кl_2)/(n_2 - 1),$ $R_{тсАВ} = r_{лВ}l_{лВ} + r_кl_2,$ $R_{к, max} = R_{QПВ1} = \frac{r_p l_2}{1 + R_A/R_B} + R_{тсАВ} + R_{тг3} + R_д$
<p>№ 7</p>	$I_{QA1} = I_A/n_1, \quad I_{QПВ1} = I_A/n_2,$ $R_{тсА} = (r_{лА}l_{лА} + r_кl_1)/n_1 +$ $+ (r_{лВ}l_{лВ} + r_кl_2)/n_2 + r_p l_{AB},$ $R_{тсВ} = 0, \quad R_{тсАВ} = 0,$ $R_{к, max} = R_{QПВ1} = r_{лВ}l_{лВ} + r_кl_2 + n_2[r_p l_2 +$ $+ (R_{тг3} + R_д)(1 + R_A/R_B)]$
<p>№ 8</p>	$I_{QПВ1} = I_A,$ $R_{тсА} = (r_{лА}l_{лА} + r_кl_1)/n_1 + r_p l_{AB},$ $R_{тсВ} = \infty, \quad R_{АВ} = r_{лВ}l_{лВ} + r_кl_2,$ $R_{к, max} = R_{QПВ1} = r_p l_2 + R_{тсАВ} + R_{тг3} + R_д$
<p>№ 9</p>	$I_{QПВ1} = I_A,$ $R_{тсА} = (r_{лА}l_{лА} + r_кl_1)/n_1 + r_p l_1,$ $R_{тсВ} = \infty, \quad R_{тсАВ} = 0$
<p>№ 10</p>	$I_{QA1} = I_A/n_1,$ $R_{тсА} = (r_{лА}l_{лА} + r_кl_1)/n_1 + r_кl_2/n_2 + r_p(l_1 + l_2),$ $R_{тсВ} = (r_кl_4 + r_{лВ}l_{лВ})/n_4 + r_кl_3/n_3 + r_p(l_3 + l_4),$ $R_{тсАВ} = 0,$ $R_{к, max} = R_{QA1} = n_1[R_{тсА} + (R_{тг3} + R_д)(1 + R_A/R_B)]$
<p>№ 10</p>	$I_{QA1} = I_B/n_1, \quad R_{тсА} = 0,$ $R_{тсВ} = (r_{лА}l_{лА} + r_кl_1)/n_1 + r_к(l_2/n_2 + l_3/n_3) +$ $+ (r_{лВ}l_{лВ} + r_кl_4)/n_4 + r_p(l_1 + l_2 + l_3 + l_4),$ $R_{тсАВ} = 0$
<p>№ 11</p>	$I_{QA1} = I_A/n_1, \quad I_{QП11} = I_A + I_B - I_A/n_1,$ $R_{тсА} = (r_{лА}l_{лА} + r_кl_1)/n_1 + r_p(l_1 + l_2),$ $R_{тсВ} = (r_кl_4 + r_{лВ}l_{лВ})/n_4 + r_кl_3/n_3 +$ $+ r_кl_2/(n_2 - 1) + r_p(l_3 + l_4)$ $R_{тсАВ} = r_кl_2,$ $R_{к, max} = R_{QA1} = n_1[R_{тсА} + (R_{тсАВ} + R_{тг3} + R_д)(1 + R_A/R_B)]$
<p>№ 12</p>	$I_{QA1} = I_A + I_B,$ $R_{тсА} = r_p(l_1 + l_2),$ $R_{тсВ} = (r_кl_4 + r_{лВ}l_{лВ})/n_4 + r_кl_3/n_3 + l_2/(n_2 - 1) +$ $+ (r_{лА}l_{лА} + r_кl_1)/(n_1 - 1) + r_p(l_3 + l_4),$ $R_{тсАВ} = r_{лА}l_{лА} + r_к(l_1 + l_2),$ $R_{к, max} = R_{QA1} = \frac{r_p(l_1 + l_2)}{1 + R_A/R_B} + R_{тсАВ} + R_{тг3} + R_д$

Продолжение таблицы 4.1

1	2
<p>№ 13</p>	$I_{QПВ1} = I_A/n_3,$ $R_{тсА} = (r_{лА}l_{лА}+r_кl_1)/n_1+r_кl_2/n_2+$ $+r_кl_3/n_3+(r_{лВ}l_{лВ}+r_кl_4)/n_4+r_пл_{АВ},$ $R_{тсВ} = 0, \quad R_{тсАВ} = 0,$ $R_{к,мак} = R_{QПВ1} = r_кl_3+(r_{лВ}l_{лВ}+r_кl_4)n_3/n_4+$ $+n_3[r_пл(l_3+l_4)+(R_{тг3}+R_д)(1+R_A/R_B)]$
<p>№ 14</p>	$I_{QПВ1} = I_A/n_3, \quad I_{QП21} = I_A+I_B-I_A/n_3,$ $R_{тсА} = (r_{лА}l_{лА}+r_кl_1)/n_1+r_кl_2/n_2+r_кl_3/n_3+r_пл_{АВ},$ $R_{тсВ} = (r_кl_4+r_{лВ}l_{лВ})/(n_4-1),$ $R_{тсАВ} = r_кl_4+r_{лВ}l_{лВ},$ $R_{к,мак} = R_{QПВ1} = r_кl_3+$ $+n_3[r_пл(l_3+l_4)+(R_{тсАВ}+R_{тг3}+R_д)(1+R_A/R_B)]$
<p>№ 15</p>	$I_{QПВ1} = I_A+I_B,$ $R_{тсА} = (r_{лА}l_{лА}+r_кl_1)/n_1+r_кl_2/n_2+r_пл_{АВ},$ $R_{тсВ} = (r_кl_4+r_{лВ}l_{лВ})/(n_4-1)+r_кl_3/(n_3-1),$ $R_{тсАВ} = r_к(l_3+l_4)+r_{лВ}l_{лВ},$ $R_{к,мак} = R_{QПВ1} = \frac{r_пл(l_3+l_4)}{1+R_A/R_B} + R_{тсАВ} + R_{тг3} + R_д$
<p>№ 16</p>	$I_{QП21} = I_A-I_A/n_3,$ $R_{тсА} = (r_{лА}l_{лА}+r_кl_1)/n_1+$ $+r_кl_2/n_2+r_кl_3/n_3+r_пл_{АВ},$ $R_{тсВ} = \infty, \quad R_{тсАВ} = r_кl_4+r_{лВ}l_{лВ}$
<p>№ 17</p>	$I_{QП21} = I_A+I_B-I_B/n_4,$ $R_{тсА} = (r_{лА}l_{лА}+r_кl_1)/n_1+r_кl_2/n_2+$ $+r_кl_3/(n_3-1)+r_пл(l_1+l_2),$ $R_{тсВ} = (r_кl_4+r_{лВ}l_{лВ})/n_4+r_пл(l_3+l_4),$ $R_{тсАВ} = r_кl_3$

Таблица 4.2 – Расчетные схемы при коротком замыкании для вынужденных схем питания

Расчетная схема	Расчетные формулы
<p>№ 18</p>	$I_{QА1} = I_A,$ $R_{тсА} = r_{лА}l_{лА}+r_{лВ}l_{лВ}+0,5r_кl_{АВ}+$ $+r_пл_{АВ},$ $R_{тсВ} = 0, \quad R_{тсАВ} = 0,$ $R_{к,мак} = R_{QА1} = R_{тсА}+(R_{тг3}+R_д)(1+R_A/R_B)$
<p>№ 19</p>	$I_{QА1} = I_A+I_B, \quad R_{тсА} = r_пл(l_1+l_2),$ $R_{тсВ} = r_к(l_3/n_3+l_4/n_4+l_5/n_5+l_6/n_6)+$ $+(r_кl_7+r_{лВ}l_{лВ})/n_7+$ $+r_пл(l_3+l_4+l_5+l_6+l_7),$ $R_{тсАВ} = r_{лА}l_{лА}+r_к(l_1+l_2),$ $R_{к,мак} = R_{QА1} = \frac{r_пл(l_1+l_2)}{1+R_A/R_B} + R_{тсАВ} + R_{тг3} + R_д$

Продолжение таблицы 4.2

1	2
	$I_{QП1C1} = I_A + I_B,$ $R_{тсА} = (r_{лА} \ell_{лА} + r_k \ell_1) / n_1 + r_k \ell_2 / n_2 + r_p (\ell_1 + \ell_2 + \ell_3 + \ell_4 + \ell_5),$ $R_{тсВ} = r_k [\ell_3 / (n_3 - 1) + \ell_4 / (n_4 - 1) + \ell_5 / (n_5 - 1)] + r_k \ell_6 / n_6 + (r_k \ell_7 + r_{лВ} \ell_{лВ}) / n_7 + r_p (\ell_6 + \ell_7),$ $R_{тсАВ} = r_k (\ell_3 + \ell_4 + \ell_5),$ $R_{к, \max} = R_{QП1C1} = \frac{r_p (\ell_3 + \ell_4 + \ell_5)}{1 + R_A / R_B} + R_{тсАВ} + R_{тг3} + R_{л}$
	$I_{QП2B1} = I_A + I_B,$ $R_{тсА} = (r_{лА} \ell_{лА} + r_k \ell_1) / n_1 + r_k (\ell_2 / n_2 + \ell_3 / n_3 + \ell_4 / n_4 + \ell_5 / n_5) + r_p \ell_{лВ},$ $R_{тсВ} = r_k \ell_6 / (n_6 - 1) + (r_{лВ} \ell_{лВ} + r_k \ell_7) / (n_7 - 1),$ $R_{тсАВ} = r_k (\ell_6 + \ell_7) + r_{лВ} \ell_{лВ},$ $R_{к, \max} = R_{QП2B1} = \frac{r_p (\ell_6 + \ell_7)}{1 + R_A / R_B} + R_{тсАВ} + R_{тг3} + R_{л}$
	$I_{QП11} = I_A + I_B - I_A / n_1,$ $R_{тсА} = (r_{лА} \ell_{лА} + r_k \ell_1) / n_1 + r_p (\ell_1 + \ell_2),$ $R_{тсВ} = r_k \ell_2 / (n_2 - 1) + r_k (\ell_3 / n_3 + \ell_4 / n_4 + \ell_5 / n_5 + \ell_6 / n_6) + (r_k \ell_7 + r_{лВ} \ell_{лВ}) / n_7 + r_p (\ell_3 + \ell_4 + \ell_5 + \ell_6 + \ell_7),$ $R_{тсАВ} = r_k \ell_2$
	$I_{QП121} = I_A + I_B - I_A / n_3,$ $R_{тсА} = (r_{лА} \ell_{лА} + r_k \ell_1) / n_1 + r_k (\ell_2 / n_2 + \ell_3 / n_3) + r_p (\ell_1 + \ell_2 + \ell_3 + \ell_4 + \ell_5),$ $R_{тсВ} = r_k [\ell_4 / (n_4 - 1) + \ell_5 / (n_5 - 1)] + r_k \ell_6 / n_6 + (r_k \ell_7 + r_{лВ} \ell_{лВ}) / n_7 + r_p (\ell_6 + \ell_7),$ $R_{тсАВ} = r_k (\ell_4 + \ell_5)$
	$I_{QП41} = I_A + I_B - I_A / n_6,$ $R_{тсА} = (r_{лА} \ell_{лА} + r_k \ell_1) / n_1 + r_k (\ell_2 / n_2 + \ell_3 / n_3 + \ell_4 / n_4 + \ell_5 / n_5 + \ell_6 / n_6) + r_p \ell_{лВ},$ $R_{тсВ} = (r_k \ell_7 + r_{лВ} \ell_{лВ}) / (n_7 - 1),$ $R_{тсАВ} = r_{лВ} \ell_{лВ} + r_k \ell_7$

4.2. Расчетные схемы

4.2.1. Расчетные схемы питания используются для выбора уставок защиты от коротких замыканий и анализа возможных или наступивших нештатных ситуаций в виде отказа защит при фиксированном расположении точки короткого замыкания K в конце защищаемой зоны. Эти схемы приведены в таблице 4.1 (нормальные схемы питания) и таблице 4.2 (вынужденные схемы питания). Приведенным упрощенным схемам соответствуют подробные схемы и обозначения, показанные на рисунках 4.1 и 4.2. На всех путях многопутного участка контактная сеть предполагается одинаковой.

В формулах таблиц 4.1 и 4.2 использованы обозначения:

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

$r_{к}$ – сопротивление 1 км контактной сети одного пути, Ом/км;

$r_{р}$ – сопротивление 1 км рельсовой цепи всех путей, Ом/км;

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

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

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

4.3. Параметры схем питания и замещения

4.3.1. Сопротивление проводов контактной сети

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

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

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

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

β_r – температурный коэффициент сопротивления, 1/°С.

Для медных, бронзовых, сталемедных, алюминиевых и сталеалюминиевых проводов допускается принимать $\beta_r = 0,004$ 1/°С. В качестве расчетной температуры принимают $t_p = 40$ °С. При этом:

$$r = 1,08 \cdot r_{20}. \quad (4.2')$$

Сопротивление контактных проводов определяется с учетом их фактического износа по формуле:

$$r_{п,и} = \frac{r_{п}}{1 - u \cdot 10^{-2}}, \quad (4.3)$$

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

$r_{п}$ – погонное сопротивление нового (без износа) контактного провода, Ом/км;

u – износ провода, %.

При отсутствии данных об износе контактного провода рекомендуется принимать сопротивление соответствующее износу 15 %.

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

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

где $r_{\text{рез}}$ – результирующее погонное сопротивление пучка, Ом/км;

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

q – число проводов в пучке.

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

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

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

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

$$\frac{1}{r_k} = \frac{q_T}{r_T} + \frac{q_{\text{п}}}{r_{\text{п}}} + \frac{q_Y}{r_Y}, \quad (4.6)$$

где $q_T, q_{\text{п}}, q_Y$ – соответственно число несущих тросов, число контактных проводов и число усиливающих проводов;

$r_T, r_{\text{п}}, r_Y$ – погонные сопротивления соответственно одного несущего троса, одного контактного провода и одного усиливающего провода, Ом/км.

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

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

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

ℓ – длина провода, км.

4.3.2. Параметры тяговых подстанций

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

Эти сопротивления и напряжения зависят от режима работы внешней питающей энергосистемы: максимального «макс» или минимального «мин». Для выбора уставок токовых отсечек режим работы внешней энергосистемы принимают «макс», при выборе уставок остальных защит рекомендуется

принимать режим работы внешней энергосистемы «мин».

4.3.2.2. Сопротивление тяговой подстанции R_{Π} ($R_{\Pi} = R_{\Pi A}$ или $R_{\Pi} = R_{\Pi B}$) вычисляют по формуле, Ом:

$$R_{\Pi} = \rho + R_{cy} + R_{ол}, \quad (4.8)$$

где ρ – внутреннее сопротивление подстанции, Ом;

R_{cy} – сопротивление сглаживающего устройства, Ом;

$R_{ол}$ – сопротивление отсасывающей линии, Ом.

Внутреннее сопротивление подстанции вычисляют по формуле:

$$\rho = \frac{AX * U_{н}}{(1 - AX *) n_{т} I_{н}}, \quad (4.9)$$

где A – коэффициент относительного наклона внешней характеристики преобразовательного агрегата;

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

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

$n_{т}$ – число включенных в работу выпрямительных агрегатов;

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

Коэффициент A принимают равным для шестипульсовых выпрямителей 0,5, а для двенадцатипульсовых выпрямителей 0,26. Величину X^* вычисляют по формуле:

$$X^* = \frac{S_{т} n_{т}}{S_{c}} + \frac{(1 \pm \alpha_{з}) u_{кп} S_{т} n_{т}}{100 S_{\Pi} n_{\Pi}} + \frac{(1 \pm \alpha_{з}) u_{кт}}{100}, \quad (4.10)$$

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

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

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

$\alpha_{з}$ – заводской допуск на величину напряжения короткого замыкания (рекомендуется 0,05);

n_{Π} – число включенных в работу понижающих трансформаторов.

4.3.2.3 Мощность короткого замыкания S_{c} задается энергоснабжающей организацией. Если задана не мощность короткого замыкания, а сопротивление X_{c} , Ом, приведенное к напряжению $U_{б}$, кВ, то мощность S_{c} вычисляют по формуле, МВ·А:

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

Если задана не мощность S_c , а ток короткого замыкания I_k , кА, на вводах в тяговую подстанцию, то мощность короткого замыкания вычисляют по формуле, МВ·А:

$$S_c = \sqrt{3}U_{\text{нв}}I_k, \quad (4.11')$$

где $U_{\text{нв}}$ – номинальное напряжение на вводах, кВ.

4.3.2.4. В режиме «макс» рекомендуется принимать: мощность короткого замыкания на вводах в тяговую подстанцию S_c , сопротивление энергосистемы X_c или значение тока короткого замыкания I_k на вводах – соответствующими режиму максимума энергосистемы. Заводской допуск α_3 (среднее значение) на величину напряжения короткого замыкания – со знаком «минус». Напряжение короткого замыкания $u_{\text{кп}}$ трансформатора с автоматическим регулированием напряжения под нагрузкой – соответствующее минимальному паспортному значению.

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

4.3.2.5. Номинальные мощности и напряжения короткого замыкания трансформаторов, а также величину номинального тока преобразовательного агрегата принимают по справочным данным. Для тяговых (преобразовательных) трансформаторов инверторов используются параметры выпрямительного режима.

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

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

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

$$U_{\text{рас}} = \frac{(1 \pm \alpha_{\text{н}})}{1 - AX_*} U_{\text{н}} - \kappa_{\text{нп}} n_{\text{т}} I_{\text{н}} R_{\text{п}}, \quad (4.12)$$

где $\alpha_{\text{н}}$ – допуск на величину отклонения напряжения на вводах в тяговую подстанцию;

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

Допуск на отклонение напряжения рекомендуется принимать равным $\alpha_{\text{н}} = 0,05$ со знаком плюс для режима максимума и со знаком минус для режима минимума энергосистемы. Для однопутного участка принимают $\kappa_{\text{нп}} = 0,5$, для многопутных $\kappa_{\text{нп}}$ принимают от 0,75 до 1.

Пример 4.1 Вычислить сопротивление и расчетное напряжение двухагрегатной тяговой подстанции с понижающим трансформатором с регулятором напряжения под нагрузкой и шестипульсовым преобразовательным агрегатом с тяговым

(преобразовательным) трансформатором в режиме минимума энергосистемы, сопротивление которой, приведенное к напряжению $U_6 = 115$ кВ, равно $X_c = 11,5$ Ом.

Мощность понижающего трансформатора $S_{п} = 25$ МВ·А, максимальное значение напряжения короткого замыкания $u_{кп} = 18,1$ %. Мощность преобразовательного трансформатора $S_{т} = 11,4$ МВ·А, напряжение короткого замыкания $u_{кт} = 8$ %. Преобразовательный агрегат в режиме выпрямления имеет номинальное напряжение $U_{н} = 3300$ В, номинальный ток $I_{н} = 3150$ А.

Отсасывающая линия длиной $\ell_{ол} = 0,5$ км состоит из шести сталеалюминиевых проводов номинальным сечением $185/24$ мм² и сопротивлением $r_{20} = 0,154$ Ом/км.

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

$$S_c = \frac{U_6^2}{X_c} = \frac{115^2}{11,5} = 1150 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

По формуле (4.10) вычисляем:

$$X_* = \frac{11,4 \cdot 1}{1150} + \frac{(1 + 0,05) \cdot 18,1 \cdot 11,4 \cdot 1}{100 \cdot 25 \cdot 1} + \frac{(1 + 0,05) \cdot 8}{100} = 0,181.$$

По формуле (4.9) находим:

$$\rho = \frac{AX_* U_{н}}{(1 - AX_*) \cdot n_{т} I_{н}} = \frac{0,5 \cdot 0,181 \cdot 3300}{(1 - 0,5 \cdot 0,181) \cdot 1 \cdot 3150} = 0,104 \text{ Ом}.$$

Принимаем $R_{cy} = 0,02$ Ом.

По формуле (4.2) приводим сопротивление провода отсасывающей линии к температуре 40 °С:

$$r_1 = 0,154[1 + 0,004 \cdot (40 - 20)] = 0,166 \text{ Ом/км}.$$

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

$$r_{ол} = 0,166/6 = 0,028 \text{ Ом/км}.$$

По формуле (4.7) находим сопротивление отсасывающей линии:

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

Сопротивление подстанции находим по формуле (4.8):

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

Расчетное напряжение вычисляем по формуле (4.12):

$$U_{рас} = \frac{(1 - 0,05) \cdot 3300}{1 - 0,5 \cdot 0,181} - 0,75 \cdot 1 \cdot 3200 \cdot 0,138 = 3120 \text{ В}.$$

4.3.3. Параметры места повреждения

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

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

При выборе уставок защит место повреждения изоляции контактной сети характеризуются двумя параметрами: сопротивлением троса группового заземления $R_{гз}$ и падением напряжения в дуге $U_{д}$. При анализе нештатных ситуаций с обрывом и падением провода на шпальную решетку или землю

принимают $U_d = 0$, но в цепь короткого замыкания вместо $R_{ТГЗ}$ включают переходное сопротивление «контактная сеть-земля» R_3 .

Учет параметров места повреждения $R_{ТГЗ}$ и U_d необходимо осуществлять путем включения их значений в формулы для вычисления:

- наименьших токов I_A, I_B смежных тяговых подстанций (по 4.4.1);
- наименьших токов $I_{к, \min}$ рассматриваемых присоединений (по 5.4);
- сопротивлений $R_{к, \max}$, измеряемых защитой присоединений (по 5.7).

При вычислении наибольшего значения $I_{к, \max}$ тока короткого замыкания параметры места повреждения $R_{ТГЗ}$ и U_d не учитывают.

Сопротивление троса группового заземления вычисляют в соответствии с 4.3.1 вычисляют по формуле (4.7). В качестве расчетной длины троса группового заземления $\ell = \ell_{ТГЗ}$ принимают расстояние от точки присоединения заземляющего спуска до наиболее удаленного его конца. Длина и сечение троса группового заземления не должны ограничивать нормальную работу защиты от токов короткого замыкания.

Величину падения напряжения в дуге U_d вычисляют по формуле, В:

$$U_d = 1350L_y n_{из} b, \quad (4.13)$$

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.

Длину пути утечки принимают в соответствии с типом используемых в контактной сети изоляторов на основании справочных данных.

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

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

4.3.4. Сопротивление рельсовой цепи

Все рельсы на однопутном и многопутном участках считают электрически соединенными параллельно. Значения погонного сопротивления рельсов одного пути при температуре 20 °С приведены в таблице 4.3.

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

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

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

m – число путей.

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

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

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

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

Таблица 4.3 – Сопротивление рельсов одного пути

Тип рельсов	Погонное сопротивление r_{p1} рельсов однопутного участка, Ом/км, при длине рельсов между стыками, м		
	12.5	25	800
P43	0,022	0,020	0,018
P50	0,019	0,018	0,016
P65	0,015	0,014	0,013
P75	0,013	0,012	0,011

Пример 4.2 Для схемы узлового питания (рисунок 4.1, б) вычислить параметры результирующей схемы замещения для расчетных схем №№ 3, 4, 7, 8 (таблица 4.1). Участок трехпутный ($n_1 = n_2 = 3$), контактная сеть на всех путях состоит из одного медного несущего троса сечением 120 мм^2 ($r_{т,20} = 0,156 \text{ Ом/км}$), двух контактных проводов номинальным сечением по 100 мм^2 ($r_{п,20} = 0,176 \text{ Ом/км}$) с износом 10 % и одного алюминиевого усиливающего провода сечением 185 мм^2 ($r_{у,20} = 0,157 \text{ Ом/км}$). Расстояние от тяговой подстанции А до поста секционирования ПС $\ell_1 = 7 \text{ км}$, расстояние от поста секционирования ПС до тяговой подстанции В $\ell_2 = 8 \text{ км}$. Питающие линии выполнены четырьмя алюминиевыми проводами сечением по 185 мм^2 ($r_{л,20} = 0,157 \text{ Ом/км}$); их длина у подстанции А равна $\ell_{лА} = 2 \text{ км}$, у подстанции В $\ell_{лВ} = 0,5 \text{ км}$. Рельсы Р65 с длиной звеньев 25 м. Сопротивление троса группового заземления $R_{тгз} = 0,197 \text{ Ом}$, $R_3 = 0$. Сопротивления подстанций $R_{пА} = R_{пВ} = R_{п} = 0,139 \text{ Ом}$.

Погонное сопротивление проводов при расчетной температуре $40 \text{ }^\circ\text{C}$ находим по формуле (4.2'):

$$r_t = 1,08 \cdot r_{т,20} = 1,08 \cdot 0,156 = 0,168 \text{ Ом/км};$$

$$r_p = 1,08 \cdot r_{п,20} = 1,08 \cdot 0,176 = 0,190 \text{ Ом/км};$$

$$r_y = 1,08 \cdot r_{у,20} = 1,08 \cdot 0,157 = 0,169 \text{ Ом/км};$$

По формуле (4.3) уточняем сопротивление контактного провода с износом 10 %:

$$r_{п,и} = r_{п,и} = \frac{r_p}{1 - u \cdot 10^{-2}} = \frac{0,190}{1 - 10 \cdot 10^{-2}} = 0,211 \text{ Ом/км}.$$

Погонное сопротивление контактной сети определяем по формуле (4.6):

$$\frac{1}{r_k} = \frac{q_t}{r_t} + \frac{q_p}{r_p} + \frac{q_y}{r_y} = \frac{1}{0,168} + \frac{2}{0,211} + \frac{1}{0,169} = 21,39 \text{ км/Ом},$$

откуда $r_k = 1/21,39 = 0,047 \text{ Ом/км}$.

Погонное сопротивление питающей линии при расчетной температуре $40 \text{ }^\circ\text{C}$ находим по формулам (4.2) и (4.5):

$$r_l = \frac{0,157 \cdot 1,08}{4} = 0,042 \text{ Ом/км}.$$

Погонное сопротивление рельсов находим по таблице 4.3 и формуле (4.14):

$$r_p = r_{p1}/m = 0,014/3 = 0,005 \text{ Ом/км.}$$

По формулам, приведенным в таблице 4.1 для расчетной схемы № 3, находим ($\ell_1 = \ell_{АП}$, $\ell_2 = \ell_{ПВ}$):

$$\begin{aligned} R_{тсА} &= (r_{лА} \ell_{лА} + r_k \ell_1)/n_1 + r_p \ell_1 = (0,042 \cdot 2 + 0,047 \cdot 7)/3 + 0,005 \cdot 7 = 0,173 \text{ Ом,} \\ R_{тсВ} &= (r_{лВ} \ell_{лВ} + r_k \ell_2)/n_2 + r_p \ell_2 = (0,042 \cdot 0,5 + 0,047 \cdot 8)/3 + 0,005 \cdot 8 = 0,172 \text{ Ом,} \\ R_{тсАВ} &= 0. \end{aligned}$$

По формулам (4.1) вычисляем

$$\begin{aligned} R_A &= R_{пА} + R_{тсА} = 0,139 + 0,173 = 0,312 \text{ Ом,} \\ R_B &= R_{пВ} + R_{тсВ} = 0,139 + 0,172 = 0,311 \text{ Ом.} \\ R_{АВ} &= R_{тсАВ} + R_{тгз} = 0 + 0,197 = 0,197 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Для расчетной схемы № 4 по таблице 4.1 находим

$$\begin{aligned} R_{тсА} &= r_p \ell_1 = 0,005 \cdot 7 = 0,035 \text{ Ом,} \quad R_{тсВ} = \infty, \\ R_{тсАВ} &= r_{лА} \ell_{лА} + r_k \ell_1 = 0,042 \cdot 2 + 0,047 \cdot 7 = 0,413 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

По формулам (4.1) вычисляем

$$\begin{aligned} R_A &= R_{пА} + R_{тсА} = 0,139 + 0,035 = 0,174 \text{ Ом,} \\ R_B &= R_{пВ} + R_{тсВ} = R_{пВ} + \infty = \infty, \\ R_{АВ} &= R_{тсАВ} + R_{тгз} = 0,413 + 0,197 = 0,610 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} R_{тсА} &= (r_{лА} \ell_{лА} + r_k \ell_1)/n_1 + (r_{лВ} \ell_{лВ} + r_k \ell_2)/n_2 + r_p \ell_{АВ} = \\ &= (0,042 \cdot 2 + 0,047 \cdot 7)/3 + (0,042 \cdot 0,5 + 0,047 \cdot 8)/3 + 0,005 \cdot (7+8) = 0,345 \text{ Ом,} \\ R_{тсВ} &= 0, \quad R_{тсАВ} = 0. \end{aligned}$$

По формулам (4.1) находим для расчетной схемы № 7

$$\begin{aligned} R_A &= R_{пА} + R_{тсА} = 0,139 + 0,345 = 0,484 \text{ Ом,} \\ R_B &= R_{пВ} + R_{тсВ} = 0,139 + 0 = 0,139 \text{ Ом.} \\ R_{АВ} &= R_{тсАВ} + R_{тгз} = 0 + 0,197 = 0,197 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Для расчетной схемы № 8 по таблице 4.1 находим

$$\begin{aligned} R_{тсА} &= (r_{лА} \ell_{лА} + r_k \ell_1)/n_1 + r_p \ell_{АВ} = (0,042 \cdot 2 + 0,047 \cdot 7)/3 + 0,005 \cdot (7+8) = 0,213 \text{ Ом,} \\ R_{тсВ} &= \infty, \end{aligned}$$

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

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

$$\begin{aligned} R_A &= R_{пА} + R_{тсА} = 0,139 + 0,213 = 0,352 \text{ Ом,} \\ R_B &= R_{пВ} + R_{тсВ} = R_{пВ} + \infty = \infty, \\ R_{АВ} &= R_{тсАВ} + R_{тгз} = 0,397 + 0,197 = 0,594 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

4.4. Вычисление параметров короткого замыкания для расчетных схем

4.4.1. Токи в расчетной схеме

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

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

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

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

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

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

R_A , R_B , R_{AB} – результирующие сопротивления схемы замещения межподстанционной зоны для заданных схем питания и мест короткого замыкания, определяемые по формулам (4.1) и по формулам, приведенным в таблице 4.1, Ом.

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

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

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

Примечания

1 При вычислении наибольшего значения тока короткого замыкания $I_{k,маx}$ принимают $U_d = 0$, а в расчетное сопротивление R_{AB} не включают сопротивление места повреждения ($R_{тгз} = 0$, $R_3 = 0$).

2 При вычислении наименьшего значения тока короткого замыкания $I_{k,мин}$ падение напряжения в дуге U_d , а также сопротивления $R_{тгз}$, R_3 учитывают по 4.3.3.

Ток выключателя I_Q в расчетных схемах ($I_Q = I_{QA1}$, $I_Q = I_{QPВ1}$, ...) при известных токах I_A и I_B определяют по формулам, приведенным в таблицах 4.1 и 4.2 для соответствующих схем.

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

В примере 4.1. вычислены сопротивление и напряжение тяговой подстанции:

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

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

$$U_d = 1350 L_{ynиз} b = 1350 \cdot 0,26 \cdot 2 \cdot 0,76 = 535 \text{ В.}$$

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

$$R_{тсА} = 0,173 \text{ Ом}, \quad R_{тсВ} = 0,172 \text{ Ом}, \quad R_{тсAB} = 0.$$

По формулам (4.1) находим

$$R_A = R_{пА} + R_{тсА} = 0,138 + 0,173 = 0,311 \text{ Ом},$$

$$R_B = R_{пВ} + R_{тсВ} = 0,138 + 0,172 = 0,310 \text{ Ом},$$

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

По формулам (4.19) находим

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

По формуле, приведенной в таблице 4.1 для схемы № 3, находим ток выключателя Q_{A1}

$$I_{Q_{A1}} = I_A / n_1 = I_{\text{к, min}} = 3660 / 3 = 1220 \text{ А}.$$

4.4.2. Напряжения в узловых точках

Напряжения на шинах подстанций A и B вычисляются по формулам:

$$U_A = U_{A, \text{рас}} - I_A R_{пА}, \quad U_B = U_{B, \text{рас}} - I_B R_{пВ}. \quad (4.21)$$

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

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

в которой значения входящих в нее величин принимают по таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Составляющие формулы (4.22)

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

¹⁾ По таблицам 4.1 и 4.2

Если в формулах (4.21) и (4.22) значения токов I_A , I_B , I вычислены с учетом падения напряжения в дуге U_d и сопротивления троса группового заземления $R_{ТГЗ}$, то для полученных значений $U_{УТ}$ следует использовать обозначение $U_{к,мах}$.

4.4.3. Сопротивление, измеряемое защитой выключателя

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

$$R_Q = U_{УТ}/I_Q, \quad (4.23)$$

где I_Q – ток, протекающий через выключатель Q , А;

$U_{УТ}$ – напряжение той узловой точки, к которой подключен выключатель Q , вычисленное по формуле (4.22), В.

Если в формуле (4.23) значения $U_{УТ}$ и I_Q , вычисленные с учетом падения напряжения в дуге U_d и сопротивления троса группового заземления $R_{ТГЗ}$, то для полученного значения R_Q , при выборе уставок используют обозначение $R_{к,мах}$. Для вычисления $R_{к,мах}$ допускается также использовать формулы, приведенные в таблицах 4.1 и 4.2.

5. Выбор уставок защит

5.1. Общие положения

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

5.1.2. Выбор уставок защит производится на основе сравнения параметров нормального режима при максимальных нагрузках и установившегося режима короткого замыкания в заданной точке тяговой сети. В основе выбора лежат требования по обеспечению показателей устойчивости функционирования защиты от коротких замыканий, приведенные в 2.3.

5.1.3. Общая сводка условий для выбора уставок защит и их проверки на соответствие нормативным требованиям приведены в таблице 5.2.

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

В этой же графе в необходимых случаях указано назначение защиты в соответствии с 2.1: (осн) – основная, (рез) – резервная, (доп) – дополнительная, (особ) – особая уставка для вынужденных режимов.

Таблица 5.1 – Особенности и области применения защит

Наименование защиты (в скобках – сокращённое наименование, используемое в подстрочных элементах формул, приводимых в настоящем документе)	Воздействующая величина	Назначение ¹⁾ :	Структурный элемент, в котором приведены требования к выбору уставки	Выдержка времени, с	Действие на:		Применение на выключателях:			
					отключение или сигнал	блокировку АПВ	тяговых подстанций:		постов секционирования	пунктов параллельного соединения
							перегонов	станций, депо		
Максимальная импульсная токовая защита (МИЗ) ²⁾	Ток защищаемого присоединения, скорость нарастания и приращение тока	осн. или доп. ³⁾	5.2	нет	отк	нет	+	+	+	+ ³⁾
Токовая отсечка (ТО)	Ток защищаемого присоединения	доп.	5.3	нет	отк	да	+	+	+	+
Максимальная токовая защита прямого направления (МТЗ)	то же	рез.	5.4	нет	отк	нет	+	+	+	+
Максимальная токовая защита обратного направления (МТЗО) ⁴⁾	«	рез.	5.5	от 0,1 до 0,2	отк	нет	+	–	–	–
Защита минимального напряжения (ЗМН) ⁵⁾	Напряжение на сборных шинах	рез.	5.6	по 2.2	отк	да	+	–	+	+ ⁶⁾
Защита максимального напряжения (ЗПН) ⁷⁾	тоже	доп.	–	от 0,1 до 0,15	отк	нет	+	–	–	–
Дистанционная защита (ДЗ)	Входное сопротивление тяговой сети, фиксируемое измерительным органом защиты	рез. осн. ³⁾ доп.	5.7	по 5.7.1.4 и 5.7.2.2	отк	нет	+	–	+	–
Направленная защита по скорости нарастания тока (ЗСНТ)	Скорость нарастания тока защищаемого присоединения	доп.	5.8	нет		нет	+	–	–	–

Продолжение таблицы 5.1

Направленная защита по приращению тока (ЗПТ)	Приращение тока защищаемого присоединения за заданное время	рез.	5.9	по 2.2	отк	нет	+	-	-	-
Тепловая защита (ТЗ) и квазитепловая защита (КВТЗ)	Температура провода или ток защищаемого присоединения скорость ветра и температура окружающей среды	рез.	5.10	нет	сигн ⁸⁾ отк	да	+	-	-	-

¹⁾ Назначение защиты (по 2.1.3): основная – «осн.», резервная – «рез.», дополнительная – «доп.».
²⁾ Максимальная импульсная токовая защита реализуется за счет свойств автоматического выключателя. Все остальные защиты, приводимые в настоящем документе, реализуются за счёт функций дополнительных схем и/или устройств, в частном случае – входят в состав функций интеллектуальных терминалов присоединения, и воздействуют на цепь оперативного отключения выключателя.
³⁾ Если выключатели оборудованы интеллектуальными терминалами присоединения, то максимальная импульсная токовая защита может выполнять роль дополнительной защиты, но только в том случае, если при выбранной уставке зона ее действия оказывается меньше длины защищаемой зоны, т.е. не выполняются одновременно условия (2.4) и (2.8), а дистанционная защита защищаемую зону перекрывает полностью с коэффициентом чувствительности не менее указанного в таблице 2.1. В этом случае дистанционная защита выполняет роль основной. Если же для максимальной импульсной токовой защиты выполняются одновременно условия (2.4) и (2.8), то она во всех случаях выполняет функции основной. Для пунктов параллельного соединения максимальная импульсная токовая защита может использоваться только при неполяризованных выключателях. См. также примечание к 2.1.6.
⁴⁾ Максимальная токовая защита обратного направления используется только при неполяризованных выключателях для предотвращения подпитки от смежных подстанций короткого замыкания в распределительном устройстве постоянного тока тяговой подстанции. Защита приходит в действие после срабатывания короткозамыкателя, который, в свою очередь, включается под действием земляной защиты.
⁵⁾ За исключением поляризованных выключателей, на которых данная защита не может использоваться.
⁶⁾ На пунктах параллельного соединения защита минимального напряжения должна применяться без выдержки времени.
⁷⁾ Защиту максимального напряжения следует применять на тяговых подстанциях, если возникает возможность повышения напряжения на шинах свыше допустимого (нормативного) значения (при рекуперации). Рекомендуется уставку по напряжению принимать на 30 % больше номинального напряжения на шинах, выдержку времени устанавливать от 0,1 до 0,15 с.
⁸⁾ Действие тепловой и квазитепловой защиты является комбинированным: при достижении температурой провода уставки предупреждения защита действует на сигнал, а при дальнейшем возрастании температуры до уставки отключения – действует на отключение мгновенно или с зависимой выдержкой времени.

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

Вид защиты	Расчетные формулы	№№ расчетных схем по таблицам 4.1 и 4.2			Режимы, при которых необходимо вычислять указанные параметры ¹⁾	Особые условия
		ТП ²⁾	ПС ²⁾	ППС ²⁾		
1	2	3	4	5	6	7
МИЗ (осн. и доп.)	<i>Выбор</i> $I_{y, \text{МИЗ}} \geq K_3 I_{n, \text{max}}$	–	–	–	норм	$K_3 \geq 1,15$
	<i>Проверка</i> $I_{y, \text{МИЗ}} \leq K_{3y} I_{k, \text{min}}$ (для ПС: $I_{y, \text{МИЗ}} \leq I_{k, \text{min}}$)	1, 4, 12	8, 15	11, 14, 17	мин	K_{3y} по 2.3.2
	$I_{y, \text{МИЗ}} \leq I_{k, \text{min}} - 300$	1, 3, 4 12	8, 15	11, 14, 17	мин	ВАБ-43-6300
МИЗ (особ.)	<i>Выбор</i> $I_{y, \text{МИЗ}} \geq K_3 I_{n, \text{max}}$	–	–	–	вынужд	$K_3 \geq 1,15$
	<i>Проверка</i> как для МИЗ (осн)	18, 19	20, 21	22, 23, 24	мин	как для МИЗ (осн.)
ТО (доп.)	<i>Выбор</i> $I_{y, \text{ТО}} \geq K_{\text{отс}} I_{k, \text{max}}$	1, 3	7	–	макс	$K_{\text{отс}} = 1,2-1,6$
	<i>Проверка</i> $K_{\text{ч}} = I_{k, \text{min}} / I_{y, \text{ТО}}$ $I_{y, \text{ТО}} \geq K_3 I_{n, \text{max}}$	2, 5 –	9 –	– –	мин норм	$K_{\text{ч}} \geq 1,2$ $K_3 = 1,1-1,3$
	<i>Выбор</i> $I_{y, \text{МТЗ}} \geq K_3 I_{n, \text{max}}$	–	–	–	норм	$K_3 = 1,1-1,3$
МТЗ (осн. и рез.)	<i>Проверка</i> $K_{\text{ч}} = I_{k, \text{min}} / I_{y, \text{МТЗ}}$	1, 4, 12	8, 15	11, 14, 17	мин	$K_{\text{ч}} \geq 1,25$ (осн.) $K_{\text{ч}} \geq 1,15$ (рез.)
МТЗ (особ.)	<i>Выбор</i> $I_{y, \text{МТЗ}} \geq K_3 I_{n, \text{max}}$	–	–	–	вынужд	$K_3 = 1,1-1,3$
	<i>Проверка</i> $K_{\text{ч}} = I_{k, \text{min}} / I_{y, \text{МТЗ}}$	18, 19	20, 21	22, 23, 24	мин	$K_{\text{ч}} \geq 1,25$
МТЗО (рез.)	<i>Выбор</i> $I_{y, \text{МТЗО}} \geq K_3 I_{n, \text{max}} / K_{\text{в}}$	–	–	–	норм	$K_3 = 1,1-1,3$ $K_{\text{в}} = 0,85-0,9$
	<i>Проверка</i> $K_{\text{ч}} = I_{k, \text{min}} / I_{y, \text{МТЗО}}$	3', 10'	–	–	мин	$K_{\text{ч}} \geq 1,15$ $R_{\text{МТЗ}} = 0$
ЗМН (рез.)	<i>Выбор</i> $U_{y, \text{ЗМН}} \leq U_{n, \text{min}} / K_3$	–	–	–	мин	$K_3 = 1,1-1,3$
	<i>Проверка</i> $K_{\text{ч}} = U_{y, \text{ЗМН}} / U_{\text{ут}}$	5	6	11, 14	мин	$K_{\text{ч}} \geq 1,25$
ЗМН (особ.)	<i>Выбор</i> $U_{y, \text{ЗМН}} \leq U_{n, \text{min}} / K_3$	–	–	–	мин	$K_3 = 1,1-1,3$
	<i>Проверка</i> $K_{\text{ч}} = U_{y, \text{ЗМН}} / U_{\text{ут}}$	–	20, 21	22, 23, 24	мин	$K_{\text{ч}} \geq 1,25$

Продолжение таблицы 5.2

1	2	3	4	5	6	7
ДЗ	<i>Выбор</i> $R_{у,ДЗ} \geq k_{ч} R_{к,маx}$	1, 4	8, 15	–	мин	$k_{ч} = 1,25$
	<i>Проверка</i> $R_{у,ДЗ} \leq \frac{k_a U_{н,мин}}{k_3 I_{н,маx}}$	–	–	–	норм	$k_3 = 1,1-1,3$
ДЗ (доп.)	<i>Выбор</i> $R_{у,ДЗ} \geq k_{отс} R_{к,мин}$	1, 4	8, 15	–	макс	$k_{отс} = 0,85-0,9$
	<i>Проверка</i> $R_{у,ДЗ} \leq \frac{k_a U_{н,мин}}{k_3 I_{н,маx}}$	–	–	–	норм	$k_3 = 1,1-1,3$
ДЗ (особ.)	<i>Выбор</i> $R_{у,ДЗ} \geq k_{ч} R_{к,маx}$	18, 19	20, 21	–	мин	$k_{ч} = 1,15$
	<i>Проверка</i> $R_{у,ДЗ} \leq \frac{k_a U_{н,мин}}{k_3 I_{н,маx}}$	–	–	–	вынужд	$k_3 = 1,1-1,3$

1) Обозначения режимов:
макс – максимальный режим (см. 4.3.2.4);
мин – минимальный режим (см. 4.3.2.4);
норм – режим нормальной работы с максимальными рабочими токами;
вынужд – вынужденный режим при отключении одной тяговой подстанции и отсутствии короткого замыкания, соответствующий проследованию по межподстанционной зоне одного грузового поезда средневзвешенной массы.

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

Примечания

1 При вычислении $I_{к,мин}$, $R_{к,маx}$, $U_{ут}=U_{к,маx}$ для всех указанных в таблице защит на ТП, ПС и ППС следует учитывать параметры места повреждения изоляции контактной сети в соответствии с 4.3.3.

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

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

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

$I_{у,МИЗ}$, $I_{у,ТО}$, $I_{у,МТЗ}$ – уставки срабатывания по току для защит соответственно МИЗ, ТО, МТЗ;

$I_{н,маx}$ – максимальный ток нормального режима, протекающий через тот выключатель Q , для которого рассчитывается уставка срабатывания защиты;

$I_{к,мин}$ – наименьшее значение тока выключателя Q с рассматриваемой защитой при коротком замыкании в конце зоны защиты или зоны

резервирования;

$I_{к,маx}$ – наибольшее значение тока, протекающего через выключатель с рассматриваемой защитой, при коротком замыкании в конце защищаемой зоны;

$U_{у,ЗМН}$ – уставка срабатывания защиты по минимальному напряжению ЗМН;

$U_{ут} = U_{к,маx}$ – напряжение в узловой точке тяговой сети, где расположена защита, при коротком замыкании в заданных условиях.

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

$R_{у,ДЗ}$ – уставка срабатывания дистанционной защиты ДЗ (защиты по сопротивлению);

$R_{к,маx}$ – наибольшее сопротивление при коротком замыкании, измеряемое защитой ДЗ выключателя Q ;

$R_{к,мин}$ – сопротивление, измеряемое защитой ДЗ, при металлическом коротком замыкании;

$R_{н,мин}$ – сопротивление, измеряемое защитой ДЗ выключателя Q в нормальном режиме в соответствии с 3.4.5.

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

Для максимальной импульсной токовой, максимальной токовой и дистанционной защит в качестве основных на тяговой подстанции и посту секционирования многопутных участков при нормальной схеме питания в таблице 5.2 указаны схемы, при которых обеспечивается селективность действия защит в межподстанционной зоне и их наибольшая чувствительность к коротким замыканиям. Однако при двухстороннем питании использование этих схем предполагает, что при коротком замыкании в конце защищаемой зоны отключение выключателей будет происходить каскадно: сначала отключается выключатель в конце зоны (возле которого произошло замыкание), затем – выключатель пункта параллельного соединения, затем – выключатель рассматриваемого присоединения на тяговой подстанции или на посту секционирования. Процесс каскадного действия происходит естественно за счет перераспределения токов в схеме питания при отключении соответствующего выключателя. При каскадном отключении возрастает время горения дуги в месте повреждения изоляции.

На слабо загруженных участках железных дорог, если обеспечиваются требования устойчивости функционирования по 2.3, допускается использовать для максимальной импульсной токовой, максимальной токовой и дистанционной защит расчетные схемы №№ 3, 7, 10, 13, при которых отключение выключателей тяговой подстанции и поста секционирования происходит не каскадно, а одновременно. Время горения дуги сокращается. Однако при коротком замыкании в конце защищаемой зоны будут происходить

излишние неселективные отключения выключателей присоединений смежных путей.

5.1.5. Наибольший ток нагрузки $I_{H,max}$ при номинальных режимах питания вычисляют для числа поездов в межподстанционной зоне в интенсивный час и их массы в соответствии с 3.1.3.

В вынужденном режиме при отключении одной смежной подстанции значение $I_{H,max}$ вычисляют по 3.4 полагая, что в межподстанционной зоне находится один поезд максимальной или средневзвешенной массы в режиме пуска возле того объекта (тяговая подстанция, пост секционирования или пункт параллельного соединения), на котором находится рассматриваемая защита.

5.2. Максимальная импульсная токовая защита

5.2.1. Уставку максимальной импульсной токовой защиты $I_y = I_{y,МИЗ}$ для присоединения тяговой подстанции выбирают по условию (2.8) при $k_B = 1$, т.е.:

$$I_{y,МИЗ} \geq k_3 I_{H,max}, \quad (5.1)$$

в котором коэффициент запаса k_3 принимают не менее 1,15. Значение тока $I_{H,max}$ вычисляют в соответствии с 3.4.

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

$$I_{y,МИЗ} \leq k_{y3} I_{k,min}, \quad (5.2)$$

в котором значение k_{y3} принимают по 2.3.2.

Кроме того, для выключателей, уставка которых не зависит от параметров переходного процесса при возрастании тока, рекомендуется в соответствии с 2.3.2 соблюдение условия (2.5).

Если одновременное соблюдение условий (2.5), (5.1) и (5.2) не обеспечивается, то руководствуются 1.4.

5.2.2. Уставку $I_{y,МИЗ}$ выключателей на постах секционирования и пунктах параллельного соединения следует выбирать по условию (5.1). Выбранная уставка проверяется по формуле (2.5) и по условию:

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

Для выключателя пункта параллельного соединения из вычисленных для расчетных схем №№ 11, 14, 17 значений тока $I_{k,min} = I_Q = I_{QП11}$ или $I_{k,min} = I_Q = I_{QП21}$ в условие (2.5) подставляют наименьшее значение.

5.2.3. Выбор особых уставок $I_{y,МИЗ}$ осуществляют по формуле (2.8) при коэффициенте возврата $k_B = 1$, в которой ток $I_{H,max}$ определяют в соответствии с 5.1.5. Для выбранных уставок проверяется выполнение условий (2.4) и (2.5), в которых значения $I_{k,min}$ вычисляют для расчетных схем, указанных в таблице 5.2.

Пример 5.1 Для узловой схемы питания трехпутного участка (рисунок 4.1, б) рассчитать параметры основной максимальной импульсной токовой защиты МИЗ для

выключателей тяговой подстанции ($k_{y3} = 1,05$) и поста секционирования.

Контактная сеть на всех путях содержит медный несущий трос сечением 120 мм^2 , два контактных фасонных медных провода каждый сечением 100 мм^2 и усиливающий алюминиевый провод сечением 185 мм^2 ($r_k = 0,047 \text{ Ом/км}$). Расстояние от тяговой подстанции A до поста секционирования ПС $\ell_1 = 7 \text{ км}$, расстояние от поста секционирования ПС до тяговой подстанции B $\ell_2 = 8 \text{ км}$. Питающие линии контактной сети каждого пути выполнены четырьмя алюминиевыми проводами сечением 185 мм^2 ($r_l = 0,042 \text{ Ом/км}$); их длина у подстанции A равна $\ell_l = \ell_{лА} = 2 \text{ км}$, у подстанции B $\ell_l = \ell_{лВ} = 0,5 \text{ км}$. Рельсы Р65 с длиной звеньев 25 м ($r_p = 0,005 \text{ Ом/км}$).

Параметры тяговых подстанций $R_{пА} = R_{пВ} = R_{п} = 0,138 \text{ Ом}$, $U_{А,рас} = U_{В,рас} = U_{рас} = 3120 \text{ В}$. Трос группового заземления на железобетонных опорах выполнен сталеалюминиевым проводом сечением 95/16 с сопротивлением $0,306 \text{ Ом/км}$. С учетом длины троса $0,6 \text{ км}$ и приведения сопротивления к температуре $40 \text{ }^\circ\text{C}$ по формуле (4.2) получаем $R_{тз} = 0,197 \text{ Ом}$.

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

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

$$U_d = 1350L_{yниз}b = 1350 \cdot 0,26 \cdot 2 \cdot 0,6 = 420 \text{ В.}$$

Выбираем уставку для защиты МИЗ в соответствии с таблицей 5.2. Для выключателя $QA1$ на тяговой подстанции A (рисунок 4.1, б) имеем: $I_{y,МИЗ} \geq K_3 I_{н,макс} = 1,15 \cdot 3000 = 3450 \text{ А}$. Принимаем $I_{y,МИЗ} = 3500 \text{ А}$.

Для выключателя $QPB1$ поста секционирования получаем: $I_{y,МИЗ} \geq K_3 I_{н,макс} = 1,15 \cdot 2300 = 2650 \text{ А}$. Принимаем $I_{y,МИЗ} = 2700 \text{ А}$.

Проверка выбранных уставок в соответствии с таблицей 5.2 производится для выключателя $QA1$ по расчетной схеме № 4, а для выключателя $QPB1$ – по расчетной схеме № 8.

Проверяем выбранную уставку выключателя $QA1$ на чувствительность для расчетной схемы № 4. По таблице 4.1 находим значения расчетных сопротивлений тяговой сети:

$$R_{тсА} = r_p \ell_1 = 0,005 \cdot 7 = 0,035 \text{ Ом}, \quad R_{тсВ} = \infty,$$

$$R_{тсАВ} = r_{лА} \ell_{лА} + r_k \ell_1 = 0,042 \cdot 2 + 0,047 \cdot 7 = 0,413 \text{ Ом}.$$

По формулам (4.1) находим значения расчетных сопротивлений схемы замещения:

$$R_A = R_{пА} + R_{тсА} = 0,138 + 0,035 = 0,173 \text{ Ом},$$

$$R_B = R_{пВ} + R_{тсВ} = 0,138 + \infty = \infty,$$

$$R_{АВ} = R_{тсАВ} + R_{тз} = 0,413 + 0,197 = 0,610 \text{ Ом}.$$

По таблице 4.1 для схемы № 4 и формуле (4.19) определяем:

$$I_{QA1} = I_A = \frac{U_{рас} - U_d}{R_A + R_{АВ} \left(1 + \frac{R_A}{R_B} \right)} = \frac{3120 - 420}{0,173 + 0,610 \left(1 + \frac{0,173}{\infty} \right)} = 3448 \text{ А}.$$

Поскольку ток I_{QA1} вычислен с учетом падения напряжения в дуге U_d и сопротивления места повреждения $R_{тз}$, то в соответствии с 4.4.1 $I_{QA1} = I_{к,мин}$.

Для выключателя $QA1$ условие проверки по формуле (2.4) имеет вид: $I_{y,МИЗ} \leq 1,05 I_Q$, т.е. $I_{y,МИЗ} \leq 1,05 \cdot 3448 \text{ А}$ или $I_{y,МИЗ} \leq 3620 \text{ А}$. Поскольку принято $I_{y,МИЗ} = 3500 \text{ А}$, то условия проверки (2.4) выполняются.

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

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

$$R_{тсВ} = \infty, \quad R_{тсАВ} = r_{лВ} \ell_{лВ} + r_k \ell_2 = 0,042 \cdot 0,5 + 0,047 \cdot 8 = 0,397 \text{ Ом}.$$

По формулам (4.1) находим:

$$R_A = R_{пА} + R_{тсА} = 0,138 + 0,213 = 0,351 \text{ Ом},$$

$$R_B = R_{пВ} + R_{тсВ} = 0,138 + \infty = \infty,$$

$$R_{AB} = R_{тсАВ} + R_{тгз} = 0,397 + 0,197 = 0,594 \text{ Ом}.$$

По таблице 4.1 для схемы № 8 и формуле (4.19) определяем:

$$I_{QПВ1} = I_A = I_{к,мин} = \frac{U_{рас} - U_{д}}{R_A + R_{AB} \left(1 + \frac{R_A}{R_B} \right)} = \frac{3120 - 420}{0,351 + 0,594 \left(1 + \frac{0,351}{\infty} \right)} = 2857 \text{ А}.$$

Для поста секционирования ПС условие чувствительности в соответствии с выражением (5.3) имеет вид $I_{y,миз} \leq I_Q$. Поскольку было принято для поста секционирования $I_{y,миз} = 2700 \text{ А}$, то при $I_{к,мин} = 2857 \text{ А}$ условие (5.3) выполняется. Поэтому выключатель $QПВ1$ будет отключаться при коротком замыкании в любой точке зоны защиты, но, если это замыкание происходит в конце зоны, то отключение выключателя $QПВ1$ будет каскадным, т.е. после отключения выключателя $QB1$ на смежной подстанции B .

5.3. Токовая отсечка

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

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

Значение тока $I_{к,маx} = I_Q$ выключателя Q ($QA1$ или $QПВ1$ – в соответствии с таблицей 4.1) в условии (2.6) вычисляют по 4.4.1.

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

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

При проверке выбранной уставки $I_{y,ТО}$ по условию (2.1) значения тока $I_{к,мин} = I_Q$ вычисляют по 4.4.1.

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

При проверке выбранной уставки по условию (2.8) значение тока $I_{н,маx} = I_Q = I_{QA1}$ для тяговых подстанций вычисляют по формуле (3.3), значение тока $I_{н,маx} = I_Q = I_{QПВ1}$ для поста секционирования – по формуле (3.4).

5.3.4. Выдержку времени не используют.

Пример 5.2 Выбрать на тяговой подстанции и на посту секционирования уставку токовой отсечки при узловой схеме питания (рисунок 4.1, б) трехпутного участка ($n_1 = n_2 = 3$). Расстояния: $\ell_{лА} = 2 \text{ км}$, $\ell_1 = 7 \text{ км}$, $\ell_2 = 8 \text{ км}$, $\ell_{лВ} = 0,5 \text{ км}$. Сопротивления элементов схемы: $R_{пА} = R_{пВ} = 0,138 \text{ Ом}$, $r_k = 0,047 \text{ Ом/км}$, $r_{лА} = r_{лВ} = 0,042 \text{ Ом/км}$, $r_p = 0,005 \text{ Ом/км}$, $R_{тгз} = 0,197 \text{ Ом}$. Расчетное напряжение $U_{рас} = 3120 \text{ В}$, падение напряжения

в дуге $U_d = 420$ В. Ток нагрузки присоединения контактной сети на тяговой подстанции $I_{н,макс} = 3000$ А, присоединения на посту секционирования $I_{н,макс} = 2300$ А. Выдержка времени не используется.

Тяговая подстанция

Рассматриваем защиту ТО на выключателе $QA1$ тяговой подстанции A (рисунок 4.1, б). Определяем значение тока $I_{к,макс}$ для этого выключателя при коротком замыкании на посту секционирования (расчетная схема № 3 таблицы 4.1). Для этой схемы:

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

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

$$R_{тсАВ} = 0.$$

По формулам (4.1) находим:

$$R_A = R_{пА} + R_{тсА} = 0,138 + 0,173 = 0,311 \text{ Ом},$$

$$R_B = R_{пВ} + R_{тсВ} = 0,138 + 0,172 = 0,310 \text{ Ом},$$

$$R_{АВ} = R_{тсАВ} + R_{тгз} = 0 + 0 = 0.$$

По таблице 4.1 для схемы № 3 и формуле (4.19) определяем:

$$I_{QA1} = \frac{I_A}{n_1} = I_{к,макс} = \frac{U_{рас} - U_d}{n_1 \left[R_A + R_{АВ} \left(1 + \frac{R_A}{R_B} \right) \right]} = \frac{3120 - 0}{3(0,311 + 0)} = 3345 \text{ А}.$$

Поскольку ток I_{QA1} вычислен при $U_d = 0$ и $R_{тгз} = 0$, то в соответствии с 4.4.1 $I_{QA1} = I_{к,макс}$.

По условию (2.6) выбираем уставку

$$I_y \geq k_{отс} I_{к,макс} = 1,3 \cdot 3345 = 4349 \text{ А}.$$

Принимаем $I_y = I_{y,ТО} = 4400$ А.

Проверяем условие отстройки от нормальных режимов по формуле (2.8)

$$I_y \geq \frac{k_3}{k_B} I_{н,макс} \quad \text{или} \quad 4400 > \frac{1,2}{1} 3000 = 3600 \text{ А}.$$

Условие отстройки выполняется.

Проверяем по формуле (2.1) чувствительность при близких коротких замыканиях для расчетной схемы № 2 таблицы 4.1. Для этой схемы $R_{тсА} = R_{тсАВ} = 0$, $R_{тсВ} = \infty$. По формулам (4.1) находим:

$$R_A = R_{пА} + R_{тсА} = 0,138 + 0 = 0,138 \text{ Ом},$$

$$R_B = R_{пВ} + R_{тсВ} = 0,138 + \infty = \infty,$$

$$R_{АВ} = R_{тсАВ} + R_{тгз} = 0 + 0,197 = 0,197 \text{ Ом}.$$

По таблице 4.1 для схемы № 2 и формуле (4.19) определяем:

$$I_{QA1} = I_A = I_{к,мин} = \frac{U_{рас} - U_d}{R_A + R_{АВ} \left(1 + \frac{R_A}{R_B} \right)} = \frac{3120 - 420}{0,138 + 0,197 \left(1 + \frac{0,138}{\infty} \right)} = 8060 \text{ А}.$$

По формуле (2.1) вычисляем

$$k_ч = \frac{I_{к,мин}}{I_y} = \frac{8060}{4400} = 1,83.$$

Полученное значение $k_ч$ больше указанного в таблице 2.1, поэтому условие чувствительности выполняется.

Пост секционирования

Рассматриваем защиту ТО на выключателе $QPВ1$ поста секционирования ПС (рисунок 4.1, б). Определяем значение тока $I_{к,макс}$ для этого выключателя при коротком замыкании на шинах смежной тяговой подстанции (расчетная схема № 7 таблицы 4.1). Для

этой схемы:

$$R_{тсА} = (r_{лА} \ell_{лА} + r_k \ell_1) / n_1 + (r_{лВ} \ell_{лВ} + r_k \ell_2) / n_2 + r_p \ell_{АВ} = \\ = (0,042 \cdot 2 + 0,047 \cdot 7) / 3 + (0,042 \cdot 0,5 + 0,047 \cdot 8) / 3 + 0,005 \cdot (7+8) = 0,345 \text{ Ом}, \\ R_{тсВ} = R_{тсАВ} = 0.$$

По формулам (4.1) находим:

$$R_A = R_{пА} + R_{тсА} = 0,138 + 0,345 = 0,483 \text{ Ом}, \\ R_{АВ} = R_{тсАВ} + R_{тгз} = 0 + 0 = 0.$$

По таблице 4.1 для схемы № 7 и формуле (4.19) определяем:

$$I_{QПВ1} = \frac{I_A}{n_2} = I_{к,макс} = \frac{U_{рас} - U_d}{n_2 \left[R_A + R_{АВ} \left(1 + \frac{R_A}{R_B} \right) \right]} = \frac{3120 - 0}{3(0,483 + 0)} = 2150 \text{ А}.$$

Принимаем $I_y = I_{y,ТО} = 2500 \text{ А}$.

Проверяем условие отстроенности от нормальных режимов по формуле (2.8)

$$I_y \geq \frac{k_3}{k_B} I_{н,макс} \quad \text{или} \quad 2500 < \frac{1,2}{1} 2300 = 2760 \text{ А}.$$

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

Проверяем выполнение условия чувствительности при близких коротких замыканиях. Находим значение $I_{к,мин}$ для расчетной схемы № 9 таблицы 4.1. Для этой схемы:

$$R_{тсА} = (r_{лА} \ell_{лА} + r_k \ell_1) / n_1 + r_p \ell_1 = (0,042 \cdot 2 + 0,047 \cdot 7) / 3 + 0,005 \cdot 7 = 0,173 \text{ Ом}, \\ R_{тсВ} = \infty, \quad R_{тсАВ} = 0.$$

По формулам (4.1) находим:

$$R_A = R_{пА} + R_{тсА} = 0,138 + 0,173 = 0,311 \text{ Ом}, \\ R_{АВ} = R_{тсАВ} + R_{тгз} = 0 + 0,197 = 0,197 \text{ Ом}.$$

По таблице 4.1 для схемы № 9 и формуле (4.19) определяем:

$$I_{QПВ1} = I_A = I_{к,мин} = \frac{U_{рас} - U_d}{R_A + R_{АВ} \left(1 + \frac{R_A}{R_B} \right)} = \frac{3120 - 420}{0,311 + 0,197(1 + 0)} = 5315 \text{ А}.$$

По формуле (2.1) вычисляем

$$k_ч = \frac{I_{к,мин}}{I_y} = \frac{5315}{2800} = 1,90.$$

Сравнивая полученное значение с требованиями по таблице 2.1 устанавливаем, что условие чувствительности выполняется.

5.4. Максимальная токовая защита прямого направления

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

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

5.4.3. При проверке выбранной уставки $I_y = I_{y,МТЗ}$ защиты МТЗ присоединения тяговой подстанции на выполнение требований чувствительности по условию (2.1), значение тока $I_{к,мин} = I_Q = I_{QА1}$ для МТЗ,

действующей как основная защита в зоне до поста секционирования, определяют в зависимости от схемы питания по 4.4.1 с учетом падения напряжения в дуге U_d и сопротивления троса группового заземления $R_{ггз}$.

Пример 5.3 Выбрать на тяговой подстанции и на посту секционирования уставку максимальной токовой защиты, реализуемой комплектом защиты, уставка которой не зависит от параметров переходного процесса, при узловом режиме питания (рисунок 4.1, б) трехпутного участка ($n_1 = n_2 = 3$). Расстояния: $\ell_{лА} = 2$ км, $\ell_1 = 7$ км, $\ell_2 = 8$ км, $\ell_{лВ} = 0,5$ км. Сопротивления элементов схемы: тяговых подстанций A и B $R_{пА} = R_{пВ} = 0,138$ Ом, контактной сети $r_k = 0,047$ Ом/км, питающих линий $r_{лА} = r_{лВ} = 0,042$ Ом/км, рельсов $r_p = 0,005$ Ом/км, троса группового заземления $R_{ггз} = 0,197$ Ом.

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

Тяговая подстанция

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

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

Принимаем $I_y = I_{y,МТЗ} = 3500$ А.

Рассмотрим возможность использования защиты МТЗ при каскадном действии (после отключения выключателя $QПВ1$ на посту секционирования ПС). Этому случаю на основании таблицы 5.2 соответствует расчетная схема № 4 (таблица 4.1), для которой в примере 5.1 вычислено: $R_A = 0,173$ Ом, $R_B = \infty$, $R_{тсАВ} = 0,413$ Ом, $I_{QA1} = I_{к,мин} = 3448$ А.

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

Если по обе стороны от поста секционирования на длине около 2 км вместо группового заземления использовать индивидуальные заземления опор, то $R_{ггз} = 0$.

Тогда $R_{АВ} = R_{тсАВ} + R_{ггз} = 0,413 + 0 = 0,413$ Ом. По формуле (4.19) вычисляем:

$$I_{QA1} = I_A = I_{к,мин} = \frac{U_{рас} - U_d}{R_A + R_{АВ} \left(1 + \frac{R_A}{R_B} \right)} = \frac{3120 - 420}{0,173 + 0,413 \left(1 + \frac{0,173}{\infty} \right)} = 4607 \text{ А.}$$

Коэффициент чувствительности находим по формуле (2.1)

$$k_{ч} = \frac{I_{к,мин}}{I_y} = \frac{4607}{3500} = 1,32.$$

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

Пост секционирования

Рассматривается защита МТЗ на выключателе $QПВ1$ поста секционирования ПС (рисунок 4.1, б). Выбираем уставку по условию (2.8)

$$I_y \geq \frac{k_3}{k_B} I_{н,макс} = \frac{1,15}{1} 2300 = 2645 \text{ А.}$$

Принимаем $I_y = I_{y,МТЗ} = 2700$ А.

В соответствии с таблицей 5.2 для защиты МТЗ на посту секционирования расчетной

является схема № 8, для которой в примере 5.1 вычислен ток $I_{QПВ1} = I_A = I_{к,мин} = 2857$ А.

Находим значение коэффициента чувствительности по формуле (2.1)

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{к,мин}}{I_{\text{y}}} = \frac{2857}{2700} = 1,06.$$

Это значение ниже минимально необходимого 1,25 (таблица 2.1), поэтому чувствительность защиты МТЗ на посту секционирования не обеспечивается.

Ограничение нормальной работы защиты происходит из-за большого сопротивления троса группового заземления. Следовательно, в данном случае необходимо на длине не менее 2 км возле тяговых подстанций вместо группового использовать индивидуальное заземление опор. В последнем случае имеем $R_{\text{ТЗ}} = 0$ и значение тока $I_{к,мин}$ будет равно 3610 А. Коэффициент чувствительности возрастает до $k_{\text{ч}} = 3610/2700 = 1,33$, что выше минимально необходимого 1,25 (таблица 2.1). Следовательно, защита обеспечит требования чувствительности. В расчетной схеме № 6 значение коэффициента чувствительности будет еще больше.

5.5. Максимальная токовая защита обратного направления

5.5.1. Защита используется только при двухстороннем питании контактной сети. Уставку максимальной токовой защиты обратного направления $I_{\text{y}} = I_{\text{y,МТЗО}}$ выбирают по условию (2.8), в котором принимают в качестве $I_{\text{н,мак}}$ – наибольшее значение тока присоединения при рекуперации, коэффициент запаса k_3 принимают от 1,1 до 1,2, коэффициент возврата $k_{\text{в}} = 0,85 \dots 0,9$.

При отсутствии рекуперации значение $I_{\text{н,мак}}$ принимают не менее 500 А.

5.5.2 Выбранная уставка проверяется на чувствительность по условию (2.1). Расчетной точкой короткого замыкания являются шины подстанции (схемы №№ 3' и 10' таблицы 4.1). Защита удовлетворяет требованиям чувствительности при $k_{\text{ч}} \geq 1,15$.

На многопутных участках рекомендуется принимать значения n_2 в схеме № 3' и n_3, n_4 в схеме № 10' исходя из условия, что контактная сеть одного из путей отключена.

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

Пример 5.4 Выбрать на тяговой подстанции уставку максимальной токовой защиты для обратного направления тока МТЗО при узловой схеме питания (рисунок 4.1, б) двухпутного участка ($n_1 = n_2 = 2$). Расстояния: $\ell_{\text{ЛА}} = 2$ км, $\ell_1 = 7$ км, $\ell_2 = 8$ км, $\ell_{\text{ЛВ}} = 0,5$ км. Сопротивления элементов схемы: $R_{\text{ПА}} = R_{\text{ПВ}} = 0,138$ Ом, $r_{\text{к}} = 0,047$ Ом/км, $r_{\text{ЛА}} = r_{\text{ЛВ}} = 0,042$ Ом/км, $r_{\text{р}} = 0,007$ Ом/км.

Расчетное напряжение $U_{\text{рас}} = 3120$ В, падение напряжения в дуге $U_{\text{д}} = 420$ В. Ток присоединения тяговой подстанции при рекуперации $I_{\text{н,мак}} = 1000$ А.

Уставка защиты МТЗО выключателя Q41 тяговой подстанции А (рисунок 4.1, б) должна отвечать условию (2.8)

$$I_{\text{y}} \geq \frac{k_3}{k_{\text{в}}} I_{\text{н,мак}} = \frac{1,2}{0,9} 1000 = 1333 \text{ А.}$$

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

Чувствительность проверяется по формуле (2.1), в которой значение $I_{к,мин}$ вычисляют для расчетной схемы № 3 таблицы 4.1 при условии, что на участке ℓ_2 контактная сеть одного из путей отключена ($n_2 = 2 - 1 = 1$). Для этой схемы:

$$R_{тсА} = 0, \quad R_{тсАВ} = 0,$$

$$R_{тсВ} = (r_{лА} \ell_{лА} + r_{к} \ell_1) / n_1 + (r_{лВ} \ell_{лВ} + r_{к} \ell_2) / n_2 + r_p (\ell_1 + \ell_2) = \\ = (0,042 \cdot 2 + 0,047 \cdot 7) / 2 + (0,042 \cdot 0,5 + 0,047 \cdot 8) / (2 - 1) + 0,007 \cdot (7 + 8) = 0,709 \text{ Ом.}$$

По формулам (4.1) находим:

$$R_A = R_{пА} + R_{тсА} = 0,138 + 0 = 0,138 \text{ Ом,}$$

$$R_B = R_{пВ} + R_{тсВ} = 0,138 + 0,709 = 0,847 \text{ Ом,}$$

$$R_{AB} = R_{тсАВ} + R_{тгз} = 0 + 0 = 0.$$

По таблице 4.1 (схема № 3') и формуле (4.20) определяем:

$$I_{QА1} = \frac{I_B}{n_1} = I_{к,мин} = \frac{U_{рас} - U_{д}}{n_1 \left[R_B + R_{AB} \left(1 + \frac{R_A}{R_B} \right) \right]} = \frac{3120 - 420}{2(0,843 + 0)} = 1594 \text{ А.}$$

Находим значение коэффициента чувствительности по формуле (2.1):

$$k_{ч} = \frac{I_{к,мин}}{I_y} = \frac{1594}{1350} = 1,18.$$

Поскольку защиты МТЗО и ЗМН резервируют друг друга, то полученное значение $k_{ч} = 1,18$ является достаточным (оно больше нормативного значения 1,15, определяемого по таблице 2.1).

Выдержку времени устанавливаем 0,2 с.

5.6. Защита минимального напряжения

5.6.1. На тяговых подстанциях защита минимального напряжения используется как резервная для защиты распределительного устройства постоянного тока тяговой подстанции. Она предотвращает подпитку места повреждения от смежных подстанций. Уставку $U_y = U_{y,ЗМН}$ выбирают по условию (2.9), в котором принимают напряжение $U_{н,мин}$ равным наименьшему допустимому значению на шинах, а значения коэффициентов $k_з$ и $k_в$ — в соответствии с 2.12. Выбранную уставку проверяют на чувствительность к короткому замыканию на шинах по формуле (2.2), в которой значение $U_{к,маx}$ определяется падением напряжения в дуге при перекрытии изолятора. Это падение напряжения определяют по формуле (4.13).

Допускается принимать $U_{к,маx}$ от 700 до 1000 В.

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

5.6.2. На постах секционирования используется для защиты сборных шин, она может также выполнять роль резервной для защиты контактной сети при близких коротких замыканиях. Уставку выбирают так же, как для тяговых подстанций при напряжении $U_{н,мин}$, равном наименьшему допустимому значению на перегонах контактной сети. Выдержку времени устанавливают в соответствии с 2.2.

5.6.3. На пунктах параллельного соединения защита минимального

напряжения выполняется без выдержки времени. Она используется как дополнительная, ускоряя отключение близких коротких замыканий, поскольку ее действие не зависит от действия других выключателей поврежденной зоны. В отличие от других защит, которые срабатывают на пункте параллельного соединения только после отключения выключателя на посту секционирования или тяговой подстанции, защита минимального напряжения приходит в действие мгновенно. В этом случае в качестве расчетных следовало бы использовать схемы № 10 и № 13 таблицы 4.1.

Если, однако, вблизи пункта параллельного соединения находится электровоз, автоматически переходящий кратковременно в режим рекуперации при коротком замыкании в контактной сети, то действие защиты может произойти с задержкой до 0,04 с на время затухания переходных процессов в цепи электровоза. Кроме того, время отключения короткого замыкания быстродействующим выключателем со стороны смежного элемента может оказаться меньше, чем собственное время действия защиты ЗМН на пунктах параллельного соединения. По этим причинам для ППС рекомендуется расчетными считать схемы № 11 и № 14 таблицы 4.1. Если защита ЗМН отвечает требованиям чувствительности при этих схемах питания, то она тем более будет чувствительной при схемах № 10 и № 13.

5.6.4. Уставку защиты минимального напряжения для выключателей пунктов параллельного соединения выбирают по условию (2.9) при напряжении $U_{н,мин}$, равном наименьшему допустимому на перегонах контактной сети, коэффициент запаса k_3 принимают от 1,1 до 1,3, коэффициент возврата $k_в = 1$. Проверку чувствительности осуществляют по формуле (2.2) при коротком замыкании возле смежного элемента (схемы № 11 и № 14 таблицы 4.1).

Значение $U_{к,мах}$ вычисляют в соответствии с 4.4.2.

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

Пример 5.5. Определить уставку защиты минимального напряжения на пункте параллельного соединения ППС1 двухпутного ($n_1 = n_2 = n_3 = n_4 = 2$) участка (рисунок 4.1, в) при следующих исходных данных: сопротивления смежных тяговых подстанций $R_{пА} = R_{пВ} = 0,138$ Ом, расчетное напряжение $U_{рас} = 3120$ В (см. пример 4.1), сопротивление питающих линий $r_{лА} = r_{лВ} = 0,042$ Ом/км, сопротивление 1 км контактной сети одного пути $r_к = 0,047$ Ом/км (см. пример 4.2), сопротивление рельсовой цепи двухпутного участка $r_р = 0,0075$ Ом/км.

Сопротивление троса группового заземления ($r_{тз} = 0,204$ Ом/км) с приведением его к температуре 40 °С (см. 4.3.1) и учетом длины $l_{тз} = 0,6$ км равно $R_{тз} = 1,08 \cdot 0,204 \cdot 0,6 = 0,132$ Ом.

Минимальное напряжение контактной сети в нормальном режиме $U_{н,мин} = 2700$ В. Падение напряжения в дуге принимаем $U_д = 420$ В (см. пример 5.3).

Длина питающих линий: $l_{лА} = 2$ км, $l_{лВ} = 0,5$ км. Расстояния (см. рисунок 4.1, в): $l_1 = 3$ км, $l_2 = 4$ км, $l_3 = 4,1$ км, $l_4 = 3,9$ км, $l_{АВ} = 15$ км. Протяженность контактной сети от

тяговой подстанции A до поста секционирования ПС $\ell_{АП} = \ell_1 + \ell_2 = 3+4 = 7$ км, протяженность контактной сети от поста секционирования ПС до тяговой подстанции B $\ell_{ПВ} = \ell_3 + \ell_4 = 4,1+3,9 = 8$ км.

В соответствии с условием (2.9) при $k_3 = 1,2$, $k_B = 1$ получаем

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

Принимаем $U_{y,3MH} = 2200$ В.

Проверяем условия чувствительности для схемы № 11.

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

$$\begin{aligned} R_{тсА} &= (r_{лА} \ell_{лА} + r_k \ell_1) / n_1 + r_p (\ell_1 + \ell_2) = \\ &= (0,042 \cdot 2 + 0,047 \cdot 3) / 2 + 0,0075 \cdot (3+4) = 0,165 \text{ Ом,} \\ R_{тсВ} &= (r_{лВ} \ell_{лВ} + r_k \ell_4) / n_4 + r_k \ell_3 / n_3 + r_k \ell_2 / (n_2 - 1) + r_p (\ell_3 + \ell_4) = \\ &= (0,042 \cdot 0,5 + 0,047 \cdot 3,9) / 2 + 0,047 \cdot 4,1 / 2 + 0,047 \cdot 4 / (2-1) + 0,075 \cdot (4,1+3,9) = 0,447 \text{ Ом,} \\ R_{тсАВ} &= r_k \ell_2 = 0,047 \cdot 4 = 0,188 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

По формулам (4.1) находим результирующие сопротивления

$$\begin{aligned} R_A &= R_{пА} + R_{тсА} = 0,138 + 0,165 = 0,303 \text{ Ом,} \\ R_B &= R_{пВ} + R_{тсВ} = 0,138 + 0,447 = 0,585 \text{ Ом,} \\ R_{AB} &= R_{тсАВ} + R_{тгз} = 0,188 + 0,132 = 0,320 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

По формуле (4.19) находим:

$$I_{QА1} = I_A = \frac{U_{рас} - U_d}{R_A + R_{AB} \left(1 + \frac{R_A}{R_B} \right)} = \frac{3120 - 420}{0,303 + 0,320 \left(1 + \frac{0,303}{0,585} \right)} = 3423 \text{ А.}$$

По формуле (4.21) определяем:

$$U_A = U_{A,рас} - I_A R_{пА} = 3120 - 3423 \cdot 0,138 = 2647 \text{ В.}$$

По таблице 4.4 для расчетной схемы № 11 определяем:

$$U = U_A = 2647 \text{ В, } I = I_A = 3423 \text{ А,}$$

$$R = (r_{лА} \ell_{лА} + r_k \ell_1) / n_1 + r_p \ell_1 = (0,042 \cdot 2 + 0,047 \cdot 3) / 2 + 0,0075 \cdot 3 = 0,135 \text{ Ом.}$$

По формуле (4.22) находим:

$$U_{yt} = U_{k,max} = U - I R = 2647 - 3423 \cdot 0,135 = 2185 \text{ В.}$$

Находим значение коэффициента чувствительности по формуле (2.2):

$$k_{ч} = \frac{U_{y,3MH}}{U_{k,max}} = \frac{2200}{2185} = 1,07.$$

Полученное значение коэффициента меньше нормативного 1,25 (см. таблицу 5.2), следовательно уверенное действие защиты будет происходить только при более близких к ППС1 точках короткого замыкания.

5.7. Дистанционная защита

5.7.1. Уставку $R_{y,ДЗ}$ дистанционной защиты выбирают по условию:

$$R_{y,ДЗ} \geq k_{ч} R_{k,max}, \quad (5.4)$$

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

Коэффициент чувствительности $k_{ч}$ в выражении (5.4) принимают равным 1,25, если защита выполняет роль основной и 1,15 – если она является резервной.

Выдержка времени для основной защиты не используется, для резервной

защиты ее принимают по 2.2.

5.7.2. Вычисление значения $R_{к,маx}$ в общем случае, в том числе с использованием компьютерных программ, следует выполнять по формуле (4.23) для выбранной по таблице 5.2 расчетной схемы с учетом сопротивления троса группового заземления $R_{тгз}$ и падения напряжения в дуге U_d или по формулам, приведенным в таблицах 4.1 и 4.2 с учетом $R_{тгз}$ и сопротивления дуги R_d .

Сопротивление дуги R_d следует вычислять по формуле, Ом:

$$R_d = U_d / I_k, \quad (5.5)$$

где U_d – падение напряжения в дуге, определяемое по формуле (4.13), В;
 I_k – ток короткого замыкания расчетной схемы, вычисляемый по формуле (4.18).

5.7.3. Выбранные уставки проверяют на выполнение условия (2.10) при коэффициентах k_3 от 1,1 до 1,3. Коэффициент k_b для защиты без выдержки времени принимают равным 1, для защит с выдержкой времени в соответствии с 2.3.5. Если адаптация к предшествующему режиму в дистанционной защите не предусмотрена, принимают коэффициент $k_a = 1$. Значения $I_{н,маx}$ вычисляют по 3.4.1. Значение $U_{н,мин}$ принимают в соответствии с 3.4.4.

Пример 5.6 Выбрать на тяговой подстанции и на посту секционирования уставку дистанционной защиты для двухпутного участка ($n_1 = n_2 = 2$) со схемой питания, приведенной на рисунке 4.1, в при следующих исходных данных: $R_{пА} = R_{пВ} = 0,138$ Ом, $r_{лА} = r_{лВ} = 0,042$ Ом/км, $r_k = 0,047$ Ом/км, $r_p = 0,0075$ Ом/км, $R_{тгз} = 0,132$ Ом.

Длина питающих линий: $l_{лА} = 2$ км, $l_{лВ} = 0,5$ км. Расстояния (см. рисунок 4.1, в): $l_1 = 3$ км, $l_2 = 4$ км, $l_3 = 4,1$ км, $l_4 = 3,9$ км, $l_{АВ} = 15$ км. Протяженность контактной сети от тяговой подстанции А до поста секционирования ПС $l_{АП} = l_1 + l_2 = 3+4 = 7$ км, протяженность контактной сети от поста секционирования ПС до тяговой подстанции В $l_{ПВ} = l_3 + l_4 = 4,1+3,9 = 8$ км.

Напряжение на шинах подстанции $U_{А,рас} = 3120$ В. В нормальном режиме максимальная нагрузка присоединения подстанции $I_{н,маx} = 3400$ А, присоединения поста секционирования $I_{н,маx} = 2900$ А.

Если дистанционная защита рассматривается как основная, то принимают $k_ч = 1,25$, если – как резервная, то принимают $k_ч = 1,15$. В остальных расчетах для основной и резервной защит совпадают.

а) Защита на присоединении тяговой подстанции

Уставка на тяговой подстанции должна отвечать условию (2.10)

$$R_{у,ДЗ} \leq \frac{k_a U_{н,мин}}{k_3 k_b I_{н,маx}} = \frac{1 \cdot 3000}{1,2 \cdot 1 \cdot 3400} = 0,735 \text{ Ом.}$$

Выбираем уставку по условию обеспечения чувствительности к коротким замыканиям. Для защиты на присоединении тяговой подстанции расчетной является схема № 4 (см. таблицу 5.2).

Для схемы № 4 по таблице 4.1 находим ($l_1 = l_{АП}$):

$$R_{тсА} = r_p l_{АП} = 0,0075 \cdot 7 = 0,053 \text{ Ом.} \quad R_{тсВ} = \infty,$$

$$R_{тсАВ} = r_{лА} l_{лА} + r_k l_{АП} = 0,042 \cdot 2 + 0,047 \cdot 7 = 0,413 \text{ Ом.}$$

По формуле (4.1) вычисляем:

$$\begin{aligned} R_A &= R_{\text{ПА}} + R_{\text{ТСА}} = 0,138 + 0,053 = 0,191 \text{ Ом}, \\ R_B &= R_{\text{ПВ}} + R_{\text{ТСВ}} = R_{\text{ПВ}} + \infty = \infty, \\ R_{AB} &= R_{\text{ТСAB}} + R_{\text{ТГЗ}} = 0,413 + 0,132 = 0,545 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

По формуле (4.19) и таблице 4.1 для схемы № 4 находим:

$$I_{Q_{A1}} = I_A = \frac{U_{\text{рас}} - U_{\text{д}}}{R_A + R_{AB} \left(1 + \frac{R_A}{R_B} \right)} = \frac{3120 - 420}{0,191 + 0,545(1 + 0)} = 3668 \text{ А}.$$

Напряжение U_A на шинах подстанции A находим по формуле (4.21):

$$U_A = U_{\text{А,рас}} - I_A R_{\text{ПА}} = 3120 - 3668 \cdot 0,138 = 2614 \text{ В}.$$

По формуле (4.23) находим:

$$R_{\text{к,макс}} = R_{Q_{A1}} = U_A / I_{Q_{A1}} = 2614 / 3668 = 0,712 \text{ Ом}.$$

Этот же результат можно получить иначе. Для схемы № 4 (таблица 4.1) $I_B = 0$, $I_{\text{к}} = I_A + I_B = I_A + 0 = 3668 \text{ А}$. По формуле (5.5) находим:

$$R_{\text{д}} = U_{\text{д}} / I_{\text{к}} = 420 / 3668 = 0,114 \text{ Ом}.$$

По формуле, приведенной для схемы № 4 в таблице 4.1 вычисляем:

$$R_{\text{к,макс}} = R_{Q_{A1}} = R_{\text{ТСА}} + R_{\text{ТСAB}} + R_{\text{ТГЗ}} + R_{\text{д}} = 0,053 + 0,413 + 0,132 + 0,114 = 0,712 \text{ Ом}.$$

Для основной защиты находим по условию:

$$R_{\text{у,ДЗ}} \geq k_{\text{ч}} R_{\text{к,макс}} = 1,25 \cdot 0,712 = 0,890 \text{ Ом}.$$

Полученный результат превышает наибольшее допустимое по условию (2.10) значение 0,735 Ом, поэтому условие отстроенности (2.10) не выполняется. Необходимо на расстоянии до 2 км от поста секционирования вместо группового принять индивидуальное заземление опор. В этом случае для схемы № 4 имеем $R_{\text{ТГЗ}} = 0$ и $R_{\text{к,макс}} = 0,58 \text{ Ом}$.

Уставку находим по условию (5.4)

$$R_{\text{у,ДЗ}} \geq k_{\text{ч}} R_{\text{к,макс}} = 1,25 \cdot 0,58 = 0,725 \text{ Ом}.$$

Принимаем $R_{\text{у,ДЗ}} = 0,73 \text{ Ом}$. Это значение меньше вычисленного по (2.10) значения 0,735, поэтому условие отстройки (2.10) выполняется. При уставке 0,73 Ом защита отключает выключатель Q_{A1} (рисунок 4.1, в) каскадно. Сначала отключается выключатель $Q_{ПА1}$ на посту секционирования, потом выключатель $Q_{П11}$ пункта параллельного соединения и лишь после этого – выключатель Q_{A1} тяговой подстанции A .

Если дистанционная защита на тяговой подстанции выполняет роль не основной, а резервной, то ее уставка должна отвечать условию $R_{\text{у,ДЗ}} \geq k_{\text{ч}} R_{\text{к,макс}} = 1,15 \cdot 0,712 = 0,819 \text{ Ом}$. Это значение больше сопротивления 0,735 Ом, при котором защита отстроена от максимальной нагрузки и условие (2.10) не выполняется. Следовательно и в этом случае возле поста секционирования необходимо применять только индивидуальное заземление опор ($R_{\text{ТГЗ}} = 0$, $R_{\text{к,макс}} = 0,58 \text{ Ом}$). Тогда:

$$R_{\text{у,ДЗ}} \geq k_{\text{ч}} R_{\text{к,макс}} = 1,15 \cdot 0,58 = 0,667 \text{ Ом}$$

и уставку для резервной защиты можно принять $R_{\text{у,ДЗ}} = 0,7 \text{ Ом}$.

б) Защита на присоединении поста секционирования

В соответствии с (2.10) защита будет отстроена от режима максимальных нагрузок при

$$R_{\text{у,ДЗ}} \leq \frac{k_{\text{а}} U_{\text{н,мин}}}{k_{\text{з}} k_{\text{в}} I_{\text{н,макс}}} = \frac{1 \cdot 2700}{1,2 \cdot 1 \cdot 2900} = 0,776 \text{ Ом}.$$

В соответствии с таблицей 5.2 расчетной является схема № 8, при которой выключатель $Q_{ПВ1}$ отключается каскадно.

Для схемы № 8 по таблице 4.1 находим ($l_1 = l_{\text{АП}}$, $l_2 = l_{\text{ПВ}}$, $l_1 + l_2 = l_{\text{AB}}$):

$$R_{\text{ТСА}} = (r_{\text{ЛА}} l_{\text{ЛА}} + r_{\text{к}} l_{\text{АП}}) / n_1 + r_{\text{р}} l_{\text{AB}} = (0,042 \cdot 2 + 0,047 \cdot 7) / 2 + 0,0075 \cdot (7 + 8) = 0,319 \text{ Ом}.$$

$$R_{\text{ТСВ}} = \infty, \quad R_{\text{ТСAB}} = r_{\text{ЛВ}} l_{\text{ЛВ}} + r_{\text{к}} l_{\text{ПВ}} = 0,042 \cdot 0,5 + 0,047 \cdot 8 = 0,397 \text{ Ом}.$$

По формулам (4.1) вычисляем:

$$R_A = R_{\Pi A} + R_{\text{тсА}} = 0,138 + 0,319 = 0,457 \text{ Ом}, \quad R_B = R_{\Pi B} + R_{\text{тсВ}} = \infty,$$

$$R_{AB} = R_{\text{тсАВ}} + R_{\text{тгз}} = 0,397 + 0,132 = 0,529 \text{ Ом}.$$

По формуле (4.19) и таблице 4.1 для схемы № 8 определяем:

$$I_{Q\Pi B1} = I_A = \frac{U_{\text{рас}} - U_{\text{д}}}{R_A + R_{AB} \left(1 + \frac{R_A}{R_B}\right)} = \frac{3120 - 420}{0,457 + 0,529(1 + 0)} = 2738 \text{ А}.$$

Для схемы № 8 имеем $I_K = I_A = I_{Q\Pi B1}$. Сопротивление дуги в месте повреждения находим по формуле (5.5):

$$R_{\text{д}} = U_{\text{д}} / I_K = 420 / 2738 = 0,153 \text{ Ом}.$$

По формуле, приведенной в таблице 4.1 для схемы № 8 вычисляем:

$$R_{\text{к, max}} = R_{Q\Pi B1} = r_{\text{р}} \ell_{\Pi B} + R_{\text{тсАВ}} + R_{\text{тгз}} + R_{\text{д}} = 0,0075 \cdot 8 + 0,397 + 0,132 + 0,153 = 0,742 \text{ Ом}.$$

Уставку находим по формуле (5.4). Для основной защиты получаем:

$$R_{\text{у, ДЗ}} \geq k_{\text{ч}} R_{\text{к, max}} = 1,25 \cdot 0,742 = 0,928 \text{ Ом}.$$

Для резервной защиты получаем:

$$R_{\text{у, ДЗ}} \geq k_{\text{ч}} R_{\text{к, max}} = 1,15 \cdot 0,742 = 0,853 \text{ Ом}.$$

И для основной и для резервной защит полученное значение $R_{\text{у, ДЗ}}$ больше допустимого для максимальных нагрузок значения 0,776, поэтому условие (2.10) не выполняется.

Для обеспечения чувствительности ДЗ при коротком замыкании необходимо на расстоянии до 2 км от тяговых подстанций вместо группового применять индивидуальное заземление опор. В этом случае $R_{\text{тгз}} = 0$, а $R_{\text{к, max}} = 0,61 \text{ Ом}$. По формуле (5.4) получаем для основной защиты: $R_{\text{у, ДЗ}} \geq 1,25 \cdot 0,61 = 0,763 \text{ Ом}$ (принимаем $R_{\text{у, ДЗ}} = 0,77 \text{ Ом}$), для резервной – $R_{\text{у, ДЗ}} \geq 1,15 \cdot 0,61 = 0,702 \text{ Ом}$ (принимаем $R_{\text{у, ДЗ}} = 0,71 \text{ Ом}$). При принятых уставках условие (2.10) выполняется.

5.8. Защита по скорости нарастания тока

5.8.1. Уставку $(dI/dt)_{\text{у}}$ защиты по скорости нарастания тока выбирают по условию

$$k_{\text{з}} \left(\frac{dI}{dt} \right)_{\text{н, max}} \leq \left(\frac{dI}{dt} \right)_{\text{у}} \leq \frac{1}{k_{\text{ч}}} \left(\frac{dI}{dt} \right)_{\text{к, min}}, \quad (5.6)$$

где $(dI/dt)_{\text{н, max}}$ – наибольшее значение скорости нарастания тока при нормальном режиме, А/мс;

$(dI/dt)_{\text{к, min}}$ – наименьшее значение этой скорости при коротком замыкании, А/мс.

Коэффициент запаса принимают в соответствии с 2.3.5, коэффициент чувствительности $k_{\text{ч}}$ должен быть не менее 1,15.

Скорость нарастания тока при коротком замыкании превышает, как правило, 90 А/мс, а в нормальном режиме обычно ее значение меньше чем 80 А/мс. Однако в нормальном режиме бывают случаи, когда значение этой скорости существенно возрастает. Такое явление имеет место при проезде воздушных промежутков (от 1000 до 1500 А/мс), при пуске электропоездов (от 80 до 300 А/мс), после отрыва токоприемников от контактного провода и последующего его касания при больших скоростях движения. Скорости нарастания тока в нормальном режиме и при коротком замыкании уточняются

на основании опытных данных на конкретном участке.

5.8.2. Приближенную оценку наибольшей скорости изменения тока для нормального режима определяют по выражению, А/мс:

$$\left(\frac{dI}{dt}\right)_{н,макс} = \frac{\Delta I_{н,макс}}{T_{н}}, \quad (5.7)$$

где $\Delta I_{н,макс}$ – наибольшее приращение тока при трогании поезда или проезде воздушного промежутка, А;

$T_{н}$ – постоянная времени нарастания тока, мс.

Наибольшее значение $\Delta I_{н,макс}$ в момент перехода силовой цепи электроподвижного состава с одного соединения электродвигателей на другое или в режим ослабления электромагнитного поля определяют по токовой характеристике электровозов и электропоездов.

Значения постоянной времени $T_{н}$ для режимов трогания (пуска) находятся в пределах от 5 до 30 мс.

При поезде воздушного промежутка значение $\Delta I_{н,макс}$ принимают равным току длительного режима электроподвижного состава с учетом кратности тяги.

5.8.3 Приближенную оценку наибольшей скорости изменения тока при коротком замыкании определяют по выражению, А/мс

$$\left(\frac{dI}{dt}\right)_{к,мин} = \frac{U_{рас}}{L_{сy} + L_{по} + L_{тс} \ell_{к}}, \quad (5.8)$$

где $U_{рас}$ – расчетное напряжение тяговой подстанции, определяемое по 4.3.2, В;

$L_{сy}$ – индуктивность реакторов сглаживающего устройства, мГн;

$L_{по}$ – суммарная индуктивность питающей и отсасывающей линий, мГн;

$L_{тс}$ – индуктивность 1 км тяговой сети, мГн/км;

$\ell_{к}$ – расстояние до места короткого замыкания, км.

Значение индуктивности реакторов принимают по фактическому исполнению. При отсутствии таких сведений используют справочные данные по принципиальной схеме сглаживающих устройств. Индуктивность $L_{по}$ можно ориентировочно принять равной 3 мГн. Приближенные значения индуктивности 1 км тяговой сети (на один путь) $L_{тс}$ для типичных проводов контактной сети, состоящей из несущего троса и двух контактных проводов – 1,30 мГн/км, при наличии дополнительно одного усиливающего провода – 1,02 мГн/км, а двух или трех усиливающих проводов – 0,98 мГн/км.

Расстояние $\ell_{к}$ принимают от 2 до 3 км полагая, что ток короткого замыкания протекает по контактной сети только одного пути (худший случай).

5.8.4. Уставка, выбранная по выражениям (5.6), (5.7) и (5.8), должна корректироваться по результатам эксплуатации. При большом числе ложных отключений защиту не используют.

Пример 5.7. Определить возможность использования защиты ЗСНТ по скорости

нарастания тока для двухпутного участка, контактная сеть контактная сеть которого содержит один несущий трос, два контактных провода и один усиливающий провод. Расчетное напряжение на шинах тяговой подстанции в соответствии с 4.3.2.7 $U_{\text{рас}} = 3250$ В. Индуктивность реактора сглаживающего устройства $L_{\text{сг}} = 5$ мГн. Приращение тока электровоза при пуске $\Delta I_{\text{н,макс}} = 1300$ А, постоянная времени $T_{\text{н}} = 6$ мс.

По формуле (5.7) находим при значении $T_{\text{к}} = 6$ мс:

$$\left(\frac{dI}{dt}\right)_{\text{н,макс}} = \frac{\Delta I_{\text{н,макс}}}{T_{\text{н}}} = \frac{1300}{6} = 217 \text{ А/мс.}$$

Индуктивность тяговой сети, состоящей из несущего троса, двух контактных и усиливающего проводов, равна $L_{\text{тс}} = 1,02$ мГн/км.

По формуле (5.8) находим

$$\left(\frac{dI}{dt}\right)_{\text{к,мин}} = \frac{U_{\text{рас}}}{L_{\text{сг}} + L_{\text{по}} + L_{\text{тс}} \ell_{\text{к}}} = \frac{3250}{5 + 3 + 1,02 \cdot 2,5} = 308 \text{ А/мс.}$$

На основании правой части выражения (5.6) получаем

$$\left(\frac{dI}{dt}\right)_{\text{у}} \leq \frac{1}{k_{\text{ч}}} \left(\frac{dI}{dt}\right)_{\text{к,мин}} = \frac{308}{1,15} = 268 \text{ А/мс.}$$

Принимаем уставку $(dI/dt)_{\text{у}} = 265$ А/мс и проверяем выполнение левой части выражения (5.6)

$$k_{\text{з}} \left(\frac{dI}{dt}\right)_{\text{н,макс}} = 1,2 \cdot 217 = 260 \text{ А/мс.}$$

Поскольку $260 < 265$, то условие (5.6) выполняется.

5.9. Защита по приращению тока

5.9.1. Для защиты по приращению тока, используемую в качестве резервной, необходимо определить уставку по приращению тока $\Delta I_{\text{у0}}$, значение коэффициента адаптации $k_{\text{а}}$, длительность $T_{\text{и}}$ времени измерения приращения тока, выдержку времени $T_{\text{в}}$.

5.9.2. Уставку защиты $\Delta I_{\text{у0}}$ выбирают по условию:

$$\Delta I_{\text{у0}} < \frac{I_{\text{к,мин}}}{k_{\text{ч}}}, \quad (5.9)$$

где $\Delta I_{\text{у0}}$ – уставка по приращению тока при условии, что, предшествующая нагрузка отсутствовала, А;

$I_{\text{к,мин}}$ – наименьшее значение тока присоединения при коротком замыкании в конце защищаемой зоны (расчетные схемы №№ 1, 4 и 12 по таблице 4.1), А;

$k_{\text{ч}}$ – коэффициент чувствительности, принимаемый равным 1,15.

5.9.3. При наличии предшествующей нагрузки ток срабатывания защиты снижается до величины:

$$\Delta I_{\text{у}} = \Delta I_{\text{у0}} - k_{\text{а}} I_0, \quad (5.10)$$

где $\Delta I_{\text{у}}$ – адаптированная уставка, А;

$\Delta I_{\text{у0}}$ – уставка защиты по приращению тока при условии, что до момента

приращения тока в присоединении ток отсутствовал ($I_0 = 0$), А;

I_0 – ток нагрузки, предшествующий моменту его приращения, А;

κ_a – коэффициент адаптации ($0 \leq \kappa_a \leq 1$).

В качестве I_0 принимают значение $I_{н,маx}$, вычисляемое в соответствии с 3.4.1.

Коэффициент κ_a вычисляют из условия, чтобы адаптированная уставка ΔI_y снижалась при коротком замыкании не более, чем до значения $\Delta I_y = a\Delta I_{y0}$ ($a \leq 1$):

$$\kappa_a \leq \frac{(1-a)\Delta I_{y0}}{I_{н,маx}}. \quad (5.11)$$

В выражении (5.11) принимают значение a от 0,7 до 0,8.

5.9.4. Выбранная по условию (5.9) уставка ΔI_{y0} проверяется по условию отстройки от наибольших приращений тока в нормальном режиме:

$$\Delta I_{y0} \geq \kappa_3 \Delta I_{н,маx} + \kappa_a (I_{н,маx} - I_{тр}) = \kappa_3 \Delta I_{н,маx} + \kappa_a I_{ср}, \quad (5.12)$$

где $\Delta I_{н,маx}$ – наибольшее приращение тока в нормальном режиме;

$I_{ср}$ – средний ток присоединения.

Значения наибольшего тока присоединения $I_{н,маx}$, среднего тока присоединения $I_{ср}$ и пускового тока $I_{тр}$ вычисляют в соответствии с разделом 3.

Значения $\Delta I_{н,маx}$ для пусковых режимов электроподвижного состава принимают по типовым токовым характеристикам электроподвижного состава соответствующей серии. При кратной тяге в качестве $\Delta I_{н,маx}$ принимают сумму приращений токов всех электровозов в составе поезда. Если защиту на присоединениях тяговых подстанций необходимо отстраивать от приращения тока при проследовании поездом секционного изолятора или изолирующего сопряжения, то принимают $\Delta I_{н,маx} = I_{дл}$, где $I_{дл}$ – ток электровоза при одиночной тяге или сумма токов всех электровозов в составе данного поезда при кратной тяге, соответствующих мощности длительного режима. Допускается принимать $I_{дл}$ равным среднему току всех электровозов (при кратной тяге) грузового поезда максимальной массы, вычисляемому по формуле (3.5).

Проверка выбранной уставки по условию надежного срабатывания при коротком замыкании в конце зоны защиты и наличии предшествующей нагрузки выбирается по выражению:

$$\Delta I_{y0} \leq \frac{I_{к,мин}}{\kappa_ч} - \kappa_a I_0. \quad (5.13)$$

5.9.5. Время $T_{и}$ выбирают равным от 0,1 до 0,6 с. Нижний предел соответствует контактной сети с несущим тросом и одним контактным проводом (без усиливающих проводов), верхний предел – контактной сети с двумя контактными и двумя усиливающими проводами.

5.9.6. Для исключения излишних срабатываний защиты по приращению

тока при коротких замыканиях за пределами зоны защиты, вводят выдержку времени T_B в соответствии с 2.2.

Пример 5.8. Определить параметры срабатывания защиты по приращению тока на присоединении тяговой подстанции двухпутного участка (рисунок 4.1, б). Сопротивление тяговой подстанции $R_{пА} = 0,138$ Ом, расчетное напряжение $U_{рас} = 3120$ В. Питающие линии длиной $\ell_{ЛА} = 2$ км с погонным сопротивлением $r_{ЛА} = 0,042$ Ом/км. Сопротивление рельсов $r_p = 0,007$ Ом/км, сопротивление контактной сети $r_k = 0,0047$ Ом/км. Расстояние от тяговой подстанции до поста секционирования $\ell_1 = 7$ км. Сопротивление троса группового заземления $R_{тгз} = 0,197$ Ом (см. пример 5.2). Ток трогания электровоза $I_{тр} = 2900$ А, приращение тока при трогании $\Delta I_{н,макс} = 1300$ А, длительный ток $I_{дл} = 1700$ А. Наибольший ток присоединения выключателя контактной сети на тяговой подстанции А $I_{н,макс} = 3800$ А.

Для заданного участка (рисунок 4.1, б) расчетной при коротком замыкании является схема № 4 (таблица 4.1), для которой:

$$R_{тсА} = r_p \ell_1 = 0,007 \cdot 7 = 0,049 \text{ Ом}, \quad R_{тсВ} = \infty, \\ R_{тсАВ} = r_{ЛА} \ell_{ЛА} + r_k \ell_1 = 0,042 \cdot 2 + 0,0047 \cdot 7 = 0,413 \text{ Ом}.$$

По формулам (4.1) находим:

$$R_A = R_{пА} + R_{тсА} = 0,138 + 0,049 = 0,187 \text{ Ом}, \\ R_B = R_{пВ} + R_{тсВ} = \infty, \\ R_{AB} = R_{тсАВ} + R_{тгз} = 0,413 + 0,197 = 0,610 \text{ Ом}.$$

По таблице 4.1 (схема № 4) и формуле (4.19) вычисляем:

$$I_{QА1} = I_A = \frac{U_{рас} - U_d}{R_A + R_{AB} \left(1 + \frac{R_A}{R_B} \right)} = \frac{3120 - 420}{0,187 + 0,610(1 + 0)} = 3388 \text{ А}.$$

По формуле (5.9) находим

$$\Delta I_{y0} < \frac{I_{к,мин}}{k_ч} = \frac{3388}{1,15} = 2946 \text{ А}.$$

Принимаем $\Delta I_{y0} = 2500$ А.

По формуле (5.11) определяем

$$k_a \leq \frac{(1 - a) \Delta I_{y0}}{I_{н,макс}} = \frac{(1 - 0,75) 2500}{3800} = 0,164.$$

Принимаем $k_a = 0,15$.

По условию длительный ток электровоза $I_{дл} = 1700$ А больше приращения тока при трогании 1300 А. В соответствии с 5.9.4 принимаем $I_{н,макс} = 1700$ А.

Используя формулу (5.12) находим

$$k_з \Delta I_{н,макс} + k_a (I_{н,макс} - I_{тр}) = 1,15 \cdot 1700 + 0,15(3800 - 2900) = 2090 \text{ А}.$$

Полученное значение 2090 А меньше уставки $I_{y0} = 2500$ А, следовательно, при такой уставке защита отстроена от пусковых режимов и режима проследования поездом секционного изолятора или изолирующего сопряжения под током.

Проверяем условие (5.13) при $I_0 = I_{н,макс}$:

$$\Delta I_{y0} \leq \frac{I_{к,мин}}{k_ч} - k_a I_0 = \frac{3388}{1,15} - 0,15 \cdot 3800 = 2376 \text{ А}.$$

Поскольку было принято $\Delta I_{y0} = 2500$ А, то условие (5.13) не выполняется.

Принимаем уставку $\Delta I_{y0} = 2200$ А. По формуле (5.11) находим: $k_a \leq 0,145$. Принимаем $k_a = 0,12$. Проверяем условие (5.12) при $\Delta I_{н,макс} = I_{дл} = 1700$ А, из которого получаем $\Delta I_{y0} \geq 2063$ А. Поскольку принято $\Delta I_{y0} = 2200$ А, то условие выполняется ($2200 > 2063$).

Проверяем условие (5.13) при $k_a = 0,12$, $I_0 = I_{н,макс} = 3800$ А, $I_{к,мин} = 3388$ А, из которого получаем $\Delta I_{y0} \leq 2490$ А. Поскольку принято $\Delta I_{y0} = 2200$ А, то условие (5.13) выполняется

(2200 < 2490).

Принимаем $T_{и} = 0,4$ с, $T_{в} = 0,15$ с.

5.10. Тепловая и квазитепловая защиты

5.10.1. Тепловая и квазитепловая защиты осуществляют слежение за текущей температурой контролируемого провода контактной сети и предназначены для предотвращения чрезмерного нагревания с целью недопущения его отжига или недопустимого удлинения, нарушающего регулировку контактной сети.

Используются для защиты:

- от перегрузки (основная);
- от коротких замыканий (резервная).

Когда температура контролируемого провода t достигнет значения первой уставки $t_{пред}$, защита должна вызвать предупреждающий сигнал. При дальнейшем возрастании температуры t до значения второй уставки t_y и выше, защита должна производить отключение выключателя присоединения мгновенно (термическая отсечка), или с выдержкой времени (максимальная термическая защита).

5.10.2. Воздействующими величинами являются:

а) для тепловой защиты (ТЗ) с датчиками температуры, установленными на контролируемом проводе:

- температура провода t , °С;

б) для квазитепловой защиты (КВТЗ):

- температура окружающей среды $t_{окр}$, °С;
- ток контактной сети (ток присоединения) I , А;
- скорость V , м/с, и направление ветра.

Примечание – квазитепловая защита (КВТЗ) программными средствами с периодичностью не более 10 с вычисляет текущее значение температуры t контролируемого провода на основе численного решения дифференциального уравнения теплового баланса. Ток I вводится в это уравнение непосредственно, а скорость V и направление ветра – опосредовано через вычисляемый коэффициент теплоотдачи.

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

- принять значение расчетной температуры окружающей среды $t_{окр}$ (для КВТЗ);

- установить для какого из проводов контактной сети необходимо осуществлять контроль за его температурой;

- выбрать уставку температуры провода t_y , соответствующую максимальной допустимой температуре провода, и уставку температуры предупреждения $t_{пред}$;

- определить значения параметров, входящих в уравнение теплового баланса (для КВТЗ).

5.10.4. Текущее значение температуры $t_{\text{окр}}$ может вводиться в защиту от датчика температуры или по каналам телемеханики. Если такой ввод отсутствует, то значение $t_{\text{окр}}$ следует вводить оперативно с периодичностью, устанавливаемой местными инструкциями, но не реже двух раз в год. Для каждого сезона значение $t_{\text{окр}}$ принимают как среднее значение из наибольших показателей за ряд лет.

При вводе два раза в год новых значений $t_{\text{окр}}$ принимают расчетное значение температуры окружающей среды для летнего и зимнего сезонов.

При плавке гололеда значение $t_{\text{окр}}$ рекомендуется устанавливать равным -1 °С.

5.10.5. В качестве контролируемого по температуре провода контактной сети принимают:

- для защиты ТЗ или КВТЗ, предотвращающей отжиг проводов, – тот провод (лимитирующий провод), который ограничивает наибольшее длительно допустимое значение тока присоединения. Лимитирующий провод определяют по 5.10.11;

- для защиты ТЗ или КВТЗ, предотвращающей недопустимое удлинение проводов, – контактный провод.

5.10.6. Уставку t_y следует выбирать по условию:

$$t_y \leq K_{3,п} t_{\text{max}}, \quad (5.14)$$

где t_{max} – наибольшая допустимая температура контролируемого провода, °С;

$K_{3,п}$ – коэффициент запаса, учитывающий дополнительный нагрев провода за счет солнечной радиации, принимаемый равным от 0,85 до 0,9.

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

$$t_{\text{пред}} \leq K_{3,пред} t_y, \quad (5.15)$$

где $K_{3,пред}$ – коэффициент запаса предупреждения, принимаемый равным от 0,8 до 0,9.

5.10.7. В качестве t_{max} в формуле (5.14) могут использоваться значения:

- наибольшей длительно допустимой температуры провода $t_{\text{н, max}}$, установленной соответствующими нормами и правилами по условию механической прочности и недопущению его отжига;

- наибольшей допустимой температуры контактного провода $t_{\text{ф, max}}$ по условию допустимого его удлинения (поворота фиксаторов и консолей);

- наибольшей допустимой температуры контактного провода $t_{\text{г, max}}$ по условию допустимой высоты хождения грузов температурного компенсатора.

В качестве расчетного t_{max} в формуле (5.14) используют наименьшее из $t_{\text{н, max}}$, $t_{\text{ф, max}}$, $t_{\text{г, max}}$ значение.

5.10.8. Максимальную допустимую температуру $t_{\text{ф, max}}$ контактного провода, при которой ближайший к температурному компенсатору фиксатор

(или консоль) перемещается в крайнее положение, вычисляют по формуле, °С:

$$t_{\phi, \max} \leq t_{\min} + \frac{\Delta l_{\phi, \max}}{\beta l_{\text{аф}}}, \quad (5.16)$$

где $\Delta l_{\phi, \max}$ – наибольшее допустимое перемещение фиксатора вдоль пути от крайнего положения, соответствующего минимальной расчетной температуре окружающей среды, м;

$l_{\text{аф}}$ – расстояние от ближайшего к компенсатору фиксатора до средней анкеровки, м;

t_{\min} – минимальная расчетная температура окружающей среды данного климатического района, °С;

β – температурный коэффициент линейного расширения провода, 1/°С.

Максимальную допустимую температуру $t_{\Gamma, \max}$ контактного провода, при которой грузы температурного компенсатора перемещаются в крайнее нижнее положение, следует вычислять по формуле, °С:

$$t_{\Gamma, \max} \leq t_{\min} + \frac{\Delta l_{\Gamma, \max}}{\beta \cdot p \cdot l_{\text{аг}}}, \quad (5.17)$$

где $\Delta l_{\Gamma, \max}$ – наибольшая допустимая длина перемещения грузов компенсатора от крайнего верхнего положения, соответствующего температуре t_{\min} , до крайнего нижнего положения, м;

$l_{\text{аг}}$ – расстояние от компенсатора до средней анкеровки, м;

p – коэффициент передачи компенсатора.

Для медных, низколегированных и бронзовых проводов допускается принимать $\beta = 17 \cdot 10^{-6}$ 1/°С, для биметаллических сталемедных и сталеалюминиевых проводов $\beta = 13 \cdot 10^{-6}$ 1/°С. Коэффициент передачи p зависит от конструкции компенсатора. Он равен, например, для компенсаторов: двухблочного – 2, трехблочного – 4, барабанного и блочно-полиспастного – 3.

5.10.9. Перечень параметров для контролируемого по температуре провода, которые надо вводить в защиту КВТЗ в качестве исходных данных, приведен в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Перечень исходных данных, вводимых в программу КВТЗ

Наименование	Обозначение	Единицы измерения
Эквивалентный диаметр провода	D_{ϕ}	мм
Масса единицы длины провода	m	кг/м
Удельная теплоемкость	C	Вт·с/(кг·°С)
Сопротивление единицы длины провода при температуре 20 °С	r_{20}	Ом/км
Температурный коэффициент сопротивления	β_r	1/°С
Степень черноты провода	ξ	–
Коэффициент распределения тока присоединения	K_p	–
Коэффициент теплоотдачи	α	Вт/(м ² ·°С)
Примечание – Для контактного провода (индекс «к») с износом u , %, вместо значений $D_{\phi} = D_{\phi, \text{п}}$, $m = m_{\text{п}}$, $r_{20} = r_{\text{п}, 20}$ следует использовать значения $D_{\phi, \text{пн}}$, $m_{\text{пн}}$, $r_{\text{пн}, 20}$, вычисляемые по формулам: $D_{\phi, \text{пн}} = D_{\phi, \text{п}}(1 - 0,23u \cdot 10^{-2})$, $m_{\text{пн}} = m_{\text{п}}(1 - u \cdot 10^{-2})$, $r_{\text{пн}, 20} = r_{\text{п}, 20} / (1 - u \cdot 10^{-2})$.		

Параметры m , C , r_{20} и β_r принимают по данным стандартов на соответствующие провода или по справочным данным.

Для медных, бронзовых и алюминиевых проводов допускается использовать приближенное значение $\beta_r = 0,004 \text{ 1/}^\circ\text{C}$.

Сопротивление единицы длины провода r при температуре t , входящее в уравнение теплового баланса, следует вычислять в программе КВТЗ на каждом шаге его численного решения по формуле (4.2).

Для проводов со стальными сердечниками и других конструкций, состоящих из разных металлов, значение C принимают равным:

$$C = (C_1 m_1 + C_2 m_2 + \dots) / m,$$

где $m_1, m_2, \dots, C_1, C_2, \dots$ – массы и удельные теплоемкости составных частей провода; m – масса единицы длины провода.

Эквивалентный диаметр провода $D_э = F \cdot 10^3 / \pi$, где F – площадь поверхности единицы длины провода, $\text{м}^2/\text{м}$, вычисляют по формулам, мм:

- для круглого $D_э = D$;
- для витого $D_э = 0,5d(n + 2)$, $n = \pi(D/d - 1)$;
- для фасонных контактных марок МФ, БрФ, НлФ $D_э \approx 1,63(A + H)/\pi$;
- для фасонных контактных марки R_i $D_э \approx 1,063D$,

где D – расчетный (справочный) диаметр провода, мм;

d – диаметр проволок наружного повива витого провода, мм;

n – число проволок в наружном повиве витого провода, определяемого по справочным данным или по приведенной формуле с округлением до целого числа в меньшую сторону;

A, H – стандартные (справочные) размеры поперечного сечения фасонного контактного провода, мм.

Степень черноты провода (интегральный коэффициент теплового излучения) ξ рекомендуется принимать, как правило, для проводов: медных – 0,8, алюминиевых – 0,6.

Значения коэффициента распределения тока присоединения k_p для каждого из несущих тросов ($k_{p,T}$), контактных проводов ($k_{p,\Pi}$) и усиливающих проводов ($k_{p,Y}$) вычисляют по формулам:

$$k_{p,T} = \frac{r_{\text{ЭКВ}}}{r_T}, \quad k_{p,\Pi} = \frac{r_{\text{ЭКВ}}}{r_\Pi} (1 - u \cdot 10^{-2}), \quad k_{p,Y} = \frac{r_{\text{ЭКВ}}}{r_Y},$$

$$r_{\text{ЭКВ}} = \frac{1}{\frac{n_T}{r_T} + \frac{n_\Pi}{r_\Pi} (1 - u \cdot 10^{-2}) + \frac{n_Y}{r_Y}}, \quad (5.18)$$

где $r_{\text{ЭКВ}}$ – эквивалентное сопротивление 1 км контактной сети, Ом/км;

r_T, r_Π, r_Y – сопротивления 1 км, соответственно, одного несущего троса, одного неизношенного контактного провода, одного усиливающего провода, Ом/км;

n_T , n_P , n_Y – число, соответственно, несущих тросов, контактных и усиливающих проводов в контактной сети одного пути;

u – средний износ контактного провода, %.

В качестве исходных данных используют то значение k_p , которое соответствует проводу, контроль температуры которого должен контролироваться в соответствии с 5.10.5.

5.10.10 Если в защите КВТЗ не предусмотрено получение информации о воздействующих величинах скорости V и направления ветра, то следует принимать значение коэффициента теплоотдачи α постоянным (при условии наихудшего охлаждения провода), вычисляемого по формуле:

$$\alpha = \frac{53}{D_3^{0,41}} + 8\xi. \quad (5.19)$$

В этом случае в программу функционирования КВТЗ в качестве исходных данных, вместо указанных в таблице 5.3, следует вводить значения коэффициентов K_H , $^{\circ}\text{C}/(\text{с}\cdot\text{A}^2)$, и K_O , $1/\text{с}$, значения которых вычисляют по формулам:

$$K_H = \frac{k_p^2 r_{20}^2 10^{-3}}{mC}, \quad K_O = \frac{\alpha \pi D_3 10^{-3}}{mC}. \quad (5.20)$$

Все значения в формулах (5.19) и (5.20) относятся к тому проводу (лимитирующему), для которого осуществляется контроль температуры. Если лимитирующим является контактный провод с износом, то значения D_3 , C , r_{20} и m в этих формулах принимают в соответствии с примечанием к таблице 5.3.

5.10.11. Определение лимитирующего по нагреву провода контактной сети, ограничивающего наибольшее значение тока присоединения, осуществляют с использованием формулы:

$$I = I_j = \frac{1}{k_p} \sqrt{\frac{(t_{H,\max} - t_{\text{окр}}) \alpha \pi D_3}{r_{20} [1 + \beta_r (t_{H,\max} - t_{\text{окр}})]}}. \quad (5.21)$$

Значение тока присоединения I , ограниченное величиной I_j , обусловленной параметрами j -го провода ($j = T$ для несущего троса, $j = P$ для контактного провода, $j = Y$ для усиливающего провода), следует вычислять, подставляя в формулу (5.21) по очереди параметры каждого из параллельно соединенных проводов контактной сети (несущего троса, контактного провода, усиливающего провода). Значения α , F , r_{20} для контактного провода с износом должны быть вычислены с учетом примечания к таблице 5.3. Значение температуры окружающей среды $t_{\text{окр}}$ можно принимать равной 40°C .

Тот провод, для которого значение I , вычисленное по формуле (5.21) оказалось наименьшим, принимается в качестве лимитирующего по нагреву.

5.10.12. При выборе уставок по 5.10.6 по условию предотвращения недопустимого удлинения проводов защит ТЗ и КВТЗ должны функционировать в режиме токовой отсечки, т.е. без выдержки времени.

Если уставки выбираются по условиям недопущения отжига проводов по наибольшей длительно допустимой температуре в соответствии с 5.10.7, то защиты ТЗ и КВТЗ могут функционировать как в режиме токовой отсечки, так и в режиме максимальной термической защиты, т.е. с выдержкой времени. При этом выдержка времени должна автоматически уменьшаться при возрастании температуры свыше уставки с учетом длительности воздействия на провод предыдущей температуры и в соответствии с особенностями материала лимитирующего по нагреву провода.

5.10.13. Не рекомендуется использовать в защите выдержку времени, зависящую только от значения температуры провода в данный момент времени, поскольку при этом не учитывается та часть временного ресурса провода, которая была уже выработана (израсходована) при предыдущей температуре.

Примечания

1 На букву, выделенную полужирным шрифтом, падает ударение в слове.

2 Под временным ресурсом τ_p провода при неизменной или изменяющейся его температуре t понимается наибольший допустимый интервал времени, s , в течение которого этот провод сохраняет механическую прочность, мин.

Временной ресурс вырабатывается тем быстрее, чем выше температура провода. При изменяющейся температуре следует учитывать всю суммарную выработку временного ресурса с учетом температуры в предыдущие интервалы времени.

5.10.14. Относительную долю τ_{p^*} временного ресурса, выработанную за время $\Delta\tau$, определяют по формуле:

$$\tau_{p^*} = \frac{\Delta\tau}{60\tau_p} = \frac{\Delta\tau}{60} \cdot 2,718^{-\left(\frac{C_1}{273+t} - C_2\right)}, \quad (5.22)$$

где $\Delta\tau$ – следующие друг за другом одинаковые интервалы времени, в каждом из которых необходимо производить измерения или вычисление температуры провода, с;

C_1, C_2 – постоянные, зависящие от материала и конструкции провода.

Каждый интервал времени $\Delta\tau$ должен быть по крайней мере в 10...20 раз меньше постоянной времени нагрева провода. Для проводов контактной сети его принимают, как правило, равным 1 с.

Значения коэффициентов C_1 и C_2 вычисляют по формулам:

$$C_1 = \frac{3(273 + t_{н,маx})(273 + t_{доп,1})}{t_{доп,1} - t_{н,маx}}, \quad C_2 = \frac{3(273 + t_{н,маx})}{t_{доп,1} - t_{н,маx}} + 4,094, \quad (5.23)$$

где $t_{н,маx}$ – наибольшее длительно допустимая температура провода, °С;

$t_{доп,1}$ – наибольшая допустимая температура провода для промежутка времени 1 мин (60 с), °С.

5.10.15. Выдержка времени, мин, определяется полной выработкой временного ресурса (с учетом коэффициента запаса k_3), т.е. при выполнении условия:

$$k_3(\tau_{p^*,1} + \tau_{p^*,2} + \tau_{p^*,3} + \dots) \geq 1, \quad (5.24)$$

где $\tau_{p^*,1}$, $\tau_{p^*,2}$, $\tau_{p^*,3}$, ... – относительные доли выработки временного ресурса в следующие друг за другом интервалы времени, при неизменной или изменяющейся температуре провода.

Коэффициент запаса принимают от 1,1 до 1,2. Относительный временной ресурс с порядковым номером 1 соответствует моменту включения в работу блока выдержки времени.

5.10.16. При формировании выдержки времени ТЗ и КВТЗ должны функционировать в следующей последовательности:

- при достижении температурой провода значения уставки t_y , соответствующей длительно допустимой температуре контролируемого провода, включается блок вычисления вырабатываемого временного ресурса;

- непрерывно, через интервалы времени Δt , указанный блок вычисляет для каждого (1, 2, 3 и т.д.) интервала времени значение относительной доли временного ресурса τ_{p^*} по формуле (5.22);

- вычисленное значение τ_{p^*} для каждого из интервалов времени непрерывно суммируется с относительными долями выработки временного ресурса τ_{p^*} , вычисленными для всех предыдущих интервалов;

- при выполнении условия (5.24) защита должна мгновенно отключать выключатель;

- при остывании контролируемого провода до температуры ниже значения уставки t_y блок вычисления вырабатываемого временного ресурса отключается и через 2 минуты (120 с) выдает разрешение на АПВ выключателя присоединения.

Пример 5.9. Определить уставки и задаваемые параметры защиты КВТЗ как термической отсечки от отжига проводов для контактной сети постоянного тока, состоящей из медного несущего троса сечением 120 мм², двух контактных проводов сечением 100 мм² и двух алюминиевых проводов сечением 185 мм². Справочные данные проводов приведены в таблице 5.4.

Средний износ контактных проводов $u=10\%$. Учет текущих значений скорости и направления ветра в защите не предусмотрен.

Таблица 5.4 – Параметры проводов в примере 5.9

Провод	Расчетный диаметр ¹⁾ D , мм	Диаметр проволоки d , мм	Масса m , кг/м	Удельная теплоемкость C , Вт·с/(кг·°C)	Сопротивление r_{20} , Ом/км	Степень черноты ξ	Длительно допустимая температура $t_{доп}$, °C
Несущий	14,0	2,8	1,058	391	0,156	0,8	100
Контактный	12,81;11,8	–	0,890	391	0,176	0,8	95
Усиливающий	17,5	3,5	0,502	929	0,161	0,6	90

¹⁾ Для фасонного контактного провода – размеры A и H .

По формулам (5.18) находим значения коэффициентов распределения тока для каждого из проводов контактной сети:

$$r_{\text{ЭКВ}} = \frac{1}{\frac{n_{\text{T}}}{r_{\text{T}}} + \frac{n_{\text{П}}}{r_{\text{П}}}(1-u \cdot 10^{-2}) + \frac{n_{\text{Y}}}{r_{\text{Y}}}} = \frac{1}{\frac{1}{0,156} + \frac{2}{0,176}(1-10 \cdot 10^{-2}) + \frac{2}{0,157}} = 0,034 \text{ Ом/км},$$

$$K_{\text{P,T}} = \frac{r_{\text{ЭКВ}}}{r_{\text{T}}} = \frac{0,034}{0,156} = 0,218, \quad K_{\text{P,Y}} = \frac{r_{\text{ЭКВ}}}{r_{\text{Y}}} = \frac{0,034}{0,157} = 0,217,$$

$$K_{\text{P,П}} = \frac{r_{\text{ЭКВ}}(1-u \cdot 10^{-2})}{r_{\text{П}}} = \frac{0,034}{0,176}(1-10 \cdot 10^{-2}) = 0,174.$$

Проверка: $n_{\text{T}} K_{\text{P,T}} + n_{\text{П}} K_{\text{P,П}} + n_{\text{Y}} K_{\text{P,Y}} = 1$ или $1 \cdot 0,218 + 2 \cdot 0,174 + 2 \cdot 0,217 = 1$. Проверка выполняется.

В соответствии с 5.10.9 находим значение эквивалентных диаметров проводов. Для несущего троса ($D = 14$ мм, $d = 2,8$ мм) находим число проволок в наружном появиве $n = \pi(D/d - 1) = \pi(14,0/2,8 - 1) = 12,56$. Округляем до целого числа в меньшую сторону — $n = 12$. Эквивалентный диаметр несущего троса $D_{\text{э}} = D_{\text{э,Т}} = 0,5d(n + 2) = 0,5 \cdot 2,8(12 + 2) = 19,6$ мм.

Для контактного провода ($A = 12,81$ мм, $H = 11,8$ мм) с износом $u = 10\%$ и с учетом примечания к таблице 5.3 имеем $D_{\text{э}} = D_{\text{э,П}} \approx 1,63(A + H)(1 - 0,23u \cdot 10^{-2})/\pi = 1,63(12,81 + 11,8) \times (1 - 0,23 \cdot 10^{-2})/\pi = 12,48$ мм.

Для усиливающего провода ($D = 17,5$ мм, $d = 3,5$ мм) имеем $n = \pi(D/d - 1) = \pi(17,5/3,5 - 1) = 12,56$. Округляем до целого числа в меньшую сторону: $n = 12$. Эквивалентный диаметр усиливающего провода $D_{\text{э}} = D_{\text{э,Т}} = 0,5d(n + 2) = 0,5 \cdot 3,5(12 + 2) = 24,5$ мм.

В соответствии с примечанием к таблице 5.3 находим сопротивление контактного провода при износе $u = 10\%$: $r_{\text{П,20}} = r_{\text{П,20}}/(1 - u \cdot 10^{-2}) = 0,176/(1 - 10 \cdot 10^{-2}) = 0,196$ Ом/км.

Определение лимитирующего провода

По формуле (5.19) находим коэффициент теплоотдачи α для несущего троса $\alpha = \alpha_{\text{T}}$, для контактного провода $\alpha = \alpha_{\text{П}}$, для усиливающего провода $\alpha = \alpha_{\text{Y}}$:

$$\alpha_{\text{T}} = \frac{53}{D_{\text{э,П}}^{0,41}} + 8\xi = \frac{53}{19,6^{0,41}} + 8 \cdot 0,8 = 22 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)},$$

$$\alpha_{\text{П}} = \frac{53}{D_{\text{э,П}}^{0,41}} + 8\xi = \frac{53}{12,48^{0,41}} + 8 \cdot 0,8 = 25,2 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)},$$

$$\alpha_{\text{Y}} = \frac{53}{D_{\text{э,Y}}^{0,41}} + 8\xi = \frac{53}{24,5^{0,41}} + 8 \cdot 0,6 = 19,1 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)},$$

По формуле (5.21) находим токи присоединения $I_j = I_{\text{T}}$, $I_j = I_{\text{П}}$, $I_j = I_{\text{Y}}$, ограниченные параметрами соответствующих проводов контактной сети (несущего троса, контактного провода, усиливающего провода):

$$I_j = I_{\text{T}} = \frac{1}{K_{\text{P,T}}} \sqrt{\frac{(t_{\text{н,макс,Т}} - t_{\text{окр}})\alpha_{\text{T}}\pi D_{\text{э,Т}}}{r_{\text{T,20}}(1 + \beta_{r,\text{T}}t_{\text{н,макс,Т}})}} = \frac{1}{0,218} \sqrt{\frac{(100 - 40)22 \cdot \pi \cdot 19,6}{0,156(1 + 0,0040 \cdot 100)}} = 2798 \text{ А},$$

$$I_j = I_{\text{П}} = \frac{1}{K_{\text{P,П}}} \sqrt{\frac{(t_{\text{н,макс,П}} - t_{\text{окр}})\alpha_{\text{П}}\pi D_{\text{э,П}}}{r_{\text{П,20}}(1 + \beta_{r,\text{T}}t_{\text{н,макс,П}})}} = \frac{1}{0,174} \sqrt{\frac{(95 - 40)25,2 \cdot \pi \cdot 12,48}{0,196(1 + 0,0040 \cdot 95)}} = 2576 \text{ А},$$

$$I_j = I_{\text{T}} = \frac{1}{K_{\text{P,Y}}} \sqrt{\frac{(t_{\text{н,макс,Y}} - t_{\text{окр}})\alpha_{\text{Y}}\pi D_{\text{э,Y}}}{r_{\text{Y,20}}(1 + \beta_{r,\text{Y}}t_{\text{н,макс,Y}})}} = \frac{1}{0,217} \sqrt{\frac{(90 - 40)19,1 \cdot \pi \cdot 24,5}{0,161(1 + 0,0040 \cdot 90)}} = 2670 \text{ А}.$$

Наименьшее из этих трех значений $I_j = 2576$ А соответствует ограничению тока по контактному проводу, следовательно, лимитирующим в данном случае является именно контактный провод.

Определение уставки по температуре

Уставку, соответствующую максимальной температуре, определяем по формуле (5.14)

имея в виду, что в защите от отжига температура $t_{\max} = t_{n,\max}$ соответствует длительно допустимой температуре лимитирующего (в данном случае – контактного) провода, указанной в таблице 5.4:

$$t_y \leq K_{3,\text{п}} t_{\max} = 0,85 \cdot 95 = 80,75 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Принимаем t_y равной 80 $^\circ\text{C}$.

Уставку температуры предупреждения определяем по формуле (5.15).

$$t_{\text{пред}} \leq K_{3,\text{пред}} t_y = 0,9 \cdot 80 = 72 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Принимаем $t_{\text{пред}}$ равной 70 $^\circ\text{C}$.

Определение коэффициентов нагрева и охлаждения

По таблице 5.4 находим для лимитирующего провода (в данном примере – контактного) $m = 0,890$ кг/м, $C = 391$ Вт·с/(кг· $^\circ\text{C}$).

Коэффициент нагрева контактного провода находим по формуле (5.20) с учетом необходимости пересчета значения m в соответствии с примечанием таблицы 5.3 из-за износа контактного провода $u = 10$ %:

$$K_n = \left(\frac{K_{p,\text{п}}^2 r_{\text{п},20} \cdot 10^{-3}}{m_{\text{п}} (1 - u \cdot 10^{-2}) C_{\text{п}}} \right) = \left(\frac{0,174^2 0,196 \cdot 10^{-3}}{0,890 (1 - 10 \cdot 10^{-2}) 391} \right) \cdot 10^{-7} = 0,189 \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}/(\text{с} \cdot \text{A}^2).$$

Коэффициент охлаждения лимитирующего контактного провода определяем по формуле (5.20)

$$K_o = \left(\frac{\alpha_{\text{п}} \pi D_{\text{э,пн}} 10^{-3}}{m_{\text{п}} (1 - u \cdot 10^{-2}) C_{\text{п}}} \right) = \left(\frac{25,2 \cdot \pi \cdot 12,48 \cdot 10^{-3}}{0,890 (1 - 10 \cdot 10^{-2}) 391} \right) = 0,315 \cdot 10^{-2} \text{ 1/с}.$$

5.11. Выбор уставок защит при профилактическом подогреве проводов и плавке гололеда

При профилактическом подогреве проводов контактной сети состав защит и уставки их срабатывания по сравнению с вычисленными по условиям, приведенным в таблице 5.2, не меняют.

При плавке гололеда на проводах контактной сети используют токовую отсечку или максимальную импульсную токовую защиту.

Уставки этих защит выбирают по условию

$$I_y = 1,2 I_Q, \tag{5.25}$$

где $I_Q = I_{\text{пл}}$ – ток выключателя тяговой подстанции для начального периода плавки при наименьшей расчетной температуре окружающей среды t_p (принимают, как правило, $t_p = -10$ $^\circ\text{C}$), А.