



Министерство транспорта Российской Федерации  
Федеральное агентство железнодорожного транспорта  
ГОУ ВПО «Дальневосточный государственный  
университет путей сообщения»

П.С. Пинчуков

**ЗАЩИТА СЕКЦИОНИРОВАННЫХ  
ТЯГОВЫХ СЕТЕЙ  
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Монография

Хабаровск  
Издательство ДВГУПС  
2010

УДК 621.331.3.025.1:625.1  
ББК О 217 – 053  
П 326

Рецензенты:

Кафедра «Энергетика»  
Амурского государственного университета  
(заведующий кафедрой, кандидат технических наук,  
профессор *Н.В. Савина*)

Главный инженер службы электрификации и электроснабжения  
Дальневосточной железной дороги – филиала ОАО «РЖД»  
*С.Ю. Дрокин*

**Пинчуков, П.С.**

**П 326** Защита секционированных тяговых сетей переменного тока : монография / П.С. Пинчуков. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2010. – 95 с. : ил.  
ISBN 978-5-262-00508-6

Монография охватывает круг вопросов, связанных с исследованием работы защиты системы тягового электроснабжения в условиях Восточного региона России. Изложены результаты экспериментальных и теоретических исследований функционирования защит контактной сети и тяговых подстанций в различных режимах работы. Даны практические рекомендации по повышению эффективности работы защит.

Издание рассчитано на широкий круг инженерно-технических работников служб электрификации и электроснабжения железных дорог, студентов, занимающихся вопросами расчета защит тяговых сетей, аспирантов и научных сотрудников.

Монография может быть использована в качестве дополнительной учебной литературы при подготовке студентов дневной и заочной форм обучения по специальности 190401 «Электроснабжение железных дорог».

**УДК 621.331.3.025.1:625.1**  
**ББК О 217 – 053**

**ISBN 978-5-262-00508-6**

© ГОУ ВПО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (ДВГУПС), 2010

## ВВЕДЕНИЕ

Главной задачей железнодорожного транспорта является обеспечение стабильного перевозочного процесса, что напрямую зависит от надежной работы систем внешнего и тягового электроснабжения. Существенный вклад в надежность, безопасность и эффективность работы обеих систем вносит релейная защита и противоаварийная автоматика.

Выполнением всех требований, предъявляемых к защитам в соответствии с Правилами устройств электроустановок и другой нормативной документацией, обеспечивается надежная защита тяговой сети в аварийных режимах.

Введение в эксплуатацию при завершении электрификации Транссиба участков с длиной межподстанционных зон более 90 км и постоянным обращением тяжеловесных поездов выявило ряд проблем, связанных с организацией защиты контактной сети. Отсутствие продольного секционирования на участках такой протяженности приводило бы к отключению больших участков контактной сети при повреждениях, «растяжкам» поездов и перерывам в движении, что, в свою очередь, могло снизить безопасность движения поездов и эффективность перевозочного процесса. Поэтому при проектировании системы тягового электроснабжения данного участка закладывались принципы многократного продольного секционирования тяговой сети с помощью нескольких постов секционирования. Действовавшая на момент введения участка в эксплуатацию типовая методика расчета защит не учитывала ряд особенностей, поэтому защита была малоэффективной.

Необходимость комплексного исследования защит системы тягового электроснабжения и разработки требований к защитам секционированных ТС определила целесообразность выполнения данной работы.

Представленная вниманию читателей монография охватывает круг вопросов, связанных с исследованием работы защиты системы тягового электроснабжения в условиях Восточного региона России. Изложены результаты экспериментальных и теоретических исследований функционирования защит контактной сети и тяговых подстанций в различных режимах работы. Даны практические рекомендации по повышению эффективности работы защит.

Монография рассчитана на широкий круг инженерно-технических работников служб электрификации и электроснабжения железных дорог, студентов, занимающихся вопросами расчета защит тяговых сетей, аспирантов и научных сотрудников.

## ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

АПВ	– автоматическое повторное включение
ДВостЖД	– Дальневосточная железная дорога
ДЗ№,	– дистанционная ненаправленная защита
ДНЗ№	– дистанционная направленная защита
ж.д.	– железная дорога
ЗабЖД	– Забайкальская железная дорога
КЗ	– короткое замыкание
КС	– контактная сеть
КП	– контактный провод
НТ	– несущий трос
ОКЗ	– область коротких замыканий
ОН	– область нагрузочного режима
ОРУ	– открытое распределительное устройство
ППРС	– пункт продольного секционирования
ППС	– пункт параллельного соединения
ПС	– пост секционирования (контактной сети)
ПТП	– подпитывающая подстанция
РЗ	– релейная защита
РТ	– рекуперативное торможение
СТЭ	– система тягового электроснабжения
СВЭ	– система внешнего электроснабжения
ТБ	– токовая блокировка
ТО	– токовая отсечка
ТПС	– тяговая подстанция
ТС	– тяговая сеть
ТН	– трансформатор напряжения
ТТ	– трансформатор тока
УП	– усиливающий провод
УХС	– угловая характеристика срабатывания (защиты и реле)
ФКС	– фидер контактной сети
ЭПС	– электроподвижной состав
ЭП	– экранирующий провод
ЭУП	– система электроснабжения с экранирующим и усиливающим проводами
ЭС	– электроэнергетическая система

# 1. РОЛЬ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ В СИСТЕМЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И ПЕРЕВОЗОЧНОМ ПРОЦЕССЕ

Эффективность перевозочного процесса на электрифицированных железных дорогах зависит от надежной работы нескольких систем, приведенных на рис. 1.1. В каждой из систем, участвующих в организации перевозочного процесса, возможно появление ненормальных и аварийных режимов, которые приводят к повреждению оборудования, задержкам поездов, разрыву транзита по ЛЭП, питающим тяговые подстанции, и др. Причем ненормальные и аварийные режимы в одной системе оказывают влияние на работу другой системы.

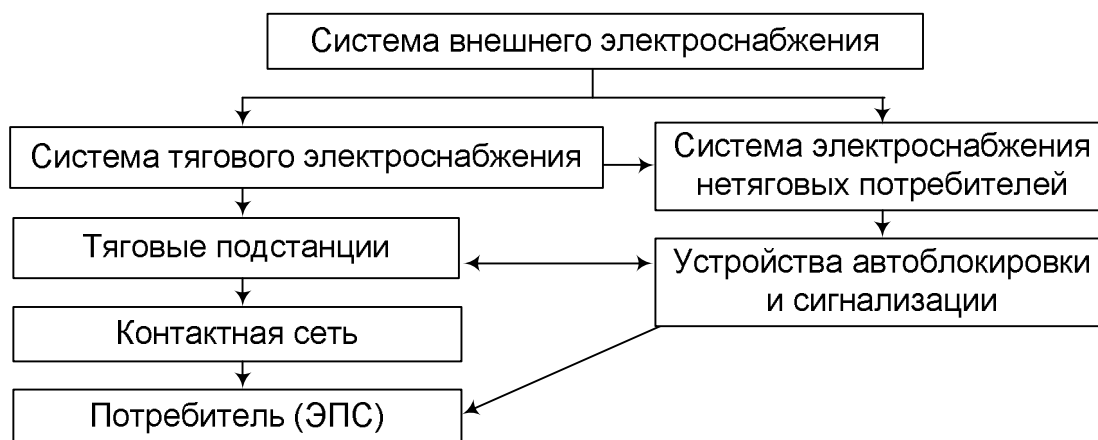


Рис. 1.1. Основные элементы системы электроснабжения железнодорожного транспорта и их взаимосвязи

Значительный вклад в обеспечение эффективной работы системы электроснабжения железных дорог вносит релейная защита. При этом каждый элемент системы, приведенной на рис. 1.1, имеет свои отличительные особенности нормального и аварийного режимов, что отражается на организации его защиты.

В настоящее время эксплуатационная длина электрифицированных линий железных дорог России превышает 40 тыс. км и соответствует более 50 % общей протяженности сети. При этом на переменном токе 25 кВ электрифицировано около 24 тыс. км. Так, 75,6 % всех перевозок осуществляется на электрической тяге. Удельный вес электрической тяги в структуре энергопотребления составляет 82,3 % [1, 40].

К релейной защите в соответствии с ее назначением предъявляют следующие основные требования: избирательность, быстродействие, чувствительность, надежность, резервирование [4, 5, 31]. Взаимодействие защит систем внешнего и тягового электроснабжения можно увидеть на примере схемы электроснабжения двухпутного участка железной дороги, электрифицированной на переменном токе (рис. 1.2).

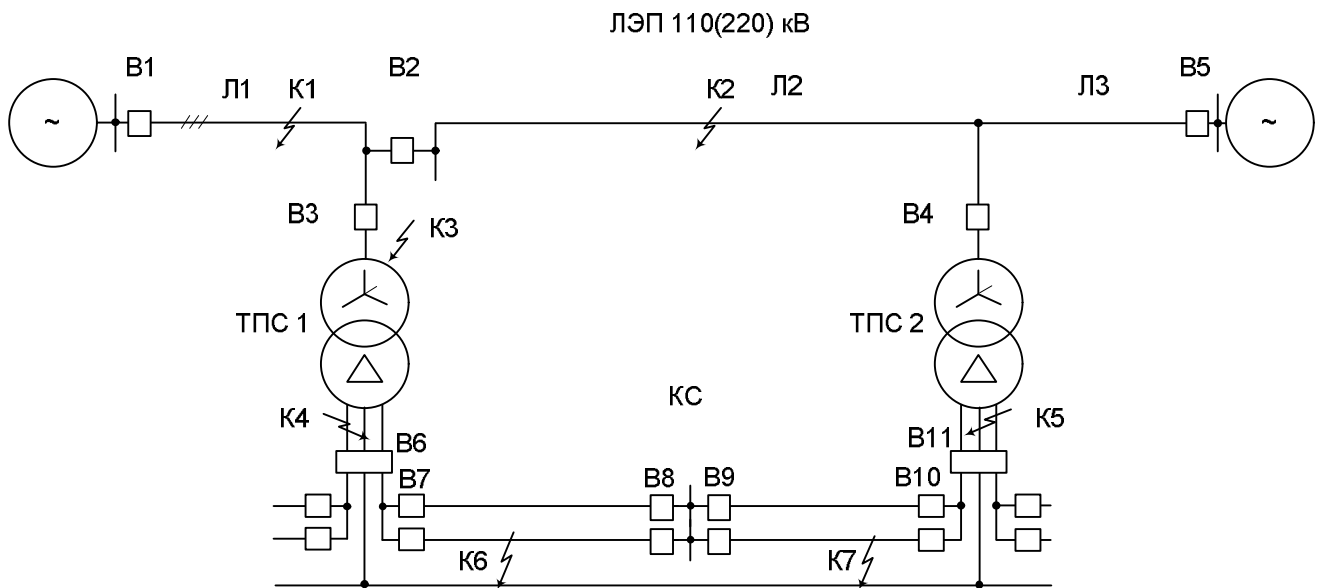


Рис. 1.2. Схема питания двухпутного участка железной дороги, электрифицированного на переменном токе

В соответствии с [4] защиты линий внешнего электроснабжения должны реагировать на повреждения в питающих ЛЭП (К1 и К2 рис. 1.2) и резервировать защиты ТПС при К3 на первичной и вторичных обмотках трансформаторов (К3, К4 и К5 на рис. 1.2). Система защиты строится таким образом, чтобы при отказе защиты одного из элементов защита следующего элемента смогла отключить повреждение. Данные требования предъявляются к защите любого электрического присоединения, независимо от его назначения и характеристик. Выполнение всех требований обеспечивает эффективность и стабильность перевозочного процесса и безопасность движения поездов в целом.

На основании работ отечественных ученых созданы достаточно эффективные системы защит электротяговых сетей. В [5, 7, 11, 26, 38] показано, что наиболее полно к требованиям, предъявляемым к защитах СВЭ и СТЭ, отвечают дистанционные защиты.

Созданию эффективной защиты, способной обеспечить надежную работу всех систем, участвующих в перевозочном процессе, должно предшествовать научное исследование режимов, возникающих в системе тягового электроснабжения. Вопросам исследования работы защиты и автоматики тяговых сетей переменного тока посвящены работы отечественных ученых: В.В. Белова [11], Б.Е. Дынькина [7, 15, 16, 17], Ю.И. Жаркова [8], В.А. Зимакова [12], В.Я. Овласюка [8, 11, 12], В.Н. Пупынина [10, 32], Е.П. Фигурнова [35, 36, 38].

Интенсивный рост грузооборота на сети железных дорог РФ в конце 90-х гг. прошлого столетия повлек за собой электрификацию новых участков [18, 40]. Проект завершения электрификации Транссиба на участке

Бикин – Сибирцево имел ряд особенностей: увеличенные расстояния между ТПС; использование контактной подвески с экранирующим и усиливающим проводами; установка на межподстанционных зонах подпитывающих подстанций и пр. Экспериментальные исследования показали, что в таких условиях существующие устройства релейной защиты СТЭ не удовлетворяют в полной мере требованиям селективности, быстродействия, резервирования и др. Наряду с этим, отсутствует четкое взаимодействие между защитами систем тягового и внешнего электроснабжения. Поэтому возникла необходимость повышения эффективности работы защит СТЭ с учетом особенностей работы новых электрифицированных участков железной дороги переменного тока 25 кВ.

Железным дорогам Восточного региона России характерны участки, имеющие сложный профиль и план пути (ДВостЖД подъемы до 28 ‰ протяженностью до 10 км, для ЗабЖД подъемы до 18 ‰ протяженностью до 10–30 км), на которых возможны остановки поездов на подъеме после КЗ [20, 22]. Время задержки поезда, остановленного на подъеме, определяет время освобождения перегона от «растянувшегося» поезда и время восстановления напряжения на контактной сети. На основании этого актуальность приобретает вопросы многократного продольного секционирования тяговых сетей для минимизации длины отключаемого участка, что также оказывает существенное влияние на работу защит.

## **2. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЗАЩИТЫ ТЯГОВЫХ СЕТЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

### **2.1. Характеристика комплектов защит, применяемых в тяговых сетях переменного тока**

Релейная защита, являющаяся одним из основных элементов системы электроснабжения, должна реагировать на все аварийные и ненормальные режимы, возникающие в ТС, и отвечать предъявляемым требованиям [5, 31].

Разработка, производство и выпуск новых моделей защит контактной сети производились по мере морального старения элементной базы и выявления недостатков в характеристиках используемых защит. В ряду защит фидеров КС переменного тока можно выделить электронные защиты с двухступенчатыми УХС (УЭЗФ, УЭЗФТ, УЭЗФП, УЗТБ, УЭЗФМ), электронные трехступенчатые модифицированные УЭЗФМ, комплекты АЗФИ, АЗ и ЯРЭЖ, использующие микросхемотехнику [11, 39] и микропроцессорные защиты БМРЗ-27,5-ФКС (ЦЗА – 27,5 кВ).

Рассмотрим характеристики наиболее распространенных комплектов защит. На рис. 2.1 представлена угловая характеристика срабатывания

защиты типа УЭЗФМ, на рис. 2.2 – защиты типа АЗ. В табл. 2.1 приведены основные параметры комплектов защит УЭЗФМ и АЗ.

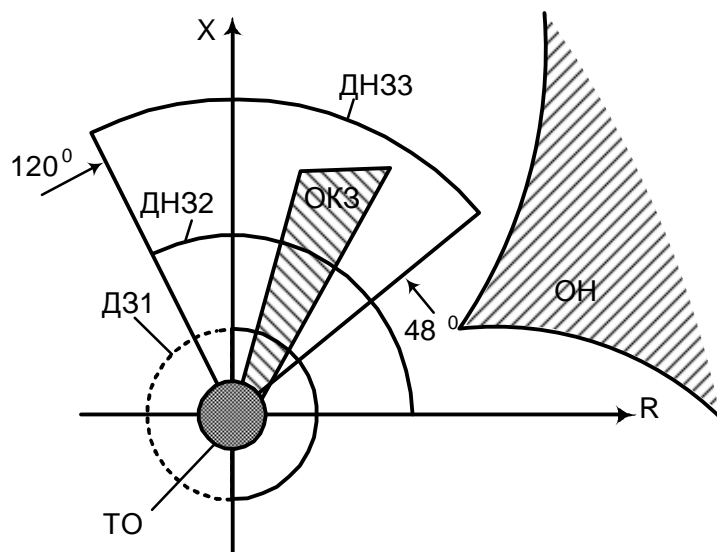


Рис. 2.1. УХС комплекта защиты УЭЗФМ

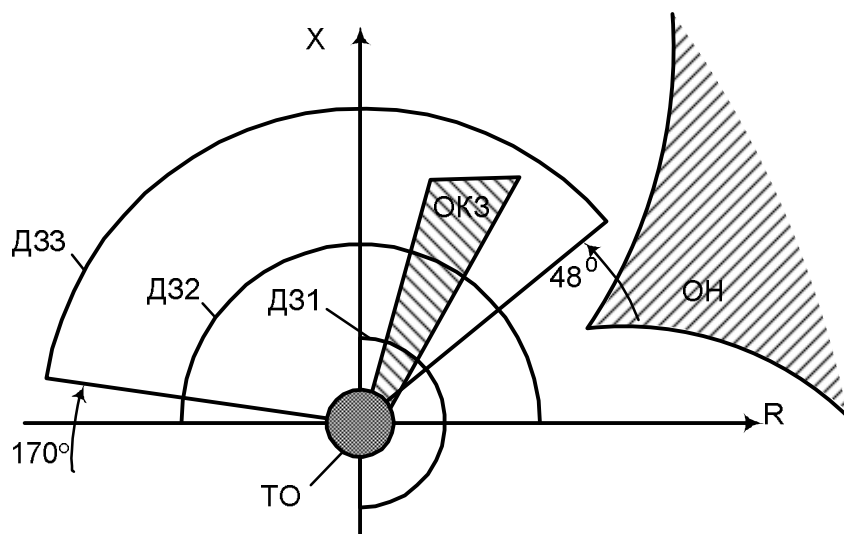


Рис. 2.2. УХС комплекта защиты ФКС АЗ

Как видно из рис. 2.1, 2.2 и данных табл. 2.1, характеристики ДНЗ2 и ДНЗ3 комплекта АЗ, по сравнению с защитами УЭЗФМ, расширились по верхней границе до 170–180°. Это сделано с целью включения в функции комплекта защиту от перекрытия нейтральной вставки [6, 39]. Кроме этого, особых изменений в характеристике и параметрах защиты нет.

Основные недостатки защит ТС переменного тока, УХС которых сформирована из круговых или секторных ступеней, были отмечены в [16, 18, 19].

Другим типом защит является комплект типа ЯРЭЖ–2201, разработанный НПП «Техника» совместно с ЧЭАЗ [39]. Данное устройство защиты содержит три ступени дистанционной защиты, резервную максимальную токовую защи-



ту и ТО. В отличие от АЗ ступени дистанционной защиты комплекта ЯРЭЖ имеют четырехугольные характеристики. В последнее время все большее применение находят комплекты защит на базе микропроцессорной техники, например, защиты БМРЗ или ЦЗА. На рис. 2.3 представлены УХС защит типа ЯРЭЖ, БМРЗ и зеркальная характеристика дистанционной защиты.

Таблица 2.1

**Технические характеристики комплектов защиты фидеров контактной сети типа УЭЗФМ и АЗ**

Параметры	Ступени			
	ТО	ДНЗ1	ДНЗ2	ДНЗ3
<b>УЭЗФМ</b>				
Диапазон первичных уставок, А(Ом) (при ТТ 1000/5)	520–4000	5,0–45	5,0–45	5,0–45
Направленность	Нет	Нет (ТБ)	Лучевая УХС (0°–120°)	Лучевая УХС (48°–120°)
Время срабатывания, с	0	0	0,5	0,5
<b>АЗ</b>				
Диапазон первичных уставок, А(Ом) (при ТТ 1000/5)	500–4000	3–55	3–55	3–55
Направленность	Нет	Нет	Лучевая или полукруговая УХС (0°–180°)	Лучевая УХС (48°–170°)
Время срабатывания, с	0	0	0,5	1,0

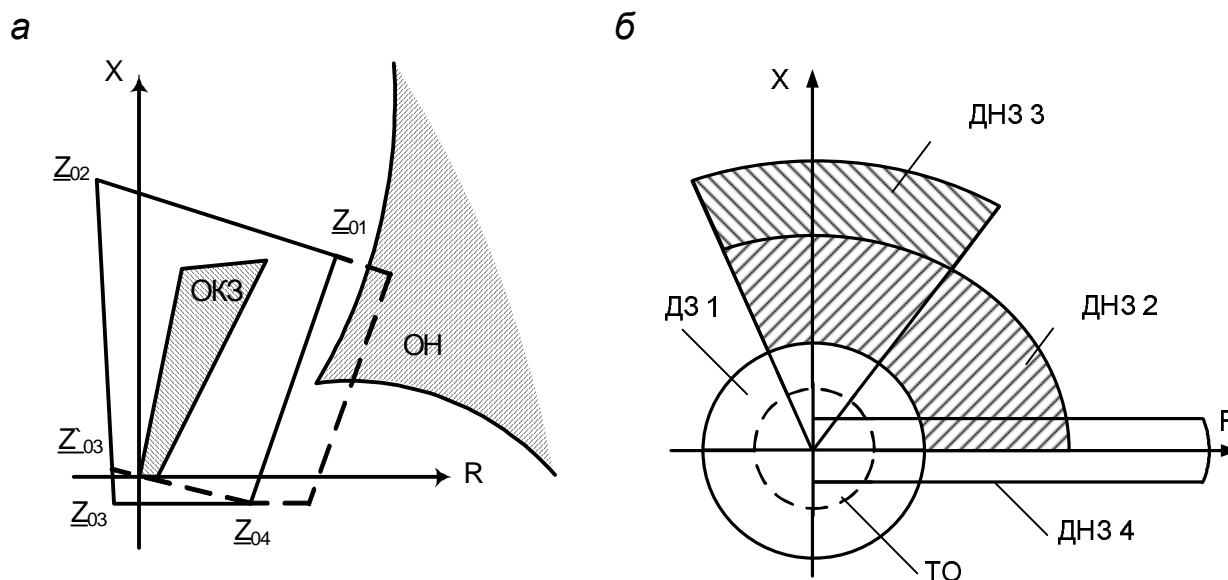


Рис. 2.3. Характеристики защит ФКС: а – УХС ступени ДЗ комплекта типа ЯРЭЖ; б – УХС комплекта типа БМРЗ

Видно, что УХС защит существенно не меняются, хотя изменение элементной базы прошло уже четыре поколения.

Обобщая все вышесказанное, необходимо отметить, что новые защиты переняли все недостатки УХС защит предыдущих типов.

## **2.2. Экспериментальные исследования работы защит в условиях эксплуатации**

В декабре 2002 г. был сдан в эксплуатацию последний электрифицированный участок Транссиба Бикин–Сибирцево ДВостЖД общей протяженностью более 350 км. Участок состоит из четырех межподстанционных зон, длины которых приведены в табл. 2.2. На всех межподстанционных зонах смонтирована контактная подвеска типа М-95+МФ-100+А185у+А185э с усиливающим и экранирующим проводами.

*Таблица 2.2*

### **Длины межподстанционных зон участка Бикин–Сибирцево**

Межподстанционная зона	Длина зоны, км
Бикин–Губерово	83,2
Губерово–Ружино	92,5
Ружино–Свиягино	83,0
Свиягино–Сибирцево	94,6

В соответствии с проектом электрификации данного участка на фидерных зонах Бикин–Губерово, Губерово–Ружино и Свиягино–Сибирцево установлены подпитывающие тяговые подстанции с трансформаторами мощностью 25 МВА 110/27,5 кВ. ПТП должны были включаться в работу по приказу энергодиспетчера на время пропуска крупных пакетов поездов или прохода тяжеловесных составов. В случае отключения ПТП должна функционировать как ПС с действующими защитами. Однако в настоящее время ПТП включены постоянно, так как в противном случае невозможно обеспечить требуемый уровень напряжения на токоприемнике электровоза в условиях постоянного обращения тяжеловесных поездов.

На подстанциях рассматриваемого участка установлено несколько типов защит ФКС. Так, на ТПС Сибирцево и Ружино эксплуатируются защиты типа УЭЗФМ, на Свиягино – АЗ с микроконтроллерами, на Губерово – ЯРЭЖ. С момента пуска в эксплуатацию по данным, предоставленным службой электрификации и электроснабжения ДВостЖД, наблюдались периодические сбои в работе защит на ТПС, особенно это касается комплектов типа УЭЗФМ и АЗ. Практически каждый день происходили ложные срабатывания защит ФКС в нормальном режиме. Если учесть, что на других участках с межподстанционными зонами длиной до 50–55 км данные типы защит работают нормально, можно сделать вывод, что недостатки в

работе защит участка Бикин–Сибирцево определяется именно особенностями схемы питания и значительной длиной межподстанционных зон.

Для оценки условий функционирования защит на данном участке были проведены экспериментальные исследования параметров нормального и аварийного режимов. Первые исследования, при непосредственном участии автора, были проведены в ноябре 2002 г. на межподстанционной зоне Свягино–Сибирцево. Выбор именно этой межподстанционной зоны был обусловлен тем, что ее протяженность, по сравнению с другими зонами участка Бикин–Сибирцево, наибольшая. Наряду с этим, на данном участке ложные срабатывания наблюдались особенно часто, число которых доходило до десяти и более за сутки. В исследованиях принимали участие сотрудники кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ДВГУПС и службы Электрификации и электроснабжения ДВостЖД. В ходе исследований при помощи измерительных комплексов были проведены измерения нагрузок и осциллографирование токов и напряжений в аварийных и нормальных режимах работы СТЭ.

Схема рассматриваемого участка представлена на рис. 2.4. Длина межподстанционной зоны между тяговыми подстанциями Свягино и Сибирцево 94,6 км. На расстоянии 34 км от ТПС Свягино находится ПТП Спасск.

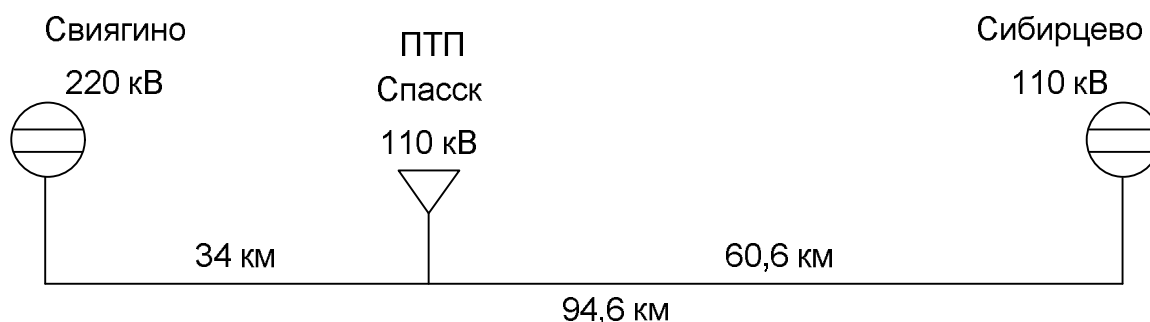


Рис. 2.4. Схема межподстанционной зоны Свягино–Сибирцево

ТПС Свягино и Сибирцево являются подстанциями транзитного типа с первичным напряжением 220 и 110 кВ соответственно. На момент проведения испытаний на рассматриваемой межподстанционной зоне ПТП была отключена и работала как ПС с выведенными из работы защитами.

Результаты замеров были подвергнуты обработке, после этого построены экспериментальные области нагрузок. На рис. 2.5 приведена комплексная плоскость сопротивлений с нанесенными на нее границами УХС комплекта защиты типа АЗ, установленного на всех ФКС и вводах трансформаторов ТПС Свягино.

Следует отметить, что при прогрузке комплектов эксплуатируемых защит ФКС было отмечено изменение нижней границы УХС ДН33. Вместо паспортного значения  $48^\circ$  реальная граница составляла  $42\text{--}41^\circ$ . При этом,

как видно из рис. 2.5, часть сопротивлений, измеряемых защитой ФКС в нагрузочном режиме, захватывается третьей ступенью ДНЗ.

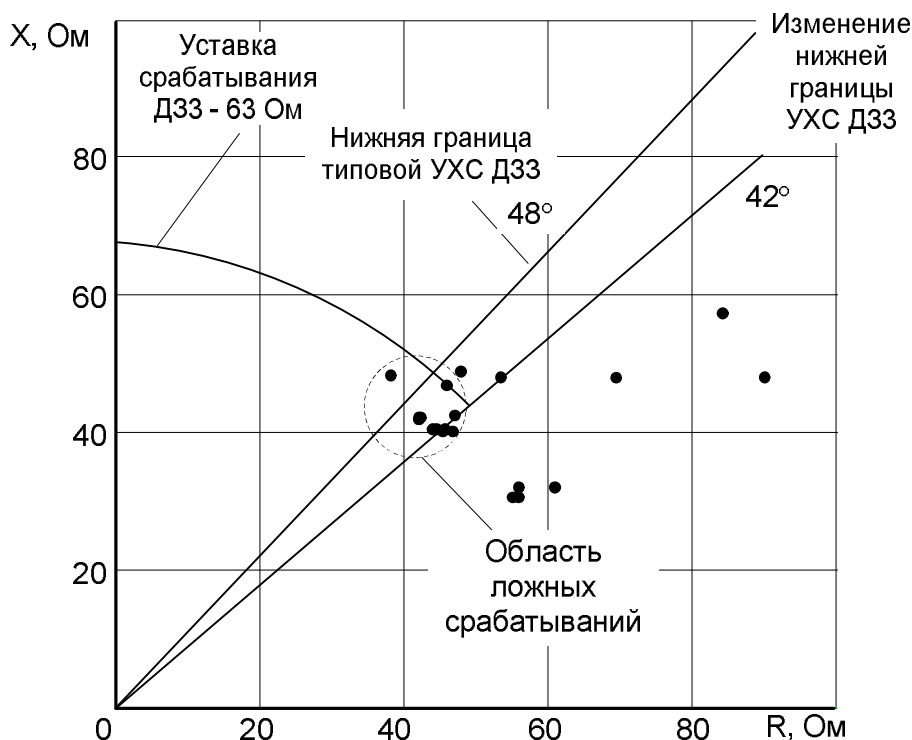


Рис. 2.5. Область нагрузок участка Свягино–Сибирцево с нижними границами УХС ДНЗЗ защит подстанции

Осциллограммы токов и напряжений в момент ложных срабатываний приведены на рис. 2.6, 2.7 и 2.8.

В табл. 2.3 приведены уставки ступеней защит ФКС на ТПС Свягино.

Как видно из рис. 2.6, 2.7 и 2.8, ложные срабатывания происходят при токах порядка 460–550 А и фазовом сдвиге 38°, что соответствует нормальному режиму. Это говорит о том, что при расчете уставок защит не все параметры нормального режима были оценены достаточно точно.

Повторные испытания, проведенные в апреле 2003 г., были организованы в связи с опытным пропуском по участку Бикин–Сибирцево тяжеловесных поездов массой более 6000 т. В ходе проведения исследований бригада сотрудников кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ДВГУПС производила измерения не только на подстанциях, а также и на ЭПС. По результатам повторных испытаний проводилась проверка достоверности результатов проведенных теоретических исследований.

Быстродействие работы защиты и отключение КЗ с минимальной выдержкой времени, определяемой в основном требованием селективности, в первую очередь, оказывает влияние на провода КС. Длительное воздействие токов КЗ приводит к пережогу проводов, потере их механической прочности и как результат к выходу из строя контактной подвески. Причем

периодические воздействия больших токов и, следовательно, температур, приводят к «накапливанию» дефектов [2] в материале провода. Постоянные перегревы при длительных воздействиях тока КЗ способствуют быстрому износу и выходу проводов из строя.

Таблица 2.3

**Уставки защит фидеров контактной сети ТПС Свягино**

№ фкс	Тип защиты	Ктт	Степень	$Z_{сз}, (Z_{ср}),$ Ом	$I_{с.з.} (I_p),$ А	$\varphi,$ град. эл.
1 запад	АЗ	1000/5	ТО	–	2000(9,7)	–
			I	23(16,6)	1200(6)	0-360
			II	51(37)	540(2,75)	0-180
			III	63(47)	435(2,23)	45-180
	РТ-40	МТЗ	–	800(4)	–	
2 запад	АЗ	1000/5	ТО	–	2000(9,7)	–
			I	23(16,6)	1200(6)	0-360
			II	51(37)	540(2,3)	0-180
			III	63(47)	435(2,17)	48-170
	РТ-40	МТЗ	–	800(4)	–	
5 ВОСТОК	АЗ	1000/5	ТО	–	2000(10)	–
			I	34,4(25)	800(4)	0-360
			II	35,7(25,9)	770(3,86)	5-170
			III	70,5(51,3)	390(1,95)	46-171
	РТ-40	МТЗ	–	600(3)	–	
4 ВОСТОК	АЗ	1000/5	ТО	–	2000(10)	–
			I	34,4(25)	800(4)	0-360
			II	35,3(25,4)	780(3,93)	6-168
			III	72,4(52,6)	380(1,9)	46-175
	РТ-40	МТЗ	–	600(3)	–	

При проведении опытных замеров нагрузок на участке Свягино–Сибирцево ДВостЖД было произведено осциллографирование двух реальных КЗ с каскадным срабатыванием защит ФКС тяговых подстанций Свягино и Сибирцево (рис. 2.9, 2.10 и 2.11).

По результатам осциллографирования были составлены схема протекания токов и последовательность действий защит при КЗ (рис. 2.12). Первым отключился фидер 4 на ТПС Свягино. Затем сработала защита фидера 5 на ТПС Свягино. Защиты на ТПС Сибирцево запустились только после отключения выключателей фидера 5 ТПС Свягино и прекращения подпитки КЗ от ТПС Свягино. В случае наличия на ПС функционирующих защит можно было бы избежать каскадного действия защит фидеров тяговых подстанций, поскольку КЗ было бы отключено после срабатывания первых ступеней ДЗ фидеров ТПС Свягино и ПС Спасск.

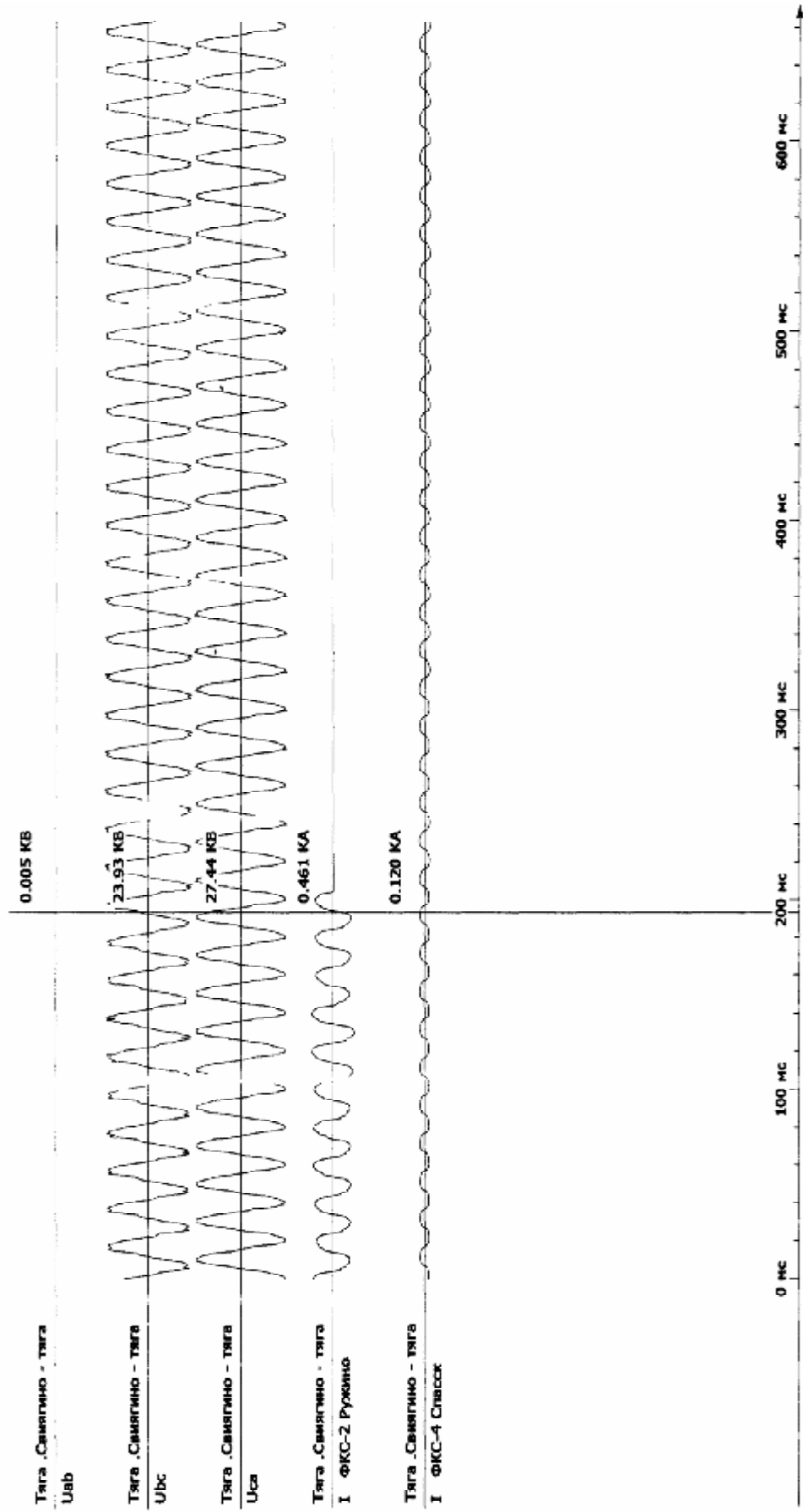


Рис. 2.6. Осциллограммы токов и напряжений за 10 мс до отключения выключателя при ложном срабатывании защиты фидера КС на ТПС (сопротивление, измеряемое защитой  $Z_{изм} = 51,9 \text{ Ом}$ )

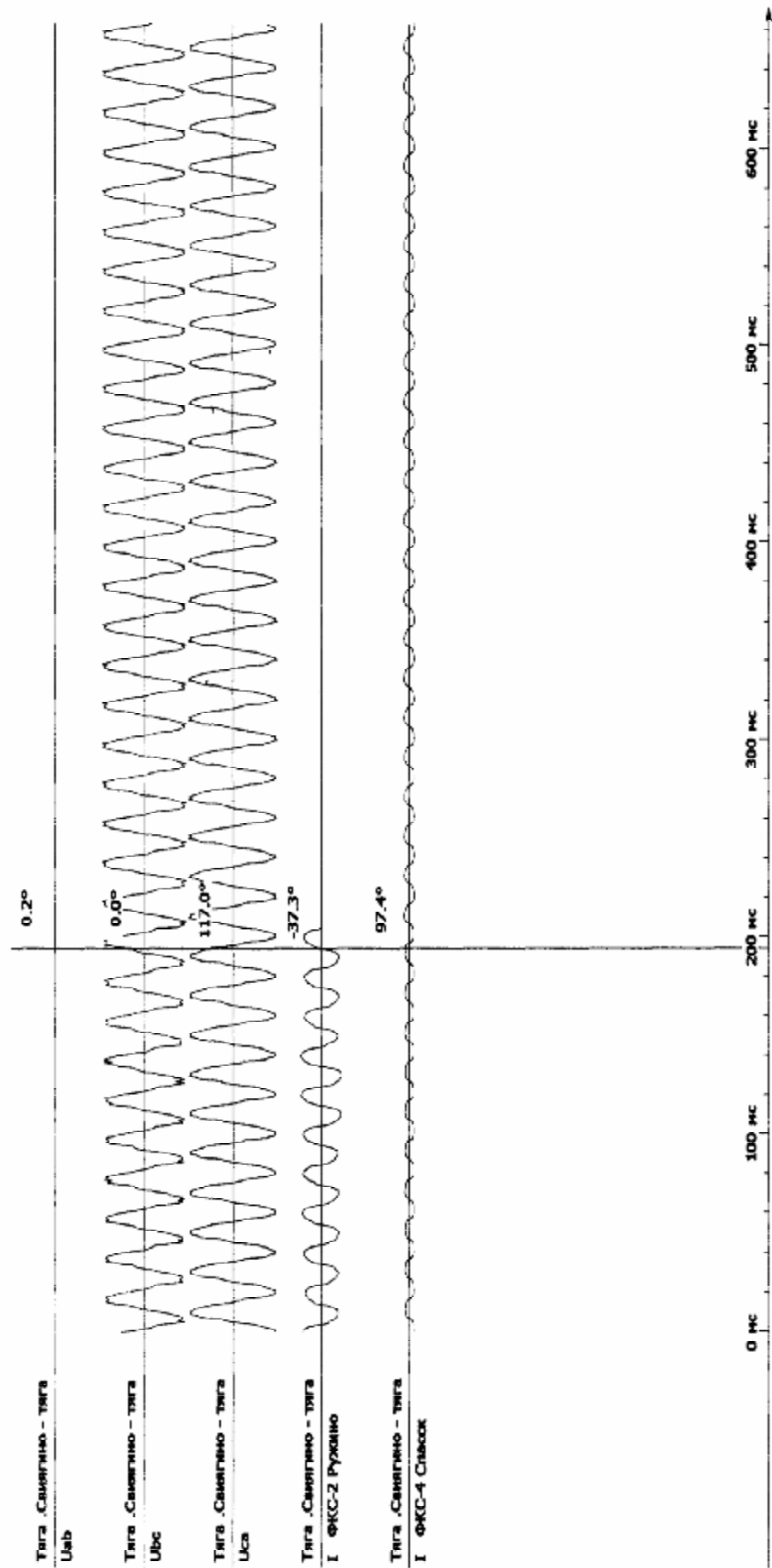


Рис. 2.7. Осциллограммы токов и напряжений за 10 мс до отключения выключателя при ложном срабатывании защиты фидера КС на ТПС (показан фазовый сдвиг тока относительно напряжения своего плеча питания при ложном срабатывании)

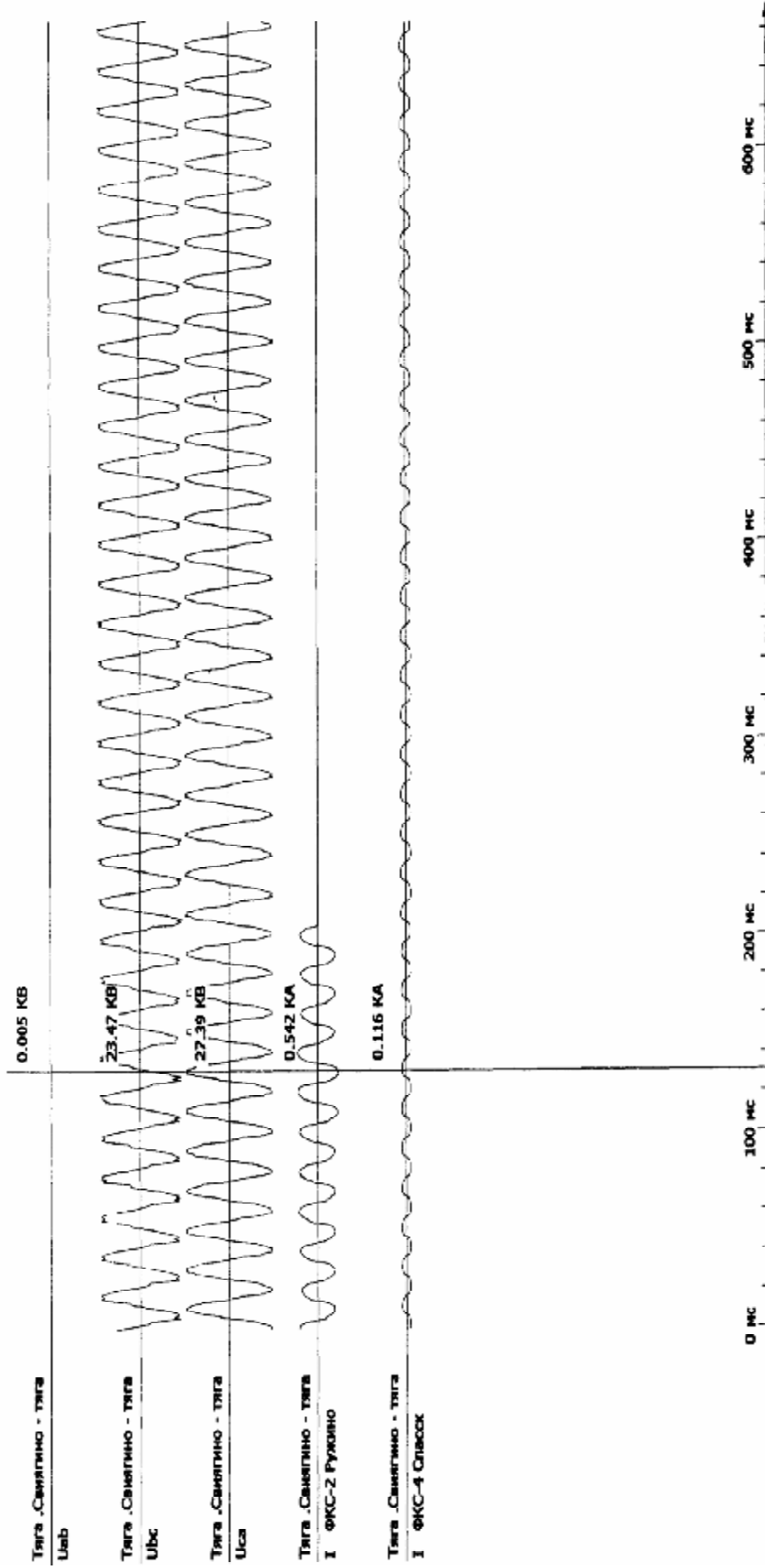


Рис. 2.8. Осциллограммы токов и напряжений за 70 мс до отключения выключателя при ложном срабатывании защиты фидера КС на ТПС (сопротивление, измеряемое защитой  $Z_{изм} = 43,3 \text{ Ом}$ )



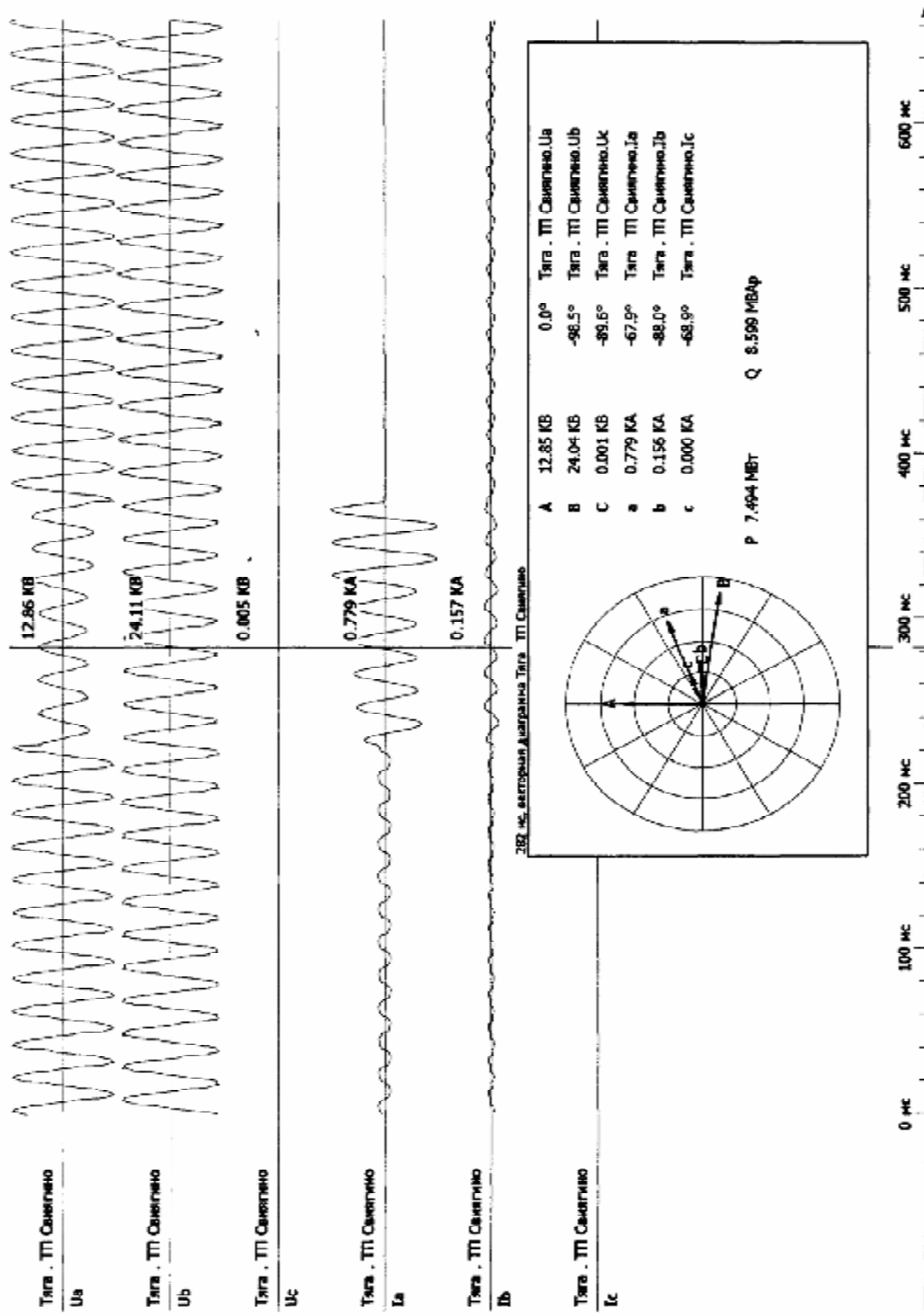


Рис. 2.9. Осциллограммы и векторные диаграммы токов и напряжений при КЗ (показаны величины токов и напряжений в момент подпитки КЗ по обоим фидерам)

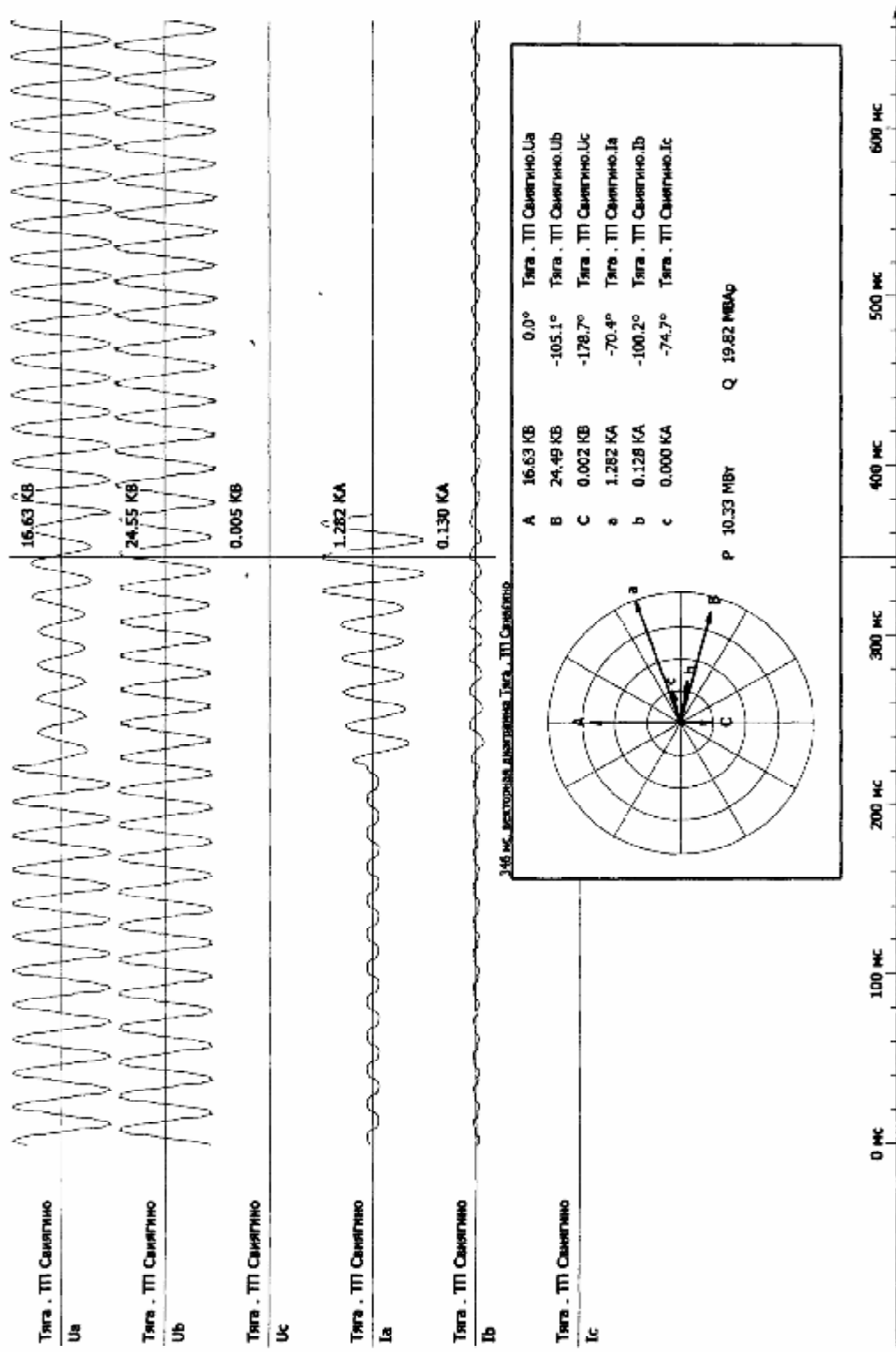


Рис. 2.10. Осциллограммы и векторные диаграммы токов и напряжений при КЗ (показаны величины токов и напряжений после отключения соседнего фидера)

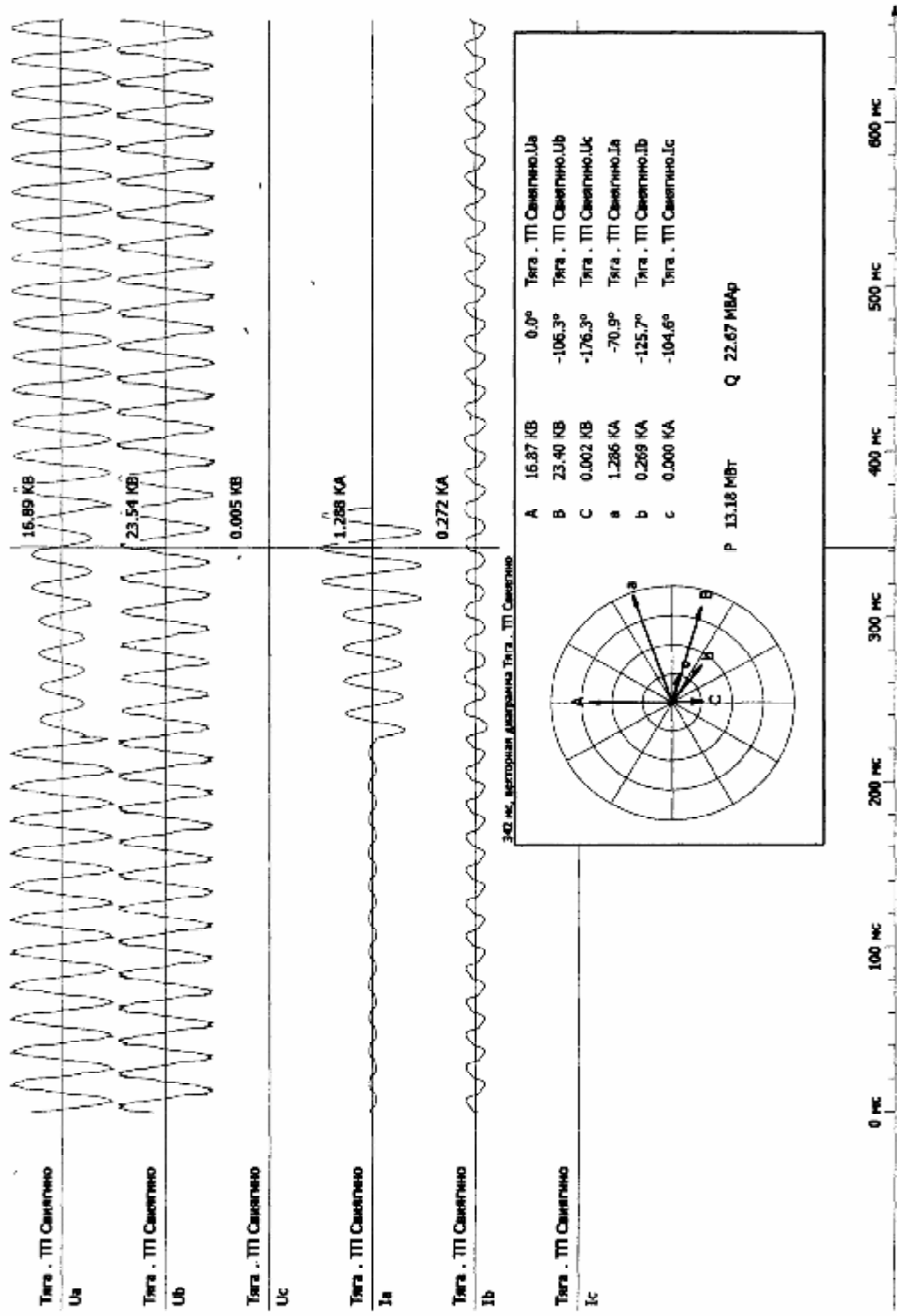


Рис. 2.11. Осциллограммы токов и напряжений при КЗ (режим, аналогичный первому, спустя 5,5 часа)

Таким образом, при работе ПС с выведенными защитами время отключения КЗ увеличивается. Это приводит к более длительному термическому воздействию тока КЗ на провода контактной подвески. Естественно, что воздействие тока КЗ величиной около 1200 А в течение 140 мс (время срабатывания защит 4 и 5) не приведет к отжигу КП. Пережог провода может произойти только при КЗ, сопровождающимся дугой с током свыше 2000 А через 0,150–0,170 с [12, 38]. Между тем устройства АПВ производят повторное включение через 0,5–5 с после отключения КЗ. Поскольку за такое время КП не успевает остывать до температуры окружающей среды, то повторное включение приведет к еще большему нагреву провода. Для исключения возможности пережогов КП необходимо отключать повреждения за время 0,12–0,14 с и не допускать АПВ при устойчивых КЗ [38].

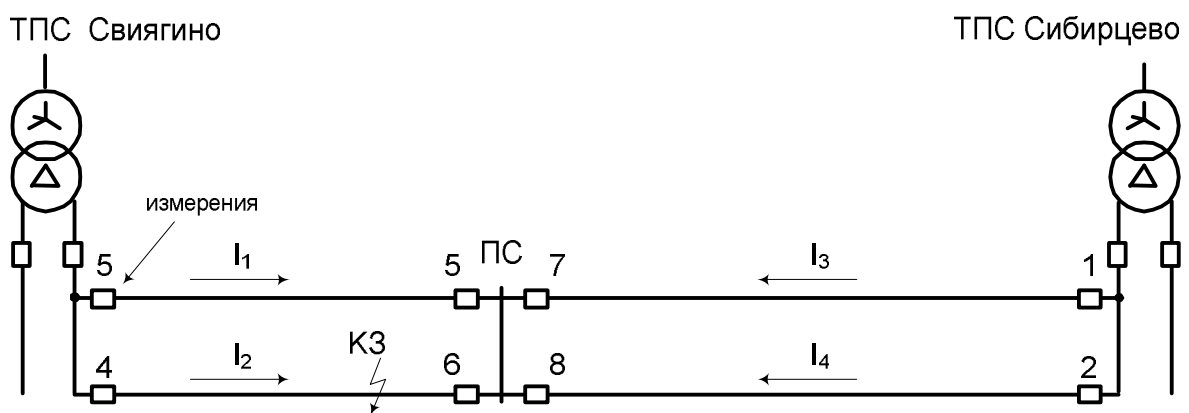


Рис. 2.12. Схема подпитки КЗ при каскадном отключении фидеров контактной сети от защит на подстанции

Результаты исследований работы защит на зоне Свягино–Сибирцево ДВостЖД позволяют сделать следующие выводы:

- Ø отсутствие защит на ПС межподстанционной зоны приводит к необходимости выставления сопротивлений срабатывания ступеней, при которых не обеспечивается надежная отстройка от области нагрузки;

- Ø отсутствие защит на ПС приводит к каскадному отключению фидеров тяговых подстанций, что увеличивает время протекания тока КЗ и его термическое воздействие на провода КС.

### 2.3. Анализ типовой методики расчета защит тяговых сетей переменного тока

Рассмотрим основные положения типовой методики расчета уставок ступеней ДЗ фидеров тяговых подстанций, действующей в настоящее время [5]. Наиболее часто за основную схему питания тяговой сети принимается узловая схема с одним ПС. На рис. 2.13 приведена схема питания двухпутного участка с одним ПС, возможные схемы питания в ненормальных режимах и график селективности защит.

Для соблюдения требования селективности первую ступень ДНЗ выполняют без выдержки времени с областью срабатывания фазовой характеристики в диапазоне углов 0–110° [5]. Если первая ступень выполняется ненаправленной, то она должна быть дополнена токовой блокировкой или отвечать требованиям отстройки от нагрузочного режима.

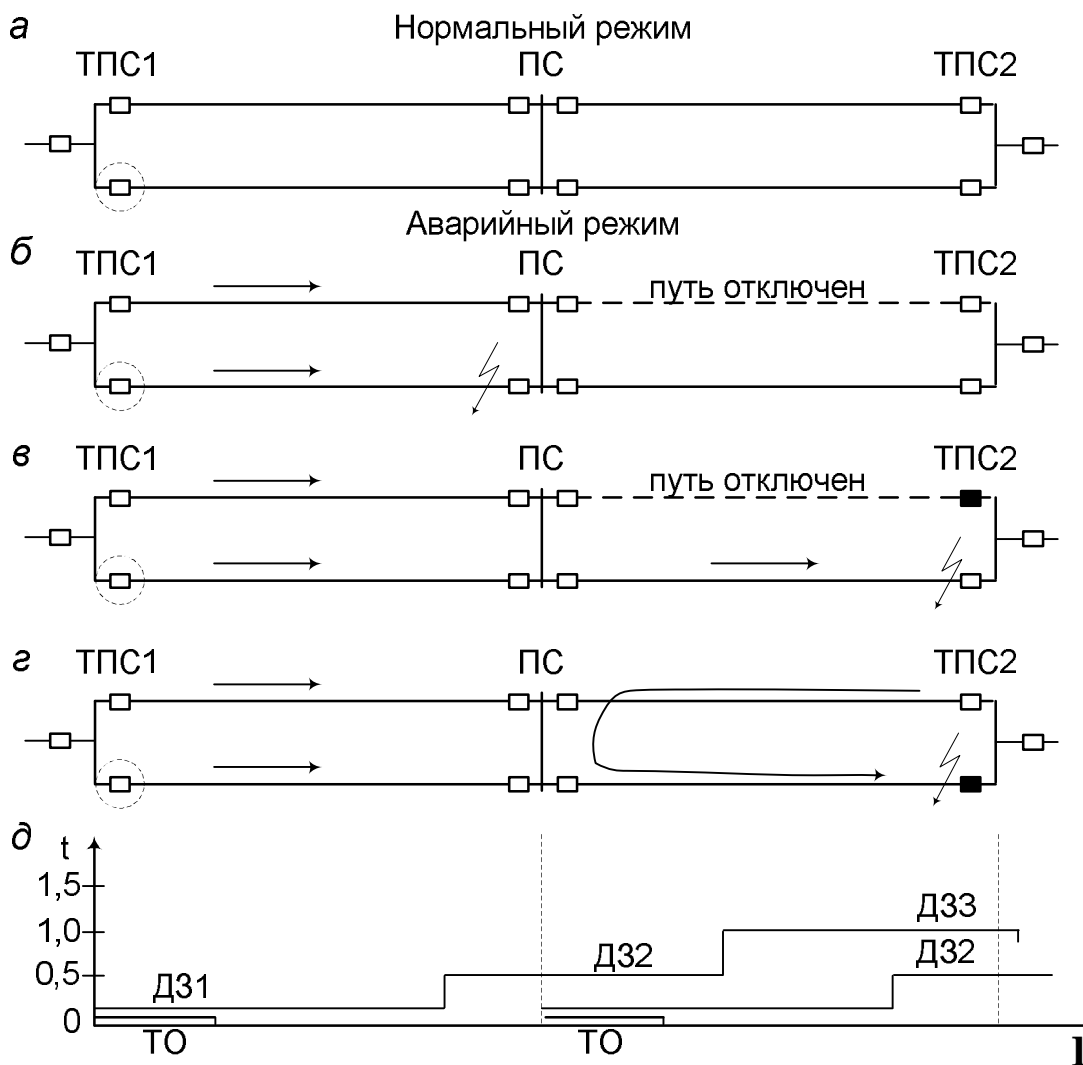


Рис. 2.13. Варианты работы узловой схемы питания:  
 а – в нормальном режиме; б, в, г – в аварийном режиме;  
 д – график селективности ступеней ДНЗ фидеров ТПС и ПС

Уставка ДНЗ 1 для фидера ТПС1 определяется по выражению

$$z_{сз1} = (0,85 - 0,9) z_{21} \cdot I_1, \quad (2.1)$$

где  $z_{21}$  – сопротивление 1 км контактной сети двухпутного участка при отсутствии тока в подвеске соседнего пути, Ом/км;  $I_1$  – расстояние от шин ТПС1 до шин ПС, км.

Выбранная по условию (2.1) уставка проверяется на нечувствительность к режимам нормальной работы по формуле

$$z_{сз1} \leq \frac{z_{нмин}}{K_B \cdot K_3}, \quad (2.2)$$

где  $k_3$  – коэффициент запаса, принимается  $k_3 = 1,1–1,3$ ;  $k_B$  – коэффициент возврата реле сопротивления;  $z_{нмин}$  – минимальное сопротивление нагрузки, определяемое по формуле (2.3).

$$z_{нмин} \leq \frac{0,9 U_{ном}}{I_{н макс}}, \quad (2.3)$$

где  $U_{ном}$  – номинальное напряжение;  $I_{н макс}$  – максимальное значение тока нагрузки ФКС.

Вторая ступень в соответствии с [5] выполняется с выдержкой времени 0,6–0,7 с и с областью срабатывания фазовой характеристики от 0 до 100–110° или от 45° до 110°. Вторая ступень является основной в части зоны ТПС1–ПС (рис. 2.13, б) и должна резервировать защиты поста при КЗ на участке ПС–ТПС2. Уставка второй ступени ДНЗ2 на двухпутном участке определяется по выражению

$$z_{сз2} \geq K_ч \cdot z_{кмакс}, \quad (2.4)$$

где  $k_ч$  – коэффициент чувствительности,  $k_ч = 1,5$ ;  $z_{кмакс}$  – максимальное сопротивление, замеряемое защитой фидера подстанции при КЗ на шинах ПС, Ом.

В общем случае можно сказать, что вторая ступень ДЗ должна перекрывать основную зону защиты с коэффициентом чувствительности  $k_ч \geq 1,5$  (рис. 2.13, б). Кроме того, уставка срабатывания второй ступени проверяется по условию отстройки от нагрузочного режима. Если это условие не выполняется, то необходимо применять меры для отстройки второй ступени от режимов нагрузки. Одной из таких мер является применение УХС с диапазоном углов от 45° до 110°.

Третья ступень является резервной для защит ПС при КЗ на участке ПС–ТПС2. Уставка третьей ступени ДНЗ определяется по выражению

$$z_{сз2} \geq K_ч \cdot z_{кмакс}, \quad (2.5)$$

где  $z_{кмакс}$  – максимальное сопротивление, Ом, замеряемое защитой фидера подстанции при КЗ на шинах смежной подстанции в соответствии с рис. 2.13.

При узловой или параллельной схемах питания  $k_ч = 1,25$  (как для резервной зоны).

Для узловой схемы питания подвесок путей

$$Z_{к\max} = Z_{22} \cdot I_1 + 2 \cdot Z_{21} \cdot I_2, \quad (2.6)$$

где  $Z_{22}$  – сопротивление 1 км контактной подвески двухпутного участка при токах в подвесках обоих путей, равных по величине и направлению, Ом/км;  $I_2$  – расстояние от ПС до смежной подстанции, км.

Основным недостатком данной методики является то, что не учитывается наиболее вероятный режим, возникающий при КЗ – подпитка мест повреждений от обеих тяговых подстанций (рис. 2.13, д).

В [18] было исследовано влияние подпитки КЗ от смежной подстанции в петлевой схеме (рис. 2.13, д). Результаты исследований показали, что при КЗ в конце резервируемой зоны, т. е. на шинах ТПС2, сопротивления, измеряемые защитами ТПС1, превышали уставки, определенные по типовой методике. Предложенный в [18] способ определения уставки ДНЗЗ защит фидеров подстанций позволяет учесть параметры режима подпитки и обеспечить требуемую чувствительность к КЗ. Однако исследования проводились только для узловой схемы питания и только для защит фидеров КС тяговых подстанций.

Расчет уставок защит фидеров ТПС и ПС при применении многократного продольного секционирования имеет особенности, часть которых уже была учтена в [5] и тем не менее существует необходимость проведения специальных исследований.

## 2.4. Исследование влияния режимов работы СТЭ на защиты тяговой сети

### 2.4.1. Влияние продольного секционирования на работу защит

Установка на межподстанционной зоне дополнительных ПС приводит к изменению условий функционирования защит. В первую очередь, это требует детального анализа влияния подпитки КЗ на работу защит при нескольких постах на межподстанционной зоне.

Рассмотрим влияние увеличения числа постов секционирования на межподстанционных зонах на работу защит фидеров КС тяговых подстанций (рис. 2.14).

На рис. 2.15 приведены возможные схемы подпитки КЗ применительно к вариантам секционирования контактной сети с одним и тремя ПС, которые учитывались при расчетах.

Напряжение на шинах ТПС или ПС определяется падением напряжения на участке от КЗ до места установки защиты:

– для схемы на рис. 2.15, а:

$$U'_{тпс1} = 2f_1 \cdot 0,5 \cdot Z_{22} I'_1 + (2f_1 + f_2) Z_{21} \cdot I'_2 - f_2 \cdot Z_m I'_2 + (2f_1 + f_2) R_n, \quad (2.7)$$

где  $l'_1, l'_2$  – длины участков в соответствии с расчетными схемами, км;  
 $R_n$  – переходное сопротивление в месте КЗ, Ом;  $z_m$  – сопротивление взаимной индукции между подвесками путей, Ом/км;

– для схемы на рис. 2.15, б:

$$U'_{\text{тпс1}} = 2f'_1 \cdot 0,5 \cdot z_{22} I''_1 + (2f'_1 + f'_2) z_{21} I''_2 - f'_2 \cdot z_m I''_2 + (2f'_1 + f'_2) R_n; \quad (2.8)$$

– для схемы на рис. 2.15, в:

$$U''_{\text{пс2}} = 2f''_1 \cdot 0,5 \cdot z_{22} I'''_3 + (2f''_1 + f''_2) z_{21} I'''_4 - f''_2 \cdot z_m I'''_4 + (2f''_1 + f''_2) R_n. \quad (2.9)$$

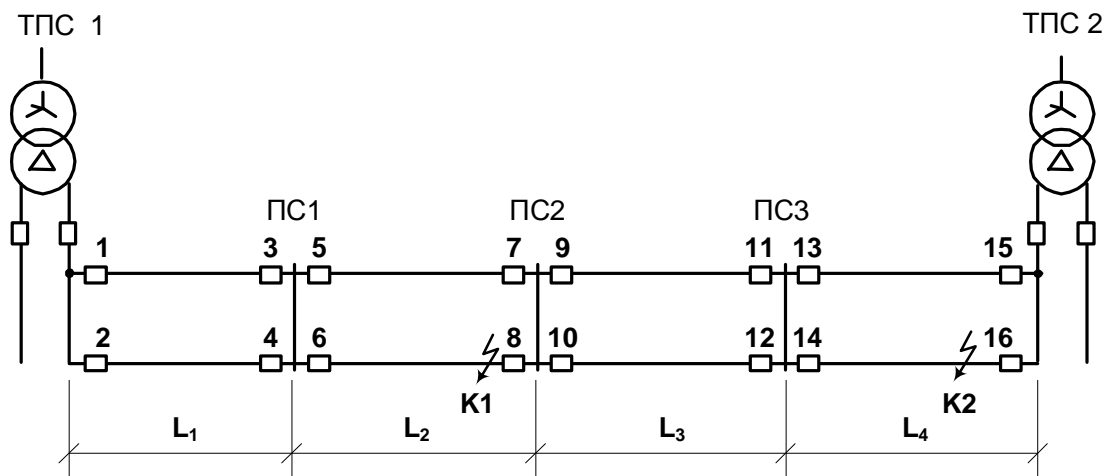


Рис. 2.14. Схема для расчета входных сопротивлений, измеряемых защитами при КЗ

Входное сопротивление, измеряемое защитой, будет определяться по выражениям:

– для схемы на рис. 2.15, а:

$$Z'_{\text{вх1}} = z_{22} \cdot I'_1 + 2z_{21} \cdot I'_2 + 2R_n + \frac{f'_2}{l'_1} (z_{-22} \cdot I'_2 + R_n); \quad (2.10)$$

– для схемы на рис. 2.15, б:

$$Z''_{\text{вх1}} = z_{22} \cdot I''_1 + 2z_{21} \cdot I''_2 + 2R_n + \frac{f''_2}{l''_1} (z_{-22} \cdot I''_2 + R_n); \quad (2.11)$$

– для схемы на рис. 2.15, в:

$$Z'''_{\text{вх9}} = z_{22} \cdot I'''_3 + 2z_{21} \cdot I'''_4 + 2R_n + \frac{f'''_2}{l'''_1} (z_{-22} \cdot I'''_4 + R_n). \quad (2.12)$$



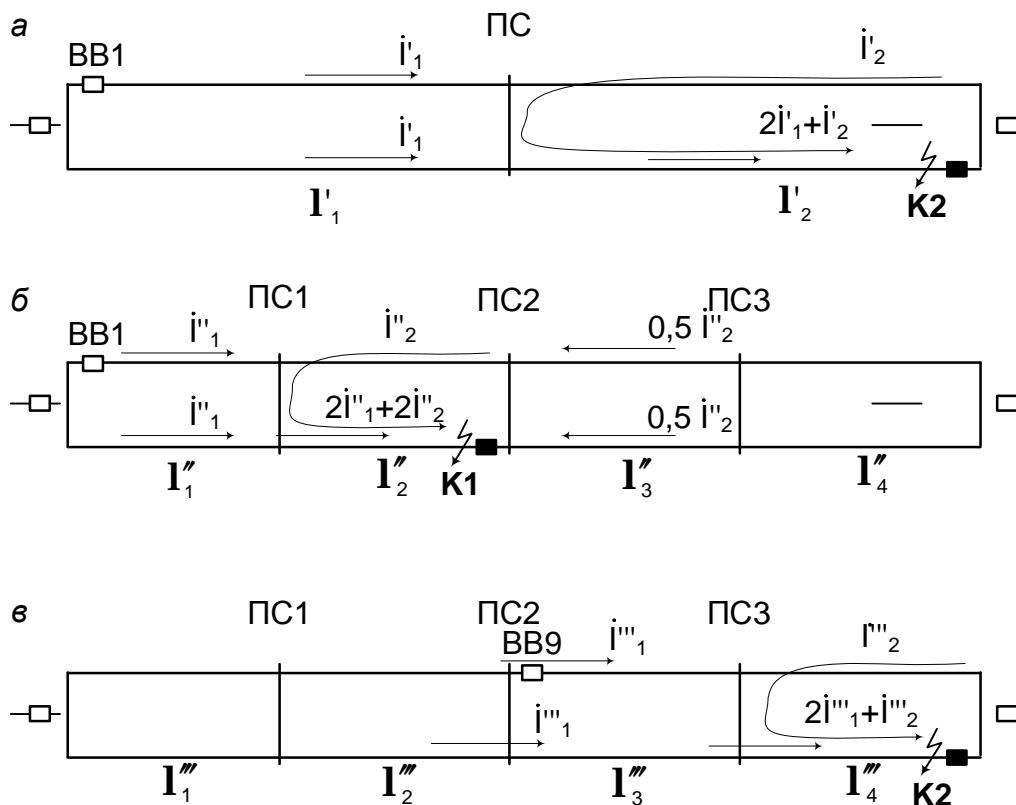


Рис. 2.15. Схемы подпитки КЗ от смежной подстанции:  
 а – схема с одним ПС; б – схема с тремя ПС и КЗ на шинах ПС2;  
 в – схема с тремя ПС и КЗ на шинах смежной подстанции

Анализируя выражения (2.10)–(2.12), можно сказать, что в общем случае входное сопротивление при подпитке повреждения от смежной подстанции определяется:

Ø длиной межподстанционной зоны и местоположением ПС на ней;

Ø расстоянием от ПС до точки КЗ и дополнительным сопротивлением, которое зависит от отношения тока подпитки к току, измеряемому защитой.

Напряжение питающей системы со стороны ТПС1 можно определить по выражениям:

– для схемы на рис. 2.15, а:

$$U_{s1}' = U_{ТПС1}' + 2I_1' \cdot Z_{s1}; \quad (2.13)$$

– для схемы на рис. 2.15, б:

$$U_{s1}'' = U_{ТПС1}'' + 2I_1'' \cdot Z_{s1}; \quad (2.14)$$

для схемы на рис. 2.15, в:

$$U_{s1}''' = I_1'''(2Z_{s1} + Z_{22}(I_1''' + I_2''' + I_3''') + 2Z_{21}I_4''' + 2R_{\Pi}) + I_2'''(Z_{-22}I_4''' + R_{\Pi}). \quad (2.15)$$

Напряжение питающей системы со стороны ТПС2 определяется следующим образом:

– для схемы на рис. 2.15, а:

$$U'_{s2} = f_2 \cdot (z_{s2} + 2z_{-22} I'_2 + R_{\Pi}) + 2f_1 \cdot (z_{-22} I'_2 + R_{\Pi}); \quad (2.16)$$

– для схемы на рис. 2.15, б:

$$U''_{s2} = f_2 (z_{s2} + 0,5 \cdot z_{22} (I''_3 + I''_4) + 2z_{-22} I''_2 + R_{\Pi}) + 2f_1 (z_{-22} I''_2 + R_{\Pi}); \quad (2.17)$$

– для схемы на рис. 2.15, в:

$$U'''_{s2} = f_2 (z_{s2} + 2z_{-22} I'''_4 + R_{\Pi}) + 2f_1 (z_{-22} I'''_4 + R_{\Pi}). \quad (2.18)$$

Учитывая, что тяговые подстанции обычно питаются от источников большой мощности, можно допустить, что напряжения на шинах высокого напряжения ТПС равные и находятся в пределах номинальных значений. Поэтому из выражений (2.13) и (2.16) следует:

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{2z_{s1} + z_{22} I'_1 + 2z_M I'_2}{z_{s2} + z_{-22} I'_2}. \quad (2.19)$$

Из выражений (2.14) и (2.17) следует:

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{2z_{s1} + z_{22} I''_1 + 2z_M I''_2}{z_{s2} + \frac{z_{22}}{2} (I''_3 + I''_4) + z_{-22} I''_2}. \quad (2.20)$$

Из выражений (2.15) и (2.18) следует:

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{2z_{s1} + z_{22} (I'''_1 + I'''_2 + I'''_3) + 2z_M I'''_4}{z_{s2} + z_{-22} I'''_4}. \quad (2.21)$$

Проанализировав выражения (2.19)–(2.21), можно записать обобщенное выражение для определения величины отношения тока подпитки к току, измеряемому защитой при КЗ для схемы с несколькими постами:

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{2z_{s1} + z_{22} I_I + 2z_M I_{III}}{z_{s2} + \frac{z_{22}}{2} I_{II} + z_{-22} I_{III}}, \quad (2.22)$$

где  $I_I$  – расстояние от ТПС1 до шин ПС, на котором происходит суммирование тока подпитки и тока КЗ, км (рис. 2.16);  $I_{II}$  – расстояние от ТПС2 до шин ПС, вблизи которого произошло КЗ, км;  $I_{III}$  – длина зоны (между ПС), на которой произошло КЗ, км.

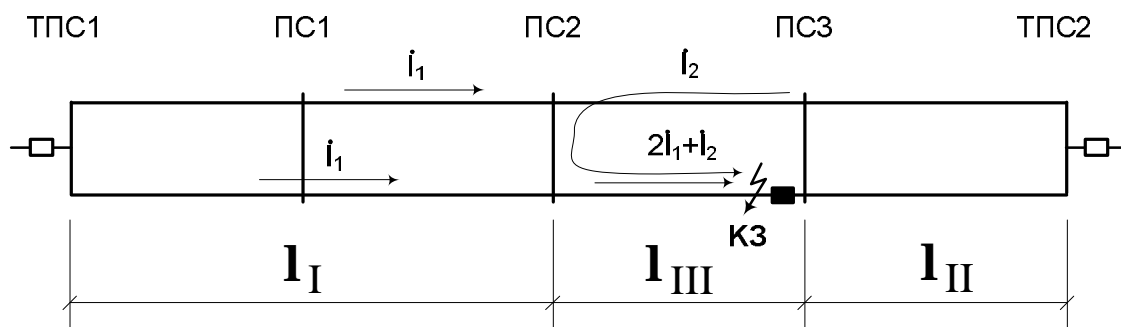


Рис. 2.16. Поясняющая схема к формуле (2.22)

По данным, предоставленным проектной организацией ОАО «Дальгипротранс», погонные сопротивления подвески составляют  $Z_{21} = 0,250$  Ом/км,  $Z_M = 0,064$  Ом/км,  $Z_{22} = 0,314$  Ом/км,  $Z_{-22} = 0,186$  Ом/км.

В табл. 2.4 и на рис. 2.17 приведены результаты расчета по (2.22) для различных длин межподстанционных зон с одним постом секционирования и разных мест его расположения в соответствии со схемой на рис. 2.15, а.

Таблица 2.4

**Значения модуля отношения  $I_2/I_1$  при различном положении ПС на межподстанционной зоне**

$I_1/I_2$	Значение $ I_2/I_1 $ при длине зоны, км					
	50	60	70	80	90	100
0,5	1,766	1,743	1,724	1,711	1,697	1,684
0,75	1,988	1,986	1,985	1,984	1,983	1,982
1,0	2,183	2,201	2,215	2,228	2,238	2,248
1,5	2,5	2,556	2,604	2,626	2,682	2,714
2,0	2,746	2,84	2,922	2,987	3,051	3,109

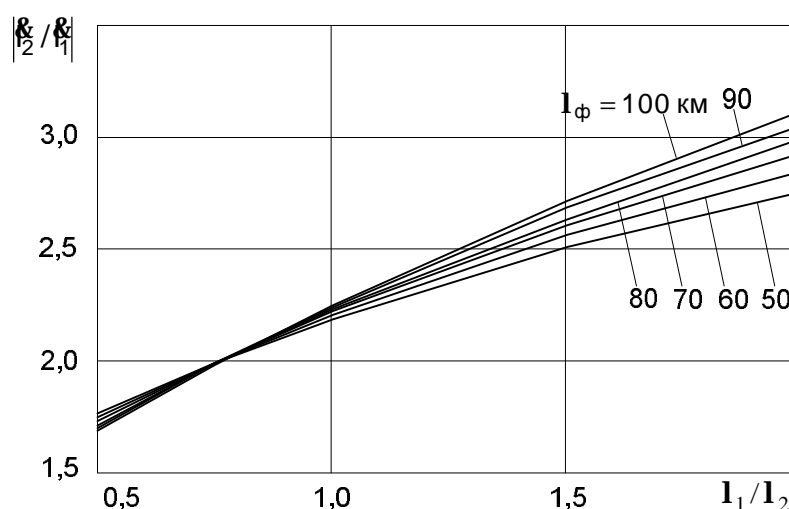


Рис. 2.17. Зависимость отношения токов  $|I_2/I_1|$  от различного расположения ПС в узловой схеме для межподстанционных зон разной длины

В табл. 2.5 и на рис. 2.18 приведены результаты расчета значений  $|I_2/I_1|$  в схеме с тремя постами секционирования (рис. 2.15, б).

Таблица 2.5

**Значения модуля отношения  $I_2/I_1$  при различном положении ПС1 на межподстанционной зоне с тремя постами**

$I_1/I_2$	Значение $ I_2/I_1 $ при длине зоны, км		
	80	90	100
0,5	1,117	1,084	1,055
0,75	1,210	1,179	1,150
1,0	1,286	1,256	1,230
1,5	1,400	1,373	1,350
2,0	1,484	1,459	1,437

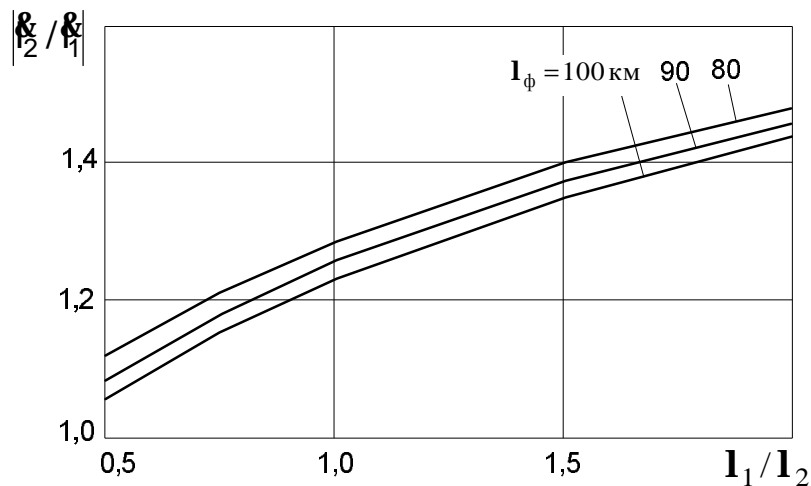


Рис. 2.18. Зависимость отношения токов  $I_2/I_1$  от различного расположения ПС1 в схеме с тремя постами для фидерных зон разной длины

По результатам расчета видно, что величина отношения тока подпитки к току КЗ, измеряемого защитой  $|I_2/I_1|$ , зависит только от параметров питающей энергосистемы, трансформаторов и расстояний  $I_I$ ,  $I_{II}$  и  $I_{III}$  (которые определяются количеством и положением ПС) и практически не зависит от длины межподстанционной зоны.

В дополнение к этому нужно сказать, что при анализе работы защиты какого-либо фидера КС, наибольшее внимание следует уделять именно КЗ, возникающим в конце резервируемой зоны. Это связано с тем, что повреждение в основной зоне защита выявит даже в случае подпитки, поскольку измеряться защитой будет суммарный ток КЗ и подпитки. Таким образом, подпитка со стороны смежной ТПС не будет оказывать влияния на работу РЗ при КЗ в основной зоне. В этом случае гораздо большее

влияние будет оказывать наличие переходного сопротивления в месте КЗ. Напротив, при КЗ в конце резервируемой зоны входное сопротивление станет больше на величину, зависящую от отношения тока подпитки и тока, измеряемого защитой, что в случае отказа основной защиты может привести к отказу также и резервной.

Для оценки влияния на условия функционирования защит многократного продольного секционирования проведены расчеты по определению входных сопротивлений, измеряемых защитой фидера КС на ТПС1 при КЗ в различных точках межподстанционной зоны для различных вариантов секционирования КС. Все расчеты проведены с учетом параметров подвески с ЭУП. В табл. 2.6 приведены результаты расчета для схемы с одним ПС на межподстанционной зоне. Различное положение ПС на межподстанционной зоне при проведении расчетов задавалось отношением  $I_1/I_2$  в соответствии с рис. 2.15, а. На рис. 2.19 результаты расчета входных сопротивлений, измеряемых защитами фидеров подстанций при КЗ, и уставок ДНЗЗ представлены в графической форме.

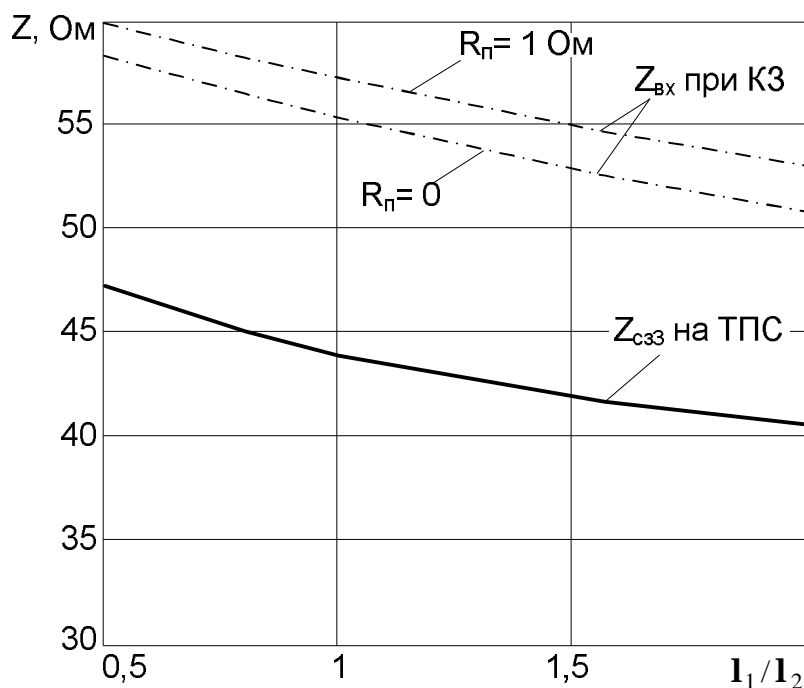


Рис. 2.19. Входные сопротивления, измеряемые защитой ТПС1 при КЗ в точке К2 (рис. 2.15, а) и уставки ДНЗЗ при различных соотношениях  $I_1/I_2$

На рис. 2.20 приведены графики приращения сопротивления, измеряемого защитами ТПС1, при подпитке КЗ от смежной подстанции и различных  $R_p$ , в процентах от уставки ДНЗЗ ( $\Delta Z$ ). Приращения входных сопротивлений в расчетной схеме на рис. 2.15 составляют 32,5÷35 % от уставки ДНЗЗ. Причем наличие переходного сопротивления в месте КЗ ве-

личной 1 Ом при значении  $I_1/I_2 \geq 1$  приводит к увеличению сопротивлений, измеряемых защитами ТПС, еще на 1÷1,5 %.

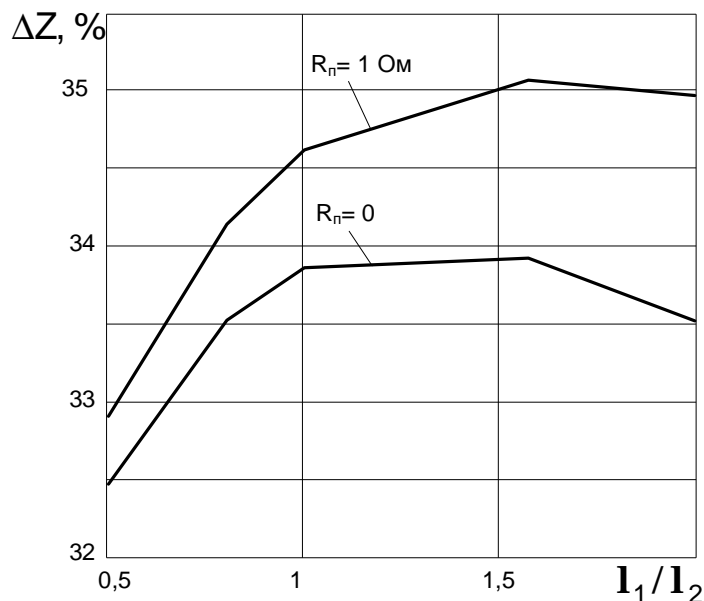


Рис. 2.20. Приращение сопротивления, измеряемого защитами ТПС1, при КЗ в точке К2 (рис. 2.15, а) при различных соотношениях  $I_1/I_2$

В табл. 2.7 и на рис. 2.21 приведены результаты расчетов входных сопротивлений, измеряемых защитами фидеров на ТПС1, и значений уставок защит при установке на зоне трех ПС и повреждении вблизи шин ПС2 (в соответствии с рис. 2.15, б).

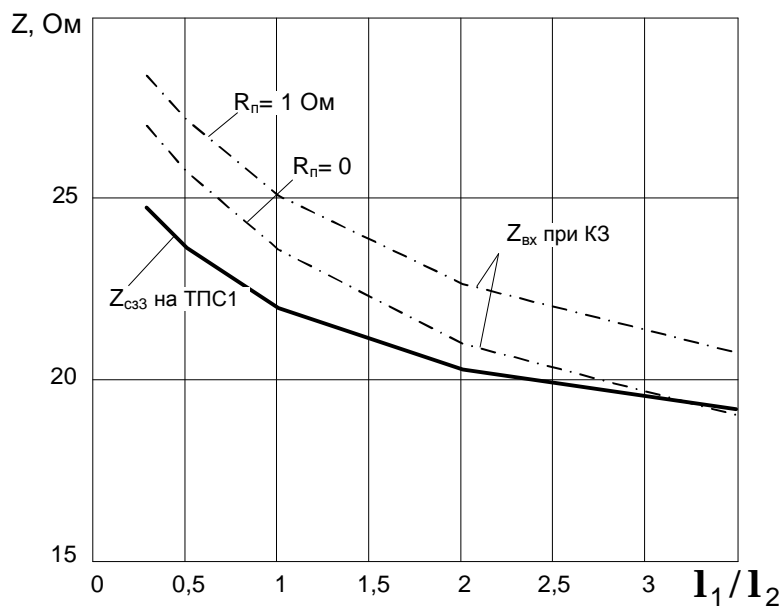


Рис. 2.21. Входные сопротивления защит ТПС1 при КЗ в точке К1 (рис. 2.15, б) при различных соотношениях  $I_1/I_2$

**Входные сопротивления, измеряемые защитами ТПС1  
при КЗ у шин смежной подстанции, при различном положении ПС**

Расстояние, км	Подпитка	Входное сопротивление, измеряемое РЗ ТПС1, и отношения токов $I_2/I_1$ при различных вариантах схем секционирования, Ом					
		ПС без защит			ПС с защитами		
		$R_n=0$	$R_n=1$	$I_2/I_1$	$R_n=0$	$R_n=1$	$I_2/I_1$
$l_1 = 30$ $l_2 = 60$	<b>Нет</b>	$39,4 e^{j66,7}$	$40,2 e^{j64,1}$	–	$39,4 e^{j66,7}$	$40,2 e^{j64,1}$	–
	<b>рис. 2.15, а</b>	$58,3 e^{j67,3}$	$60 e^{j64,1}$	1,70	$58,3 e^{j67,3}$	$60 e^{j64,1}$	1,70
	<b>Уставка ДНЗЗ</b>	59,1			47,3		
$l_1 = 45$ $l_2 = 45$	<b>Нет</b>	$37,5 e^{j66,8}$	$38,4 e^{j64}$	–	$37,5 e^{j66,8}$	$38,4 e^{j64}$	–
	<b>рис. 2.15, а</b>	$56,5 e^{j66,9}$	$58,3 e^{j63,3}$	2,04	$56,5 e^{j66,9}$	$58,3 e^{j63,3}$	2,04
	<b>Уставка ДНЗЗ</b>	56,3			45,0		
$l_1 = 45$ $l_2 = 45$	<b>Нет</b>	$36,6 e^{j66,8}$	$37,4 e^{j64}$	–	$36,6 e^{j66,8}$	$37,4 e^{j64}$	–
	<b>рис. 2.15, а</b>	$55,4 e^{j66,7}$	$57,2 e^{j62,8}$	2,24	$55,4 e^{j66,7}$	$57,2 e^{j62,8}$	2,24
	<b>Уставка ДНЗЗ</b>	54,9			43,9		
$l_1 = 45$ $l_2 = 45$	<b>Нет</b>	$34,8 e^{j67}$	$35,6 e^{j64}$	–	$34,8 e^{j67}$	$35,6 e^{j64}$	–
	<b>рис. 2.15, а</b>	$52,6 e^{j66,2}$	$54,7 e^{j61,6}$	2,74	$52,6 e^{j66,2}$	$54,7 e^{j61,6}$	2,74
	<b>Уставка ДНЗЗ</b>	52,1			41,7		
$l_1 = 60$ $l_2 = 30$	<b>Нет</b>	$33,8 e^{j67}$	$34,7 e^{j64}$	–	$33,8 e^{j67}$	$34,7 e^{j64}$	–
	<b>рис. 2.15, а</b>	$50,8 e^{j65,9}$	$53,1 e^{j60,9}$	3,05	$50,8 e^{j65,9}$	$53,1 e^{j60,9}$	3,05
	<b>Уставка ДНЗЗ</b>	50,7			40,6		

Таблица 2.7

**Входные сопротивления, измеряемые защитами ТПС1  
при КЗ у шин ПС2 для различного положения ПС1**

Расстояние, км	Подпитка	Входное сопротивление, измеряемое РЗ ТПС1, Ом		Отношение токов $ I_2/I_1 $
		$R_n=0$	$R_n=1$	
$I_1 = 10,0$ $I_2 = 35,0$ $I_3 = 22,5$ $I_4 = 22,5$	Нет	$20,6 e^{j66,6}$	$21,5 e^{j61,7}$	–
	рис. 2.15, б	$27,0 e^{j67,8}$	$28,4 e^{j62,3}$	0,98
	Уставка ДНЗЗ	24,8		–
	$\Delta Z, \text{ Ом } (\%)$	$6,4 e^{j71,6}$ (23,7)	$6,9 e^{j64,2}$ (24,3)	–
$I_1 = 15,0$ $I_2 = 30,0$ $I_3 = 22,5$ $I_4 = 22,5$	Нет	$19,7 e^{j66,7}$	$20,6 e^{j61,6}$	–
	рис. 2.15, б	$25,7 e^{j67,6}$	$27,2 e^{j61,7}$	1,08
	Уставка ДНЗЗ	23,6		–
	$\Delta Z, \text{ Ом } (\%)$	$6,0 e^{j70,6}$ (23,5)	$6,6 e^{j62,1}$ (24,3)	–
$I_1 = 22,5$ $I_2 = 22,5$ $I_3 = 22,5$ $I_4 = 22,5$	Нет	$18,3 e^{j66,8}$	$19,2 e^{j61,3}$	–
	рис. 2.15, б	$23,6 e^{j67,4}$	$25,1 e^{j60,6}$	1,26
	Уставка ДНЗЗ	22,0		–
	$\Delta Z, \text{ Ом } (\%)$	$5,3 e^{j69,2}$ (22,3)	$5,9 e^{j58,1}$ (23,6)	–
$I_1 = 30,0$ $I_2 = 15,0$ $I_3 = 22,5$ $I_4 = 22,5$	Нет	$16,9 e^{j67}$	$17,8 e^{j61,1}$	–
	рис. 2.15, б	$21,0 e^{j67,2}$	$22,6 e^{j59,1}$	1,46
	Уставка ДНЗЗ	20,3		–
	$\Delta Z, \text{ Ом } (\%)$	$4,1 e^{j67,7}$ (19,4)	$4,9 e^{j52}$ (21,6)	–
$I_1 = 35,0$ $I_2 = 10,0$ $I_3 = 22,5$ $I_4 = 22,5$	Нет	$16,0 e^{j67,2}$	$16,9 e^{j60,9}$	–
	рис. 2.15, б	$19,0 e^{j67,1}$	$20,7 e^{j57,9}$	1,62
	Уставка ДНЗЗ	19,2		–
	$\Delta Z, \text{ Ом } (\%)$	$3,0 e^{j66,7}$ (15,8)	$4,0 e^{j45,2}$ (19,2)	–

На рис. 2.22 показано, что при наличии на зоне трех постов величина добавочного сопротивления (при условии  $I_1 \leq I_2$ ) составляет около 22÷24 % от значений уставок ДНЗЗ, а при условии  $I_1 > I_2$  снижается до 16 %. Таким образом, чем больше  $I_1$ , тем меньше влияние подпитки на работу защит фидеров ТПС1. При этом обратное действие будет оказываться на защиту ПС2, действующую в направлении ТПС1.

Результаты параметров аварийного режима показали, что при определении уставок защит фидеров по типовой методике [5] требуемая чувствительность к КЗ в резервируемой зоне не обеспечивается.



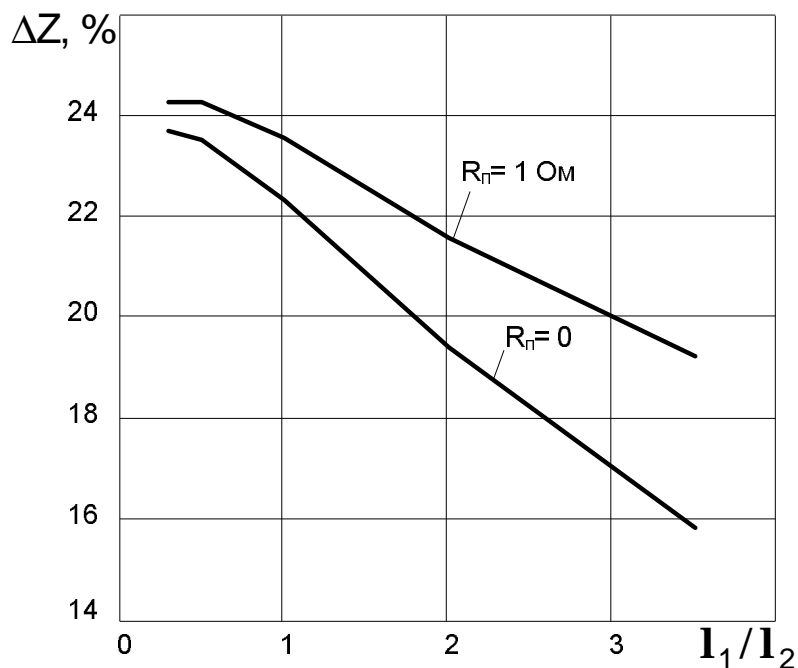


Рис. 2.22. Приращение сопротивления, измеряемого защитами ТПС1, при КЗ у шин ПС2 (рис. 2.15, б), при различном отношении  $I_1/I_2$

Из вышесказанного можно сделать следующие выводы:

Ø необходимо разработать методику, позволяющую независимо от количества на межподстанционной зоне ПС, рассчитывать уставки третьих ступеней ДЗ с учетом параметров подпитки КЗ от смежной подстанции;

Ø методика расчета должна быть универсальной и позволять рассчитывать уставки защит фидеров не только на тяговых подстанциях, но и на постах секционирования.

#### 2.4.2. Оценка влияния переходных сопротивлений в месте КЗ и формы УХС на ложные срабатывания защит

В [11] было показано, что наиболее полно предъявляемым к защите контактной сети требованиям отвечает комплект типа АЗ. Отличием УХС комплекта АЗ от УЭЗФМ, использовавшемся на сети дорог переменного тока много лет, является расширение верхней границы второй и третьей ступени ДЗ. Как указывалось выше, расширение границ УХС вызвано необходимостью защиты от КЗ при перекрытии нейтральной вставки. Этот режим подробно изучен в [6, 39]. Поэтому проанализируем работу защиты типа АЗ при другом виде повреждения – КЗ «за спиной». На рис. 2.23 приведена расчетная схема для расчета токов и входных сопротивлений, измеряемых защитой 1 при КЗ на ФКС № 2.

В соответствии с принципом селективности защита 1 не должна реагировать на КЗ на соседнем ФКС, вблизи установки защиты (рис. 2.23). Поэтому такое КЗ является для защиты 1 замыканием «за спиной». Первая

ступень защиты 1 будет блокироваться с помощью органа токовой блокировки. Поэтому, в первую очередь, исследуем работу второй и третьей ступеней ДНЗ защиты 1 (рис. 2.23).

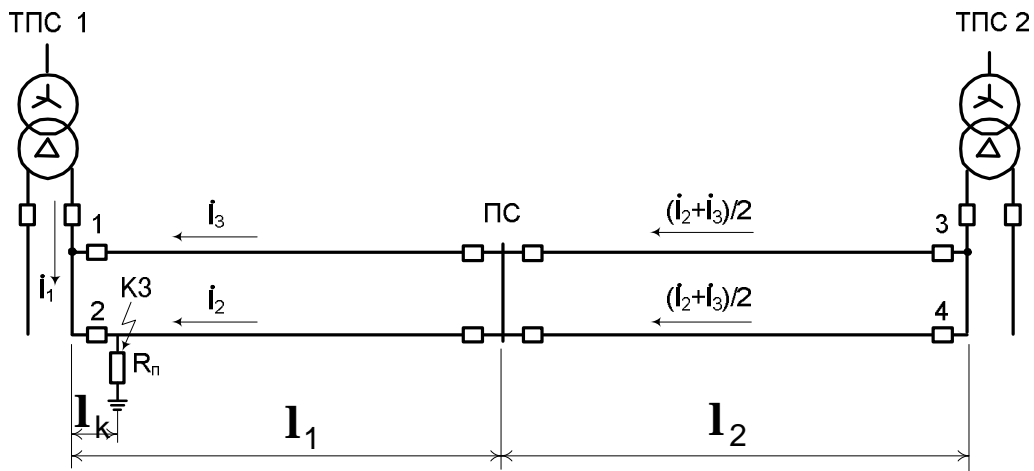


Рис. 2.23. Расчетная схема для определения значений входных сопротивлений защиты при КЗ «за спиной»

Система уравнений для расчета параметров режима КЗ «за спиной» будут выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned}
 U_H &= I_1 Z_{s1} + (I_1 + I_3) Z_{21} I_k - I_3 Z_M I_k + (I_1 + I_2 + I_3) R_n; \\
 U_H &= (I_2 + I_3) Z_{s2} + (I_2 + I_3) \frac{Z_{22}}{2} I_2 + I_2 Z_{21} (I_1 - I_k) + \\
 &+ I_3 Z_M (I_1 - I_k) + (I_1 + I_2 + I_3) R_n; \\
 U_H &= (I_2 + I_3) Z_{s2} + (I_2 + I_3) \frac{Z_{22}}{2} I_2 + I_3 Z_{21} I_1 + I_2 Z_M (I_1 - I_k) - \\
 &- (I_1 + I_3) Z_M I_k + (I_1 + I_3) Z_{21} I_k - I_3 Z_M I_k + (I_1 + I_2 + I_3) R_n.
 \end{aligned} \tag{2.23}$$

Значения токов можно определить при помощи матричного метода:

$$[I] = [Z]^{-1} \cdot [U_H], \tag{2.24}$$

где  $[I]$  – матрица токов;  $[U_H]$  – матрица напряжений;  $[Z]$  – матрица сопротивлений.

Матрица сопротивлений выглядит следующим образом:

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{s1} + Z_{21} I_k + R_n & R_n & Z_{-22} I_k + R_n \\ R_n & Z_{s2} + \frac{Z_{22}}{2} I_2 + Z_{21} (I_1 - I_k) + R_n & \frac{Z_{22}}{2} I_2 + Z_M (I_1 - I_k) + R_n \\ Z_{-22} I_k + R_n & Z_{s2} + \frac{Z_{22}}{2} I_2 + Z_M (I_1 - I_k) + R_n & Z_{s2} + \frac{Z_{22}}{2} I_2 + Z_{21} I_1 + Z_{-22} I_k + R_n \end{bmatrix} \tag{2.25}$$

Напряжение на шинах распределительного устройства 27,5 кВ ТПС1 можно определить по выражению

$$U_1 = (f_1 + f_3)Z_{21}I_k - f_3Z_M I_k + (f_1 + f_2 + f_3)R_n. \quad (2.26)$$

Тогда сопротивление, измеряемое защитой 1 при КЗ:

$$Z_{вх1} = \frac{U_1}{I_3}. \quad (2.27)$$

Результаты расчетов токов, напряжений и входных сопротивлений защиты 1, соответствующие схеме на рис. 2.23, приведены в табл. 2.8 для различных значений переходного сопротивления и различной удаленности точки КЗ от шин ТПС1.

Таблица 2.8

**Расчет параметров при КЗ в соответствии со схемой на рис. 2.21**

Параметры	R <sub>п</sub> , Ом	Расстояние до точки КЗ I <sub>к</sub> , км	
		I <sub>к</sub> = 0 км	I <sub>к</sub> = 3 км
I <sub>1</sub> , А	0	4943,3e <sup>-j84,1</sup>	4331,1e <sup>-j82,0</sup>
	1	4660,5e <sup>-j71,5</sup>	4088,9e <sup>-j70,7</sup>
	2	4238,6e <sup>-j60,7</sup>	3751,2e <sup>-j60,9</sup>
	3	3785,4e <sup>-j51,9</sup>	3389,0e <sup>-j52,9</sup>
I <sub>2</sub> , А	0	765,8e <sup>-j72,6</sup>	961,2e <sup>-j73,6</sup>
	1	722,0e <sup>-j60,0</sup>	907,4e <sup>-j62,3</sup>
	2	656,6e <sup>-j49,2</sup>	832,5e <sup>-j52,5</sup>
	3	586,4e <sup>-j40,4</sup>	752,1e <sup>-j44,5</sup>
I <sub>3</sub> , А	0	765,8e <sup>-j72,6</sup>	530,0e <sup>-j68,8</sup>
	1	722,0e <sup>-j60,0</sup>	500,4e <sup>-j57,5</sup>
	2	656,6e <sup>-j49,2</sup>	4590e <sup>-j47,7</sup>
	3	586,4e <sup>-j40,4</sup>	414,7e <sup>-j39,7</sup>
U <sub>1</sub> , В	0	0e <sup>j0</sup>	3537,4e <sup>-j14,7</sup>
	1	6082,2e <sup>-j68,8</sup>	7535,0e <sup>-j44,5</sup>
	2	11063,2e <sup>-j58,0</sup>	11692,8e <sup>-j44,7</sup>
	3	14820,5e <sup>-j49,2</sup>	15014,5e <sup>-j40,7</sup>
Z <sub>вх1</sub> , Ом	0	0e <sup>j0</sup>	6,7e <sup>-j125,9</sup>
	1	8,4e <sup>j171,2</sup>	15,1e <sup>-j167,0</sup>
	2	16,8e <sup>j171,2</sup>	25,5e <sup>-j176,9</sup>
	3	25,3e <sup>j171,2</sup>	36,2e <sup>j179,0</sup>

Графическое представление результатов расчета приведено на рис. 2.24.

Результаты расчетов, приведенные в табл. 2.8, показывают, что при наличии в месте КЗ переходного сопротивления величиной  $1 \div 2$  Ом и незначительной удаленности точки КЗ от шин ТПС1 (до 2 км), входные сопротивления защиты 1 близки к  $170^\circ$ , верхней границе срабатывания УХС ДНЗ3 (рис. 2.24).

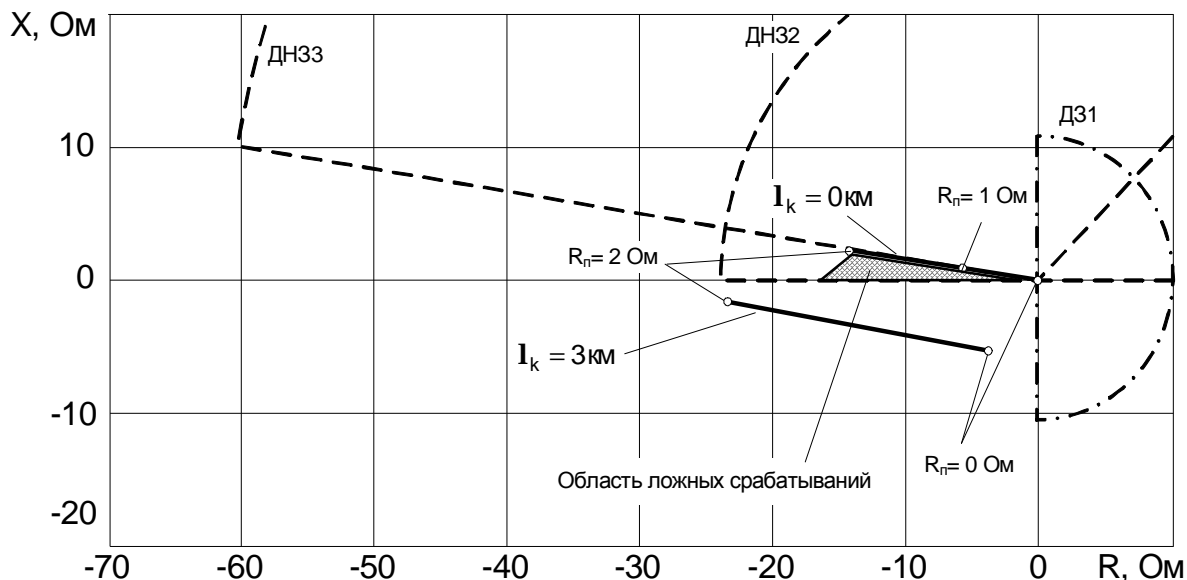


Рис. 2.24. Траектории конца вектора сопротивления, измеряемого защитой №1 при КЗ «за спиной» через переходные сопротивления различной величины

Анализ позволяет сделать следующий вывод: при расположении точки КЗ непосредственно вблизи шин подстанции на ФКС 2 и значении  $R_{п}$  до 3 Ом, входное сопротивление защиты 1 находится в зоне действия второй степени ДНЗ, как показано на рис. 2.24. Это говорит о возможном появлении ложных срабатываний ДНЗ2 и ДНЗ3 у защит типа АЗ с рассматриваемой УХС. Поскольку любое КЗ, как правило, сопровождается дугой, имеющей небольшое активное сопротивление, подобный режим возможен.

Следовательно, расширение УХС второй и третьей ступеней у защит типа АЗ приводит к повышению вероятности ложных срабатываний защит при КЗ через переходное сопротивление на соседнем фидере подстанции.

## 2.5. Исследование влияния параметров нормального режима на работу защит

Система тягового электроснабжения характеризуется множеством параметров как аварийного, так и нормального режимов работы. Учет всех параметров аварийного режима обеспечивает требуемую чувствительность к КЗ. Учет максимального количества параметров нормального режима позволит обеспечить надежную отстройку защит от нагрузки и исключит ложные сра-

батывания. В соответствии с [5, 31] основными параметрами нормального режима для защит будут являться токи нагрузок фидеров тяговых подстанций и постов секционирования межподстанционной зоны. Однако при этом не учитываются возможность рекуперативного торможения, перегрузочная способность трансформаторов, типы контактной подвески, остаточная нагрузка и др. Для защит ФКС постов секционирования не менее важно количество ПС на межподстанционной зоне, поскольку это непосредственно влияет на ток фидера ПС. Сложность одновременного учета всех параметров режимов работы СТЭ и отсутствие методик, позволяющих это сделать, вызывает необходимость проведения исследований влияния нагрузочных режимов на работу защит.

Рассмотрим порядок расчета нагрузок ФКС с учетом факторов, влияющих на неё. Расчетную величину максимального тока фидера подстанции можно определить по [5, 6]:

$$I_{\text{нmax}} = I_{\text{тр}} + I_{\text{ср}} \frac{n_{\text{э}} - 1}{k}, \quad (2.28)$$

где  $I_{\text{тр}}$  – ток трогания электровоза, А;  $I_{\text{ср}}$  – средний ток грузового поезда расчетной массы, А;  $n_{\text{э}}$  – общее число поездов, находящееся на данном пути, шт.;  $k$  – коэффициент, зависящий от числа путей,  $k=1$  при одностороннем питании;  $k = 2$  при двустороннем питании контактной сети.

$$n_{\text{э}} = \frac{t_x}{\Theta_0}, \quad (2.29)$$

где  $\Theta_0$  – минимальный интервал попутного следования, мин.;  $t_x$  – время хода поезда по расчетной зоне, мин.

Расчет максимально возможного количества поездов произведен для межподстанционных зон длиной 60, 70, 80, 90 и 100 км с минимальным интервалом попутного следования 8, 10 и 12 мин и средней скоростью движения поездов 60, 70 и 80 км/ч. К примеру, для межподстанционной зоны протяженностью 100 км, при средней скорости движения 75 км/ч и интервале попутного следования 12 мин получаем

$$n_{\text{э}100} = \frac{80}{12} = 6,7 \text{ шт.}$$

В соответствии с [5, 6] округляем полученное значение в большую сторону и принимаем  $n_{\text{э}} = 7$  шт.

Величина тока трогания принималась в соответствии с [5]. Средний ток грузового поезда расчетной массы для участков переменного профиля пути без горных участков может быть определен исходя из опытных поездов

или по количеству энергии затраченной поездом за все время хода по зоне [25, 26, 27]:

$$I_{\text{ср}} = \frac{A}{U \cdot t_x}, \quad (2.30)$$

где  $A$  – энергия, затраченная поездом за время  $t_x$  (определяется из проектных тяговых расчетов), кВт·ч;  $U$  – напряжение на токоприемнике ЭПС, кВ.

В случае отсутствия тяговых расчетов и данных по расходу энергии, для определения максимального нагрузочного тока можно руководствоваться одно- трехминутным допустимым током контактной подвески. При этом необходимо учитывать допустимую перегрузочную способность трансформаторов тяговой подстанции.

К примеру, при значении среднего тока поезда  $I_{\text{ср}} = 300$  А (из данных опытных поездок поездов массой 6000 т по межподстанционным зонам участка СТЭ Бикин–Сибирцево ДВостЖД) ток фидера подстанции для зоны 100 км в соответствии с (2.28) имеет вид:

$$I_{\text{нmax} 100} = 604 + 300 \frac{7-1}{2} = 1504 \text{ А.}$$

Расчетную величину максимального тока фидера поста секционирования при узловой или параллельной схемах питания можно определить по формуле [5]:

$$I_{\text{нmax ПС}} = [I_{\text{тр}} + K I_{\text{ср}} (n_{\text{э}} - 1)] \left( \frac{m-1}{m} + \frac{I_{\text{ПС-ТПС2}}}{l \cdot m} \right), \quad (2.31)$$

где  $m$  – количество путей;  $K$  – коэффициент, учитывающий количество ПС на межподстанционной зоне:  $K = 0,5$  при одном ПС,  $K = 0,67$  при двух ПС,  $K = 0,75$  при трех ПС и  $K = 0,8$  при четырех ПС;  $l$  – длина межподстанционной зоны;  $I_{\text{ПС-ТПС2}}$  – расстояние от ПС до смежной тяговой подстанции.

Число поездов  $n_{\text{э}}$  вычисляется по формуле (2.29). Для зоны 100 км при узловой схеме питания ток фидера ПС следующий:

$$I_{\text{нmax ПС}} = [604 + 0,5 \cdot 300 (7 - 1)] \left( \frac{2-1}{2} + \frac{50}{100 \cdot 2} \right) = 1128 \text{ А.}$$

Результаты расчета по формулам (2.28)–(2.31) для различных длин межподстанционных зон приведены в табл. 2.9.

Таблица 2.9

**Параметры расчета максимальной нагрузки для фидеров подстанций и постов межподстанционных зон различной длины**

Параметры	Длина фидерных зон, км				
	100	90	80	70	60
$n_{\text{э}}$ , шт.	7	7	6	5	4

$I_{H \max}, A$	1504	1504	1354	1204	1204
$I_{H \max} \text{ ПС}, A$	1128	1128	1016	903	791

Минимальные сопротивления, измеряемые защитами фидеров тяговых подстанций, определяется по [5, 6]:

$$Z_{H \min} = \frac{U_{\min}}{I_{H \max}}, \quad (2.32)$$

где  $U_{\min}$  – напряжение на шинах тяговой подстанции в соответствии с [5, 31] принимается равным 25 кВ.

При наличии на межподстанционных зонах условий для осуществления рекуперативного торможения (профиль пути и наличие ЭПС, способного осуществлять рекуперативное торможение) необходимо учитывать всевозможное сочетание режимов тяги, рекуперации и одновременное нахождение на зоне тяговых и рекуперирующих электровозов.

В соответствии с исследованиями, проведенными в [25, 26, 27], интенсивность РТ характеризуется коэффициентом рекуперации  $k_p$ , значение которого обычно не превышает 0,3. Если вся энергия рекуперации будет потребляться электровозами, находящимися на той же межподстанционной зоне, то через защиты подстанций ток рекуперации протекать не будет, а потечет через защиты постов секционирования. Влияние на защиты фидеров КС подстанций будет оказывать избыточная рекуперативная энергия электровозов, находящихся на соседней зоне, в том случае, если тяговых электровозов недостаточно для ее полного потребления. С учетом возможного неравномерного распределения энергии, вырабатываемой рекуперирующими электровозами, максимальную долю тока рекуперации, влияющей на защиту фидера подстанции можно считать примерно равной 0,2. При этом суммарный ток смешанного режима (одновременное присутствие на зоне тяговых и рекуперирующих электровозов) можно определить путем геометрического сложения векторов тока рекуперации и тока тяги.

При расчетах учитывалась остаточная нагрузка при удаленных КЗ. Остаточная нагрузка определяется удаленностью точки КЗ и напряжением срабатывания защит ЭПС. Напряжение срабатывания защит ЭПС принимают равным 17 кВ [34]. При этом из [16, 37] известно, что при удаленных КЗ остаточная нагрузка не превышает 30 % нагрузки доаварийного режима. Следовательно, максимальное значение тока ЭПС в аварийном режиме будет составлять не более  $0,3I_{H \max}$ . Суммарный ток при наличии остаточной нагрузки определяется геометрической суммой векторов тока КЗ и тока ЭПС, оставшегося в рабочем режиме.

Сопротивления, измеряемые защитами фидеров подстанции и поста в нагрузочном режиме, для межподстанционной зоны 100 км построены на комплексной плоскости и приведены на рис. 2.25.

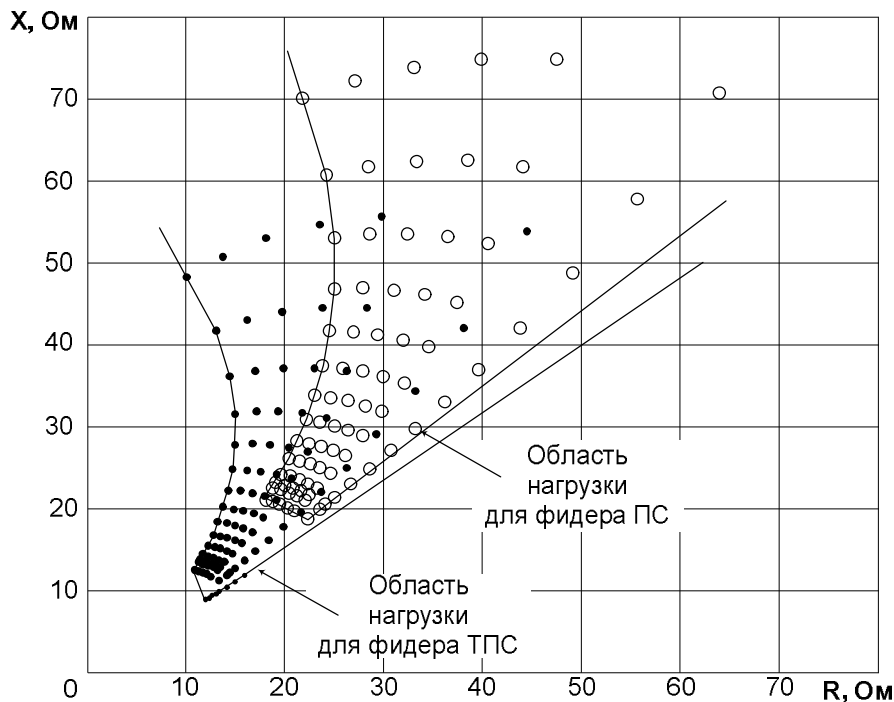


Рис. 2.25. Расчетные области нагрузки фидеров подстанции и поста секционирования для зоны протяженностью 100 км с узловой схемой питания и подвески с ЭУП

Величины сопротивлений по (2.32), измеряемых защитами фидеров тяговых подстанций и постов секционирования в нагрузочном режиме, рассчитывались с учетом всего диапазона изменения токов тяги и рекуперации.

Оценить работу защит удобно рассматривая одновременно параметры как аварийного режима, в котором защита должна работать, так и нормального, к которому защита должна быть нечувствительна. На первом этапе расчета предположим, что на межподстанционной зоне устанавливается один пост секционирования. Области КЗ для межподстанционной зоны длиной 100 км при различном положении ПС (рис. 2.26) приведены на рис. 2.27.

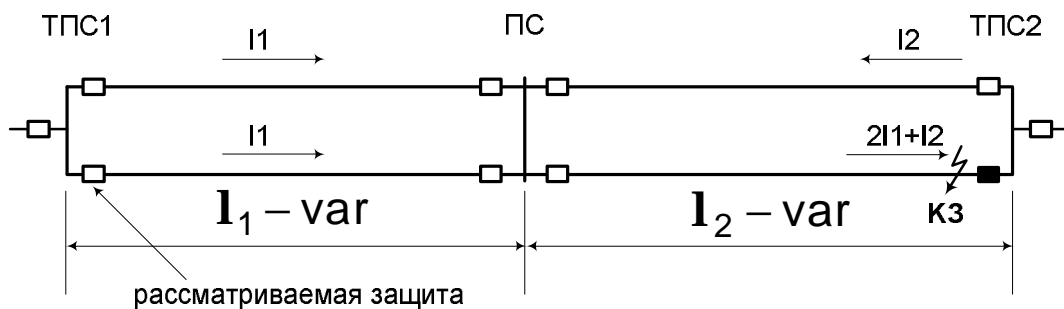


Рис. 2.26. Расчетная схема определения количественных характеристик КЗ в узловой схеме питания



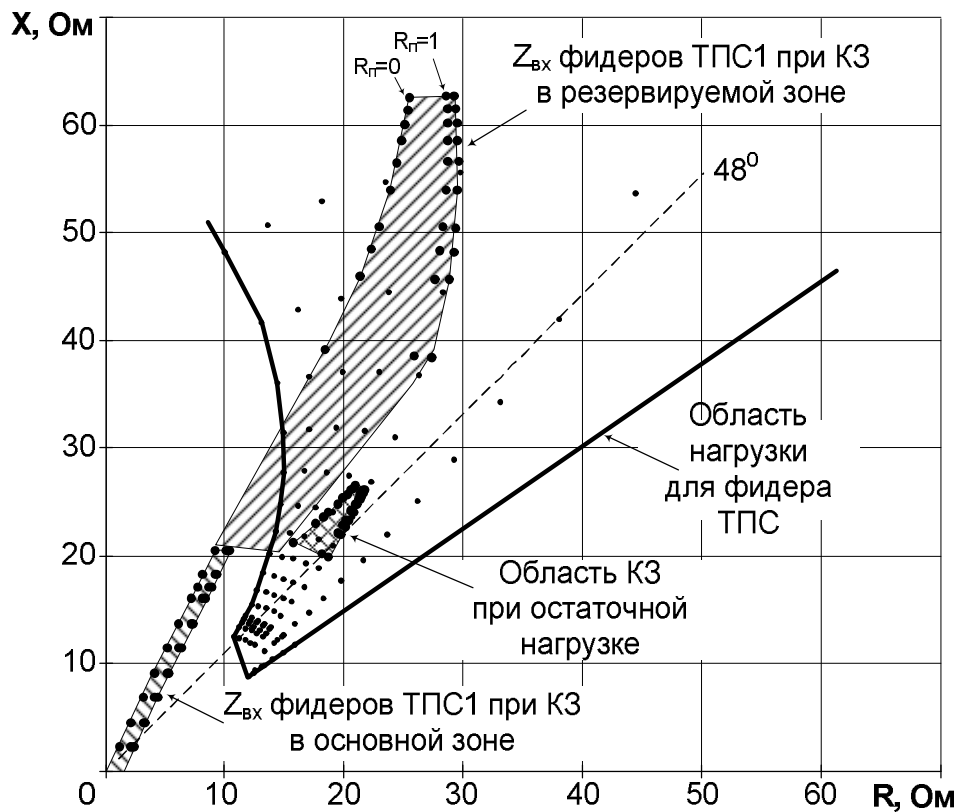


Рис. 2.27. Области КЗ для фидеров ТПС1 при протяженности зоны 100 км при различном положении ПС (рис. 2.24)

Как видно из рис. 2.27, входные сопротивления защит фидеров ТПС1 при КЗ у шин смежной подстанции в соответствии с рис. 2.26, попадают в область нагрузок. Следовательно, обеспечить защиту КС, надежно отстроенную от нагрузки, межподстанционной зоны протяженностью 100 км с одним ПС, практически невозможно.

В этом случае необходима установка нескольких ПС, что приведет к многократному продольному секционированию КС межподстанционной зоны. Здесь можно ввести понятие протяженных межподстанционных зон – зон, при длине которых обеспечение защиты от аварийных режимов со всеми предъявляемыми требованиями невозможно при наличии только одного поста секционирования.

На рис. 2.29 приведены области входных сопротивлений защит ФКС подстанции при установке на межподстанционной зоне длиной 100 км двух ПС в соответствии с расчетной схемой, приведенной на рис. 2.28. Для первичного анализа расстановка постов секционирования на межподстанционной зоне была произведена с одинаковыми расстояниями между ними.

Из рис. 2.29 видно, что сопротивления, измеряемые защитой фидера подстанции при КЗ в конце резервируемой зоны, т. е. на шинах ПС2 в соответствии с рис. 2.28, также попадают в область нагрузок. Следова-

но, при наличии на зоне двух ПС, отстроить защиту от нагрузочной области также невозможно.

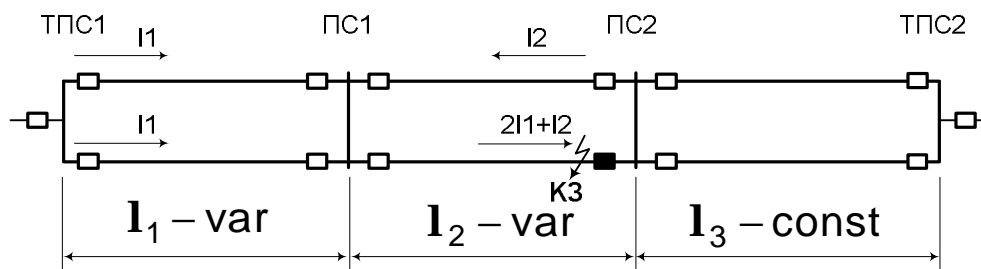


Рис. 2.28. Расчетная схема определения количественных характеристик КЗ при двух постах на межподстанционной зоне

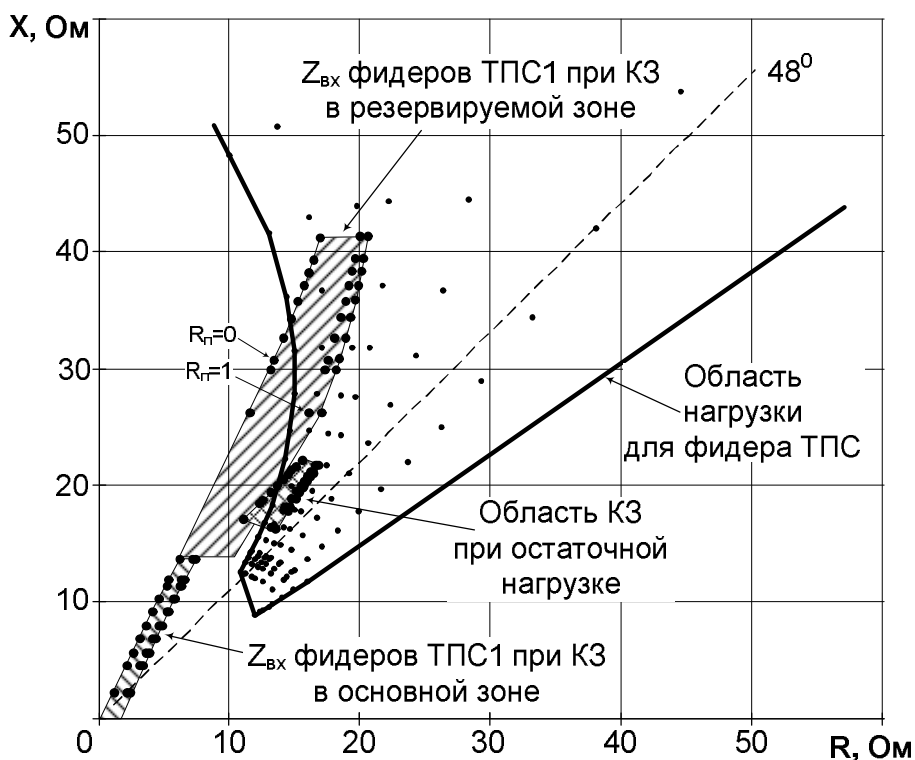


Рис. 2.29. Области сопротивлений, измеряемых защитами фидеров подстанций, в нормальном и аварийном режимах при установке на межподстанционной зоне длиной 100 км двух ПС

На рис. 2.31 расчетные параметры показаны при наличии на зоне трех ПС. Расчетная схема тяговой сети при установке на зоне трех постов секционирования приведена на рис. 2.30.

На рис. 2.33 расчетные параметры показаны при наличии на зоне четырех ПС. Расчетная схема тяговой сети при установке на зоне четырех постов секционирования приведена на рис. 2.32.

На рис. 2.27, 2.29, 2.31 и 2.33 области КЗ построены для изменения положения ближайшего поста секционирования (ПС1), поскольку при ана-

лизе работы защит фидеров ТПС1 нас интересовало только соотношение длин основной и резервной зоны защиты.

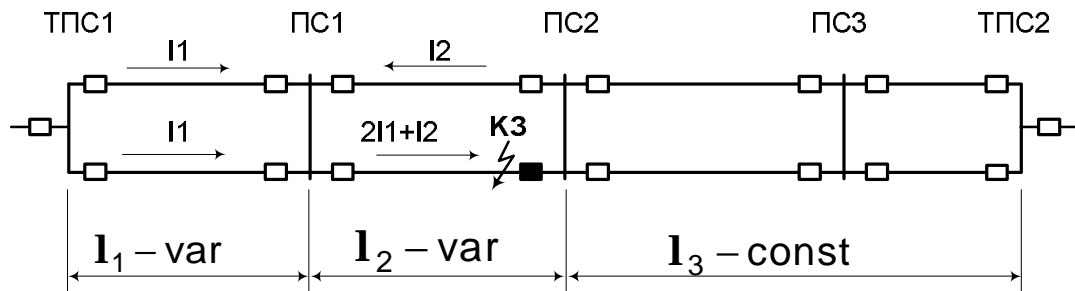


Рис. 2.30. Расчетная схема определения количественных характеристик КЗ при трех постах на межподстанционной зоне и изменяющемся положении ПС1

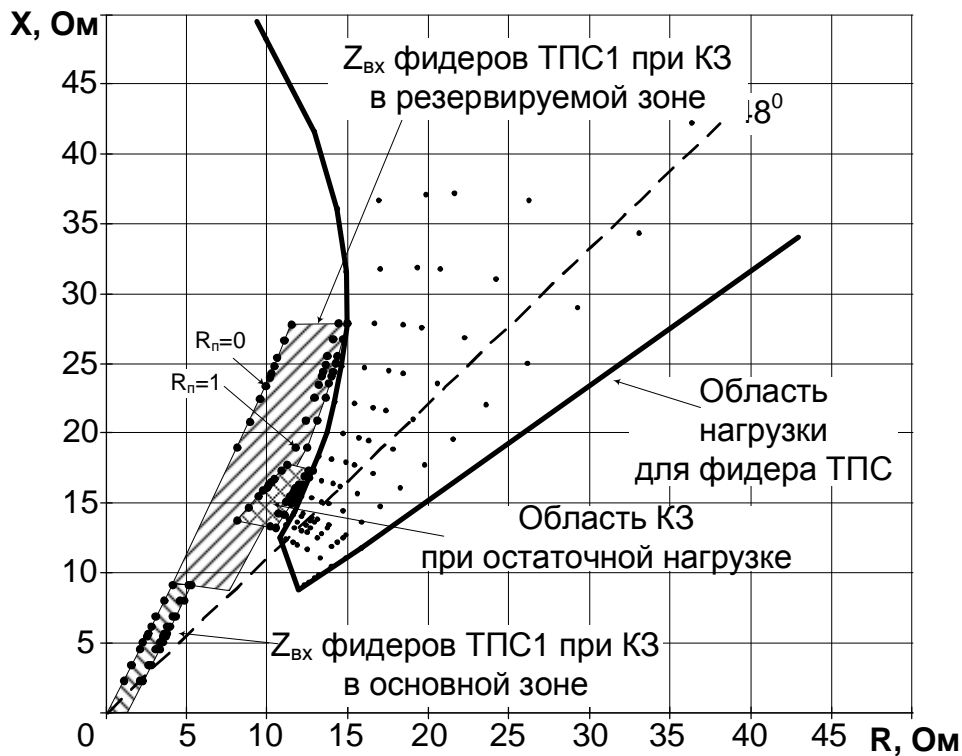


Рис. 2.31. Области сопротивлений, измеряемых защитами фидеров подстанций, в нормальном и аварийном режимах при установке на межподстанционной зоне длиной 100 км трех ПС

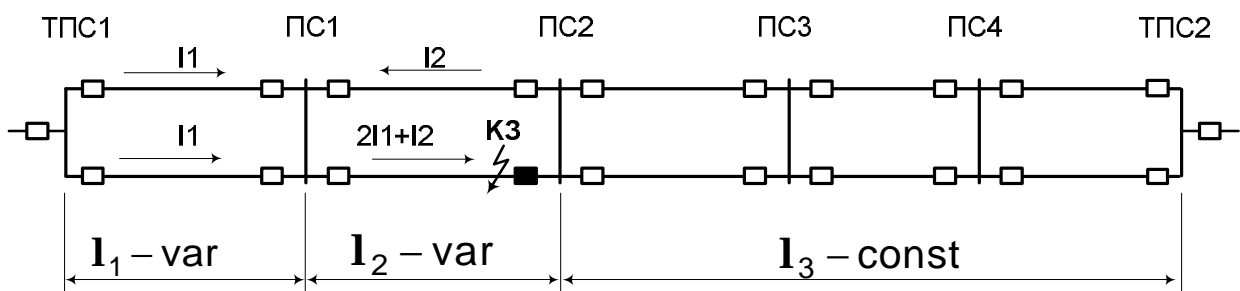


Рис. 2.32. Расчетная схема определения количественных характеристик КЗ при четырех постах на межподстанционной зоне и изменяющемся положении ПС1

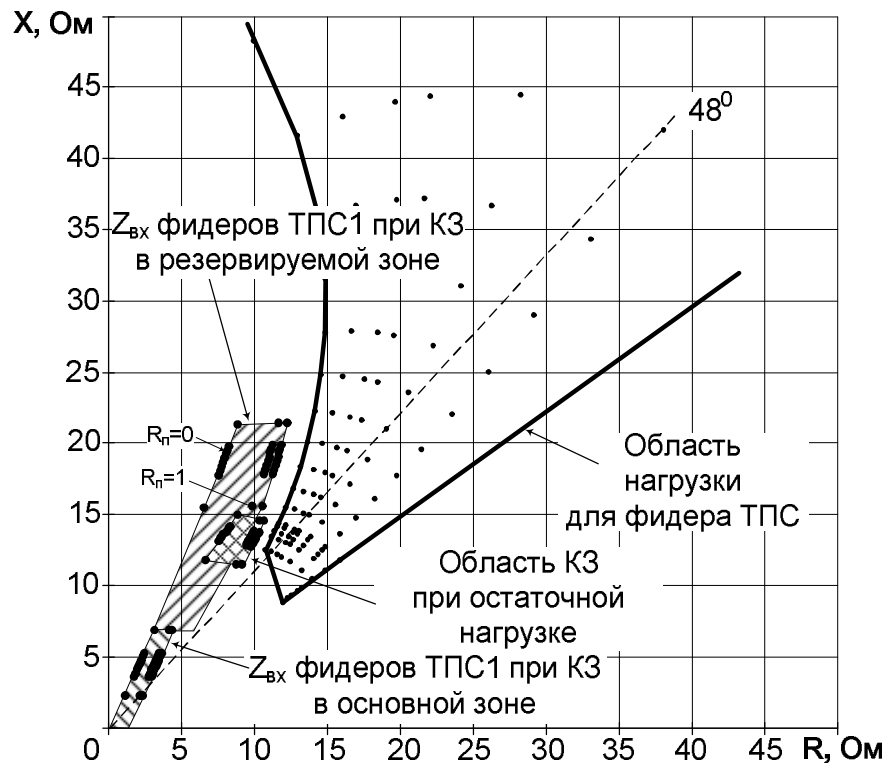


Рис. 2.33. Области сопротивлений, измеряемых защитами фидеров подстанций, в нормальном и аварийном режимах при установке на межподстанционной зоне длиной 100 км четырех ПС

Анализ областей аварийного и нагрузочного режимов показал, что только при наличии на межподстанционной зоне протяженностью 100 км четырех постов секционирования защита отвечает требованию чувствительности при отсутствии дуги в месте короткого замыкания.

При наличии в месте КЗ переходного сопротивления величиной более 0,5 Ом отстроится от области нагрузки с требуемым коэффициентом запаса не представляется возможным.

Таким образом, как следует из проведенных расчетов, при учете большинства параметров нормального режима отстройка защит от нагрузочной характеристики значительно усложняется. Однако введение дополнительных постов секционирования позволяет без снижения чувствительности защит повысить надежность их отстройки от нагрузочной области.

Из рис. 2.27–2.33 видно, что нижняя граница УХС третьей степени типовых комплектов защиты фидеров подстанции (равная 45–48°) будет стабильно захватывать область нагрузки. В такой ситуации для надежной отстройки защит от области нагрузки потребуется изменение нижней границы третьей степени ДНЗ фидеров КС. Это свидетельствует о необходимости формирования новых УХС ступеней защит фидеров контактной сети.

Зависимости модулей входных сопротивлений защит в нормальном и аварийном режимах от их аргумента для межподстанционной зоны 100 км и установке трех и четырех ПС соответственно представлены на рис. 2.34 и 2.35.

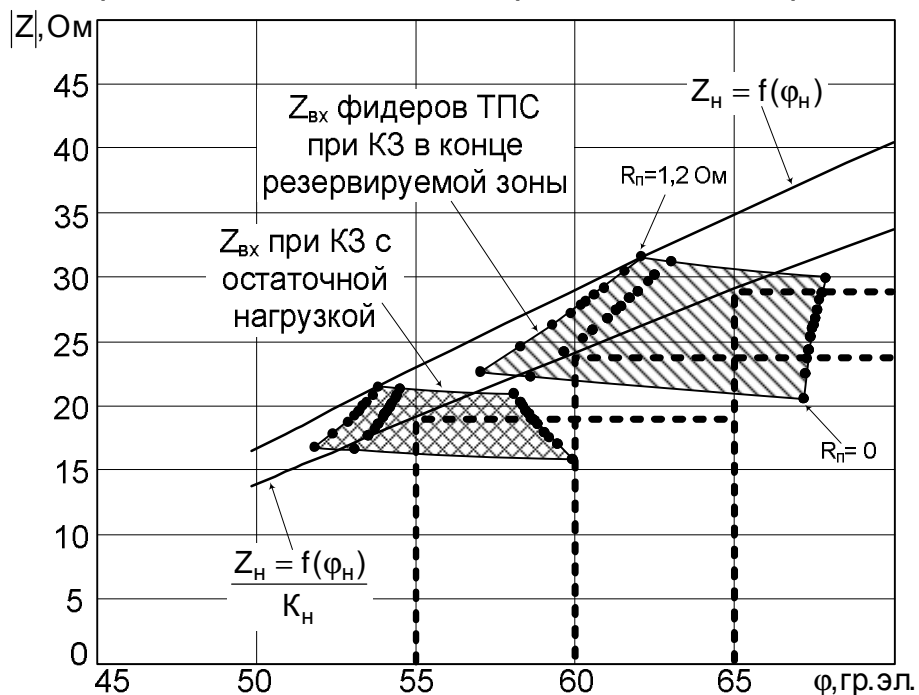


Рис. 2.34. Зависимости модуля входного сопротивления защит ТПС от их аргумента при длине зоны 100 км и трех ПС

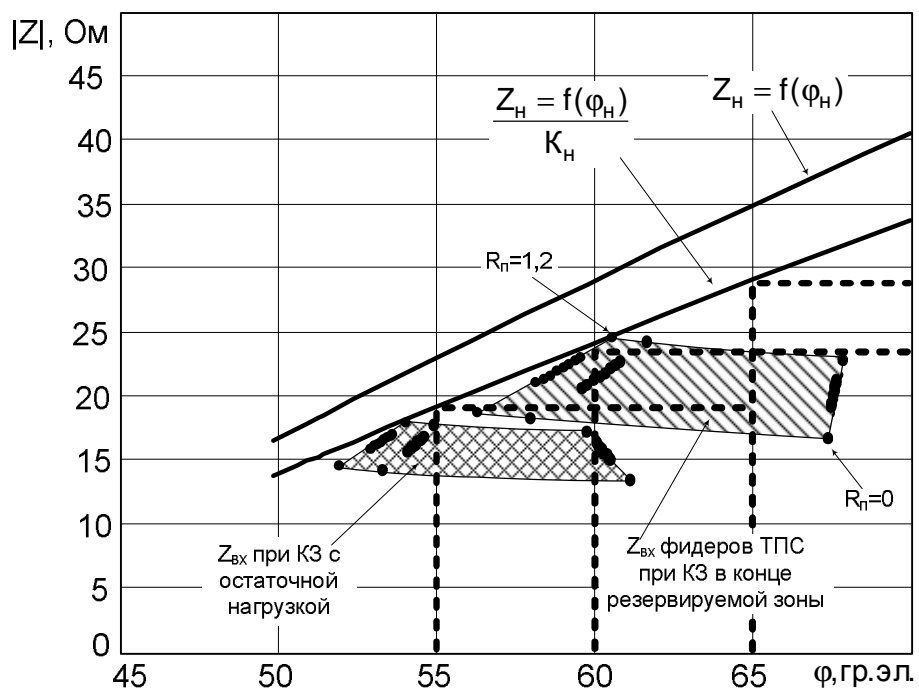


Рис. 2.35. Зависимости модуля входного сопротивления защит ТПС от их аргумента при длине зоны 100 км и четырех ПС

Из рис. 2.35 видно, что для отстройки третьей ступени ДНЗ от области нагрузок и надежного захвата только области КЗ за ПС, для межподстанционной зоны длиной 100 км, необходимо отстроить границы секторной УХС по углам от  $65$  до  $70^\circ$  с уставкой около 26–28 Ом. При этом большая часть области КЗ при переходных сопротивлениях до 1,2 Ом (в том числе при наличии остаточной нагрузки) в зону срабатывания защиты не попадает. Даже при наличии на зоне четырех ПС часть входных сопротивлений области КЗ (в самых тяжелых случаях – переходное сопротивление более 1 Ом и большая остаточная нагрузка) совпадают с областью нагрузочного режима. Защитить контактную сеть от таких режимов практически невозможно.

Следовательно, существующие комплекты защит фидеров тяговых сетей с типовыми настройками не способны обеспечить надежную защиту контактной сети фидерных зон длиной 80–100 км. На межподстанционных зонах, имеющих многократное продольное секционирование, возможно использование защит с составной характеристикой ДЗ и дающих возможность выставлять различные уставки при разных углах настройки ступеней.

Одним из возможных вариантов улучшения условий отстройки третьей ступени ДНЗ защит фидеров подстанций является составление ее из нескольких секторных характеристик, имеющих узкие УХС со своими определенными уставками (рис. 2.36). При этом нижняя граница УХС секторного типа не должна быть менее  $60$ – $65^\circ$ , так как только в этом случае удастся отстроиться от области нагрузок и захватить область КЗ с требуемой чувствительностью.

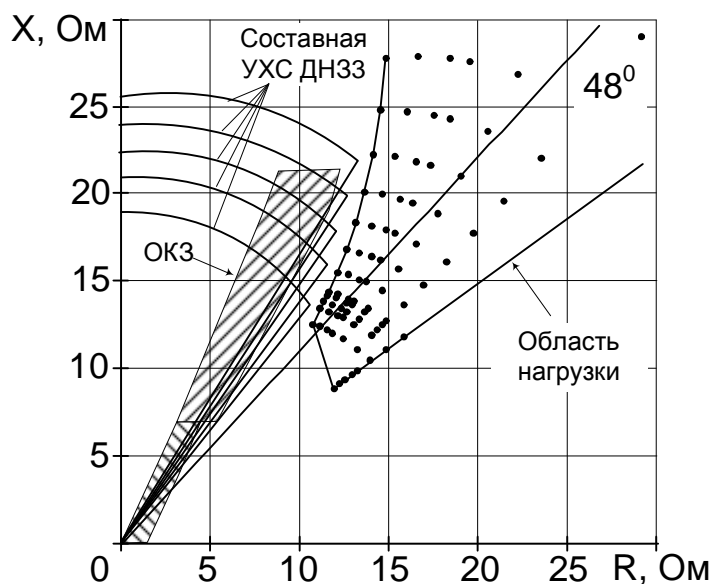


Рис. 2.36. Составная секторная третья ступень ДЗ фидеров КС

В качестве третьей ступени можно также использовать четырехугольную УХС (рис. 2.37).

Оптимальным вариантом может стать использование для ДНЗЗ многоугольной характеристики (рис. 2.38).

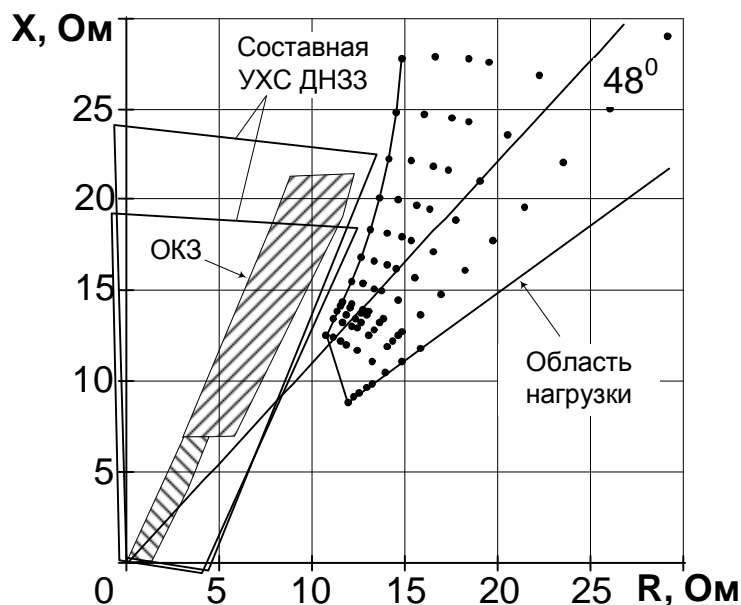


Рис. 2.37. Возможность использования четырехугольной УХС в качестве третьей ступени ДЗ

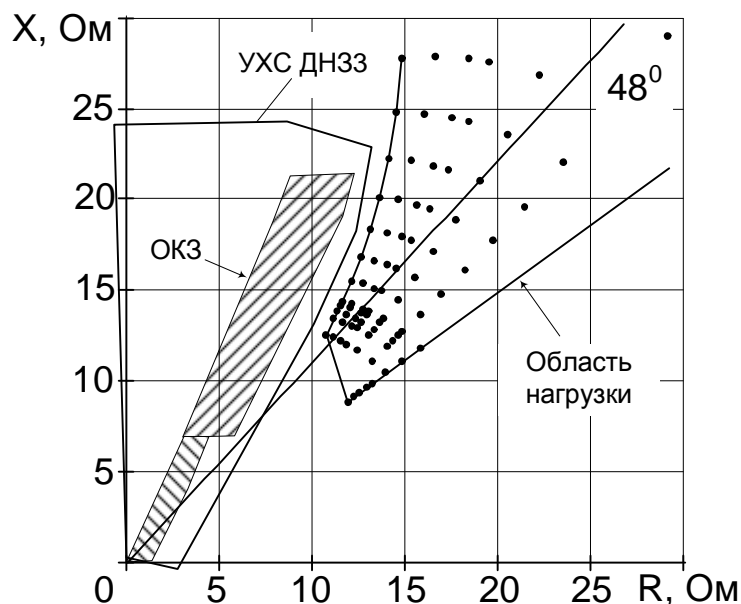


Рис. 2.38. Возможность использования многоугольной УХС в качестве третьей ступени ДЗ

Существующий уровень разработок в области построения УХС защит позволяет создать практическую любую характеристику, что в сумме с рассчитанными граничными условиями отстройки от нагрузочного режима дает воз-

возможность создания характеристики защиты, адаптированной к условиям функционирования на протяженных межподстанционных зонах. Отметим, что зарубежные разработки в области защиты КС переменного тока предполагают использование до 5 ступеней ДЗ на главных магистралях [41]. Однако при отсутствии методики расчета уставок защит, учитывающей все особенности нормального и аварийного режимов, увеличение числа ступеней ДЗ не приведет к существенным улучшениям показателей работы защит. Поэтому, на наш взгляд, целесообразным решением является корректировка методики расчета сопротивлений срабатывания ступеней ДЗ фидеров ТПС и ПС с учетом параметров самых тяжелых условий функционирования защит.

## 2.6. Предложения по корректировке методики расчета защиты контактной сети

Проведенные исследования параметров нормального и аварийного режимов и работы защит позволяют сформулировать дополнительные требования к расчету уставок защит тяговых сетей переменного тока.

Уставка первой ступени определяется в основном условиями отстройки от нагрузочного режима и селективности работы с первой ступенью ДЗ защиты на ПС, поэтому неправильная работа первой ступени ДЗ, как правило, явление редкое. Поэтому можно сказать, что первая ступень, уставка которой рассчитана по типовой методике [5], отвечает всем предъявляемым требованиям. То же можно сказать и про методику расчета ДНЗ2. Как показали проведенные исследования, методика расчета третьей ступени не удовлетворяет всем предъявляемым в соответствии с [5, 31] требованиям. Поэтому возможно рассмотреть варианты уточнения методики определения уставки третьей ступени ДЗ.

Основное выражение для определения сопротивления срабатывания остается прежним [5]:

$$Z_{c33} = K_{ч} \cdot Z_{kmax} \cdot \quad (2.33)$$

В соответствии с предлагаемой методикой,  $Z_{kmax}$ , определяется по следующему выражению:

$$Z_{kmax} = Z_{22} \cdot I_o + 2 \cdot Z_{21} \cdot I_p + \left| \frac{I_2}{I_1} \right| Z_{-22} \cdot I_p, \quad (2.34)$$

где  $I_o$ ,  $I_p$  – длины основной и резервируемой зон защиты соответственно для рассматриваемого комплекта, км.

Отношение величин тока подпитки и тока, измеряемого защитой  $\left| \frac{I_2}{I_1} \right|$ , определяется в соответствии с (2.22).

В табл. 2.10 приведены значения первичных сопротивлений срабатывания третьей ступени ДНЗ фидера, определенные по типовой и предлагаемой ме-



тодикам, а также входные сопротивления защит при КЗ для различного местоположения ПС в схеме с узловым питанием. Длина межподстанционной зоны 90 км. На рис. 2.39 в графическом виде представлены данные табл. 2.10.

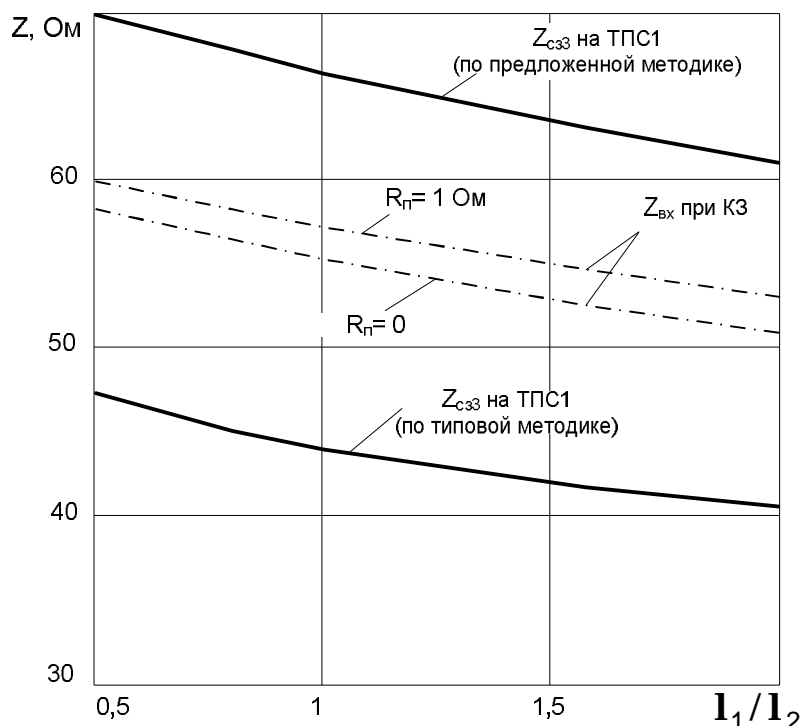


Рис. 2.39. Первичные сопротивления срабатывания третьей ступени ДЗ на ТПС1 и входные сопротивления защит при различном положении ПС в узловой схеме питания

Таблица 2.10

**Результаты расчета первичных сопротивлений срабатывания ДНЗЗ по предлагаемой методике при узловой схеме питания**

Расстояние, км	Подпитка	Входное сопротивление, измеряемое РЗ ТПС1, Ом		Отношение токов
		$R_n = 0$	$R_n = 1$	
$l_1 = 30$ $l_2 = 60$	рис. 2.15, а	$58,3 e^{j67,3}$	$60 e^{j64,1}$	1,70
	<b>Zсз3 (типовая методика), Ом</b>	47,3		—
	Zсз3, Ом (новая методика)	<b>70,0</b>		—
$l_1 = 45$ $l_2 = 45$	рис. 2.15, а	$56,5 e^{j66,9}$	$58,3 e^{j63,3}$	2,04
	<b>Zсз3 (типовая методика), Ом</b>	45,0		—
	Zсз3, Ом (новая методика)	<b>67,8</b>		—
$l_1 = 45$ $l_2 = 45$	рис. 2.15, а	$55,4 e^{j66,7}$	$57,2 e^{j62,8}$	2,24
	<b>Zсз3 (типовая методика), Ом</b>	43,9		—
	Zсз3, Ом (новая методика)	<b>66,4</b>		—
$l_1 = 45$ $l_2 = 45$	рис. 2.15, а	$52,6 e^{j66,2}$	$54,7 e^{j61,6}$	2,74
	<b>Zсз3 (типовая методика), Ом</b>	41,7		—
	Zсз3, Ом (новая методика)	<b>63,1</b>		—
$l_1 = 60$	рис. 2.15, а	$50,8 e^{j65,9}$	$53,1 e^{j60,9}$	3,05

	<b>Zсз3 (типовая методика), Ом</b>	40,6	–
	Zсз3, Ом (новая методика)	<b>61,0</b>	–

В табл. 2.11 представлены результаты расчета уставок ДНЗЗ в соответствии с типовой и предлагаемой методиками для межподстанционной зоны протяженностью 90 км с тремя постами секционирования при различном положении ПС1 (рис. 2.15, б). По результатам расчета построены зависимости, приведенные на рис. 2.40.

Таблица 2.11

**Результаты расчета первичных сопротивлений срабатывания ДНЗЗ по предлагаемой методике при установке трех ПС на зоне**

Расстояние, км	Подпитка	Входное сопротивление, измеряемое РЗ ТПС1 при различных R <sub>п</sub> , Ом		Отношение токов I <sub>2</sub> /I <sub>1</sub>
		R <sub>п</sub> = 0	R <sub>п</sub> = 1	
I <sub>1</sub> = 10,0 I <sub>2</sub> = 35,0 I <sub>3</sub> = 22,5 I <sub>4</sub> = 22,5	рис. 2.15, б	27,0 e <sup>l 67,8</sup>	28,4 e <sup>l 62,3</sup>	0,98
	<b>Zсз3 (типовая методика), Ом</b>	24,8		–
	Zсз3, Ом (предложенная методика)	<b>32,4</b>		–
I <sub>1</sub> = 15,0 I <sub>2</sub> = 30,0 I <sub>3</sub> = 22,5 I <sub>4</sub> = 22,5	рис. 2.15, б	25,7 e <sup>l 67,6</sup>	27,2 e <sup>l 61,7</sup>	1,08
	<b>Zсз3 (типовая методика), Ом</b>	23,6		–
	Zсз3, Ом (предложенная методика)	<b>30,9</b>		–
I <sub>1</sub> = 22,5 I <sub>2</sub> = 22,5 I <sub>3</sub> = 22,5 I <sub>4</sub> = 22,5	рис. 2.15, б	23,6 e <sup>l 67,4</sup>	25,1 e <sup>l 60,6</sup>	1,26
	<b>Zсз3 (типовая методика), Ом</b>	22,0		–
	Zсз3, Ом (предложенная методика)	<b>28,3</b>		–
I <sub>1</sub> = 30,0 I <sub>2</sub> = 15,0 I <sub>3</sub> = 22,5 I <sub>4</sub> = 22,5	рис. 2.15, б	21,0 e <sup>l 67,2</sup>	22,6 e <sup>l 59,1</sup>	1,46
	<b>Zсз3 (типовая методика), Ом</b>	20,3		–
	Zсз3, Ом (предложенная методика)	<b>25,2</b>		–
I <sub>1</sub> = 35,0 I <sub>2</sub> = 10,0 I <sub>3</sub> = 22,5 I <sub>4</sub> = 22,5	рис. 2.15, б	19,0 e <sup>l 67,1</sup>	20,7 e <sup>l 57,9</sup>	1,62
	<b>Zсз3 (типовая методика), Ом</b>	19,2		–
	Zсз3, Ом (предложенная методика)	<b>22,8</b>		–

Результаты расчетов показывают, что при определении уставок ДНЗЗ в соответствии с предложенной методикой защита реагирует на КЗ в конце резервируемой зоны с требуемым коэффициентом чувствительности. Такая работа защит ТПС позволяет обеспечить надежное резервирование защит ПС при КЗ на всей протяженности резервируемой зоны.

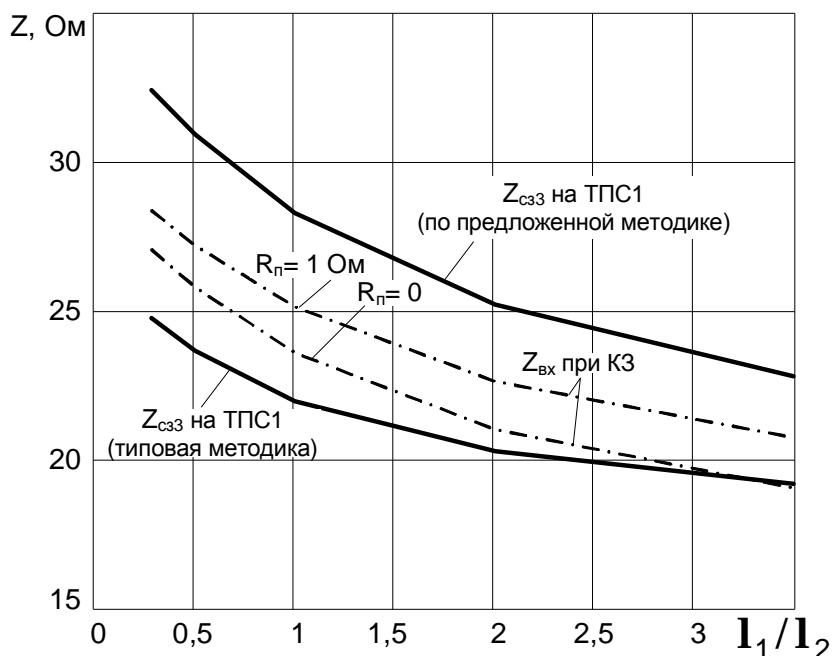


Рис. 2.40. Первичные сопротивления срабатывания третьей ступени ДЗ на ТПС1 и входные сопротивления защит при различном положении ПС1

Как видно из рис. 2.39, уставка ДНЗЗ подстанции для расчетных условий составляет более 60 Ом. Следует отметить, что сопротивление, измеряемое защитами подстанций, в режиме максимальной нагрузки для рассматриваемого случая составляет 28 Ом. Это говорит о невозможности отстройки защиты подстанции от нагрузочного режима при длине межподстанционной зоны более 90 км и узловой схеме питания. При этом возникает вопрос: при какой длине межподстанционной зоны можно выставить уставку ДНЗЗ, надежно отстроенную от нагрузки и захватывающую область КЗ с требуемой чувствительностью?

Расчеты параметров аварийного и нормального режимов показывают, что при узловой схеме питания обеспечить защиту тяговой сети от КЗ с выполнением требования резервирования можно только при длине межподстанционной зоны не более 50 км. Требования к системе защиты межподстанционных зон с одним ПС и принципы ее выполнения подробно описаны в [7, 11, 15, 38]. Поэтому дальнейшие исследования будут проводиться для протяженных межподстанционных зон с двумя и более постами секционирования.

В целом, предлагаемая методика позволяет создать эффективную систему защиты многократно секционированных ТС переменного тока. Предложенная методика является универсальной, ее можно применять для расчета защит фидеров как тяговых подстанций, так и постов секционирования, независимо от их количества. Универсальность заключается также и в том, что методику можно применять не только для зон с несколькими постами секционирования, а также и для обычных участков с одним ПС.

Однако для надежной отстройки УХС защит от нагрузочной области необходимо определить количество ПС на зоне с учетом максимально возможного числа параметров нормального и аварийного режимов работы СТЭ. В этой связи целесообразным представляется разработка методики для выбора количества ПС с учетом вышеобозначенных особенностей работы протяженных межподстанционных зон.

*С учетом вышесказанного можно сформулировать основные требования к системе защиты тяговой сети переменного тока с протяженными межподстанционными зонами:*

1) при длине межподстанционных зон более 50 км необходима установка дополнительных постов секционирования;

2) при многократном продольном секционировании КС посты должны оборудоваться функционирующими защитами;

3) все посты секционирования должны иметь защиты с трехступенчатыми ДНЗ, причем характеристика третьей ступени должна быть составной;

4) нижние границы УХС третьих ступеней ДНЗ должны иметь отстройку не менее  $60^{\circ}$ – $65^{\circ}$ ;

5) расчет первичных сопротивлений срабатывания третьей ступени ДНЗ должен производиться по предложенной методике, учитывающей различное количество постов секционирования на межподстанционной зоне.

### **3. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ТЯГОВОЙ СЕТИ С МНОГОКРАТНЫМ ПРОДОЛЬНЫМ СЕКЦИОНИРОВАНИЕМ**

#### **3.1. Исследование эффективности применения многократного продольного секционирования**

В соответствии с [31] главная цель секционирования – это обеспечение безопасности движения поездов и повышение эффективности перевозочного процесса. Между тем секционирование контактной сети оказывает значительное влияние также и на условия функционирования защит.

Как показывает практика, наиболее часто повреждаемым элементом системы тягового электроснабжения является контактная сеть. На долю контактной сети приходится около 84 % всех повреждений по устройствам электроснабжения, связанных с вынужденной остановкой поездов [1, 19, 21, 23, 33].

По данным [1], удельный вес браков из-за отказов контактной сети составил 85 % в 2001 г. и 83,7 % в 2002 г. Для сравнения, удельный вес браков по тяговым подстанциям составил 1 % за 2001 и 1,5 % за 2002 г, а для автоблокировки 12 % и 12,6 %, соответственно. Удельное время перерыва электроснабжения по вине хозяйства электрификации и электроснабжения за 2002 г. составило 1,54 ч на 100 км развернутой длины КС, что равняется 115,2 тыс. км.

Секционирование является одним из способов повышения надежности контактной сети и снижения ущерба от простоя поездов.

Рассмотрим, как повлияют на показатели надежности питания потребителей (ЭПС) различные схемы секционирования КС. За расчетные варианты примем схемы с одним и двумя постами секционирования, приведенные на рис. 3.1.

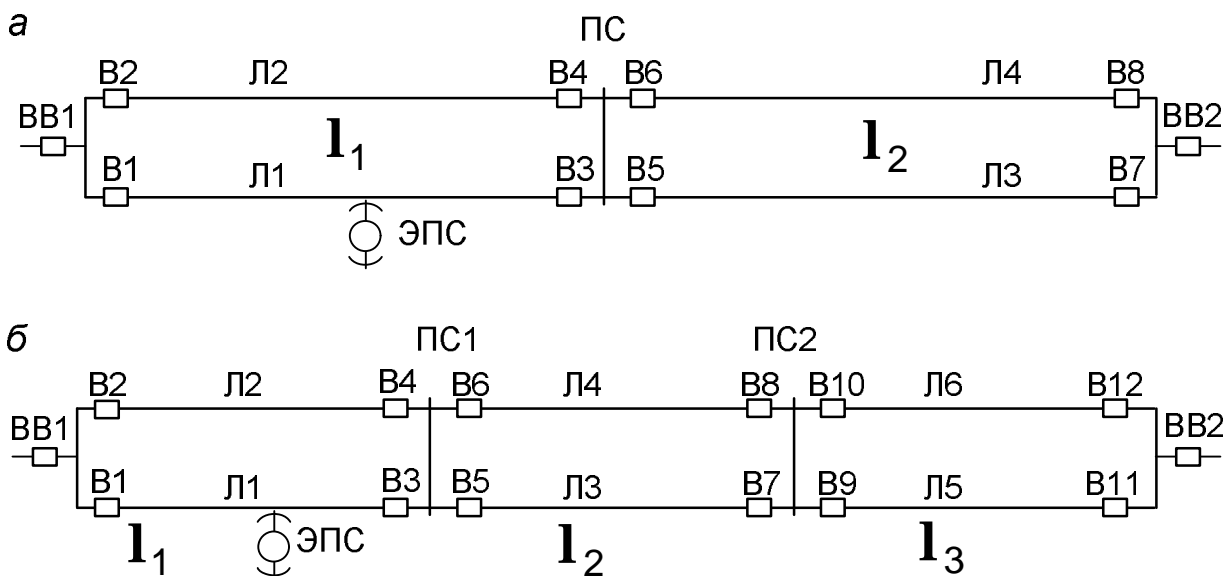


Рис. 3.1. Расчетные схемы для определения показателей надежности питания потребителя (ЭПС): а – с одним ПС; б – с двумя ПС

Поскольку нас интересует только надежность самой контактной сети, будем считать, что релейная защита работает безотказно. В таком случае при составлении схемы замещения по надежности рассматриваем работу выключателей и контактной подвески. Основными параметрами надежности являются: вероятность безотказной работы  $p(t)$ , вероятность появления отказа  $q(t)$  и интенсивность отказов  $\lambda$  [23].

Учитывая, что для объектов систем электроснабжения интенсивность отказов в период нормальной эксплуатации практически неизменна, т. е.  $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$  [3, 9, 23], к ним применим экспоненциальный закон распределения отказов. Для данного закона вероятность безотказной работы и вероятность отказа можно определить по выражениям [3, 9, 23]:

$$p(t) = e^{-\lambda t}, \quad (3.1)$$

$$q(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad (3.2)$$

где  $\lambda$  – интенсивность отказов.

Реальная интенсивность отказов  $\lambda$  может быть рассчитана по показателям работы системы тягового электроснабжения по формуле [3, 9, 23]:

$$\lambda = \frac{n}{N \cdot \Delta t}, \quad (3.3)$$

где  $n$  – количество нарушений нормальной работы рассматриваемого устройства;  $N$  – общее количество наблюдаемых устройств;  $\Delta t$  – период времени наблюдения, год.

В соответствии с [1] количество случаев нарушения нормальной работы КС равно 655 в 2000 г., 793 в 2001 г. и 789 в 2002 г. Тогда применительно к устройствам КС выражение (3.3) будет выглядеть:

$$\lambda_{\text{КС}} = \frac{n_{\text{нар}}}{L_{\text{разв}} \cdot \Delta t}, \quad (3.4)$$

где  $n_{\text{нар}}$  – количество нарушений нормальной работы устройств КС за год;  $L_{\text{разв}}$  – развернутая длина контактной сети, км.

Развернутая длина КС на 2000 г. составляла 112,1 тыс. км, 2001 г. – 113,0 тыс. км, 2002 г. – 115,2 тыс. км.

Тогда по выражению (3.4):

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{КС} 2000} &= \frac{655}{112,1 \cdot 1} = 0,00584 \frac{1}{\text{год} \cdot \text{км}}; \\ \lambda_{\text{КС} 2001} &= \frac{793}{113,0 \cdot 1} = 0,00657 \frac{1}{\text{год} \cdot \text{км}}; \\ \lambda_{\text{КС} 2002} &= \frac{789}{115,2 \cdot 1} = 0,00685 \frac{1}{\text{год} \cdot \text{км}}. \end{aligned}$$

Средняя интенсивность отказов контактной сети за прошедшие три года составляет  $\lambda_{\text{КС}} = 0,00657 \frac{1}{\text{год} \cdot \text{км}}$ .

Аналогично вычисленная средняя интенсивность отказов за три года для выключателей контактной сети составляет  $\lambda_{\text{В}} = 0,00418 \frac{1}{\text{год} \cdot \text{км}}$ .

В соответствии с (3.1) вероятность безотказной работы 1 км контактной сети за один год имеет вид:

$$p_{\text{ГС}} = e^{-0,00657 \cdot 1} = 0,99345.$$

Вероятность безотказной работы выключателя КС в течение одного года следующая:

$$p_B = e^{-0,00418 \cdot 1} = 0,99583 .$$

Для определения вероятности безотказной работы рассматриваемых на рис. 3.1 участков контактной сети примем длину всей межподстанционной зоны равной 100 км. Тогда

– для участка длиной 50 км при узловой схеме питания (рис. 3.1, а):

$$p_{rc} = e^{-0,00657 \cdot 50} = 0,72000 ;$$

– для участка длиной 33 км (установка двух постов секционирования):

$$p_{rc} = e^{-0,00657 \cdot 33} = 0,80508 .$$

Составим схемы замещения по надежности питания нагрузки (ЭПС) на участке Л1 в соответствии со схемой на рис. 3.1, а. В этом случае схема замещения по надежности выглядит следующим образом (рис. 3.2).

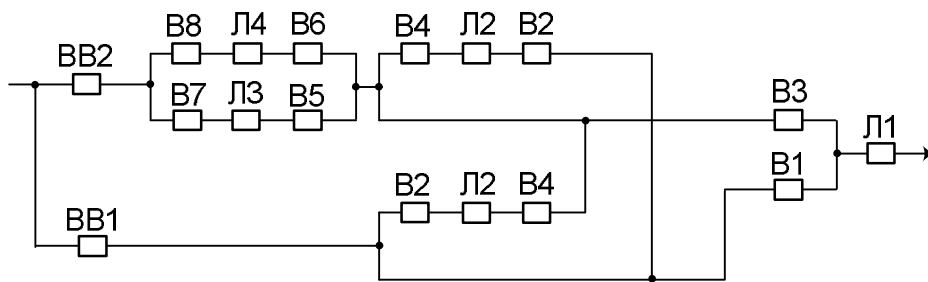


Рис. 3.2. Схема замещения по надежности узловой схемы питания согласно рис. 3.1, а

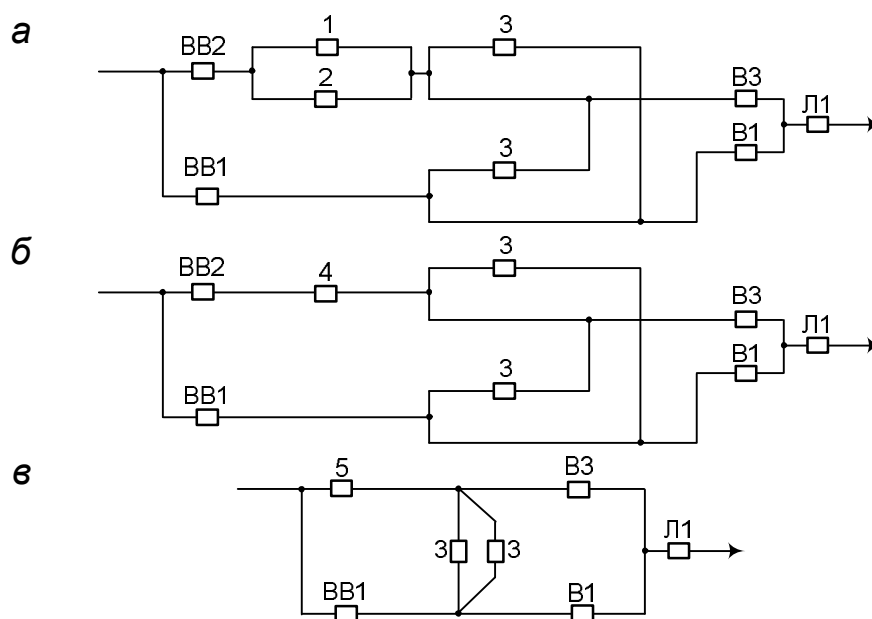


Рис. 3.3. Схемы замещения по надежности:  
а, б, в – этапы преобразования схемы

На рис. 3.3:

$$\begin{aligned} p_1 &= p_{B8} \cdot p_{Л4} \cdot p_{B6}; & p_2 &= p_{B7} \cdot p_{Л3} \cdot p_{B5}; \\ p_3 &= p_{B2} \cdot p_{Л2} \cdot p_{B4}; & p_4 &= 1 - (1 - p_1)(1 - p_2); \\ p_5 &= p_{BB2} \cdot p_4; & p_6 &= 1 - (1 - p_3)(1 - p_3). \end{aligned}$$

В соответствии с теоремой полной вероятности [3, 9, 23] уравнение вероятности безотказной работы схемы с узловым питанием на рис. 3.4 запишется в виде:

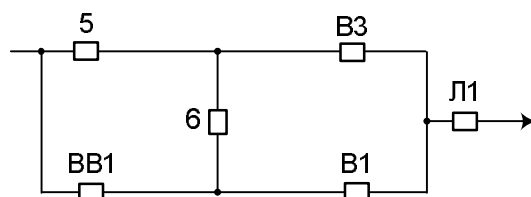


Рис. 3.4. Окончательная схема замещения по надежности

$$p_1 = p_{Л1} (1 - (1 - p_5)(1 - p_{BB1})) \times [1 - (1 - (p_{B3} (1 - (1 - p_5)(1 - p_6)))) (1 - (p_{B1} (1 - (1 - p_6)(1 - p_{BB1})))))] \quad (3.5)$$

Схему замещения по надежности участка КС, представленного на рис. 3.1, б, представим в следующем виде (рис. 3.5).

На рис. 3.6:

$$\begin{aligned} p_1 &= p_{B8} \cdot p_{Л4} \cdot p_{B6}; & p_2 &= p_{B7} \cdot p_{Л3} \cdot p_{B5}; & p_3 &= p_{B2} \cdot p_{Л2} \cdot p_{B4}; & p_4 &= p_{B11} \cdot p_{Л5} \cdot p_{B9}; \\ p_5 &= p_{B12} \cdot p_{Л6} \cdot p_{B10}; & p_7 &= 1 - (1 - p_5)(1 - p_4); & p_6 &= 1 - (1 - p_1)(1 - p_2); & p_8 &= p_{BB2} \cdot p_6 \cdot p_7; \\ p_9 &= 1 - (1 - p_3)(1 - p_3). \end{aligned}$$

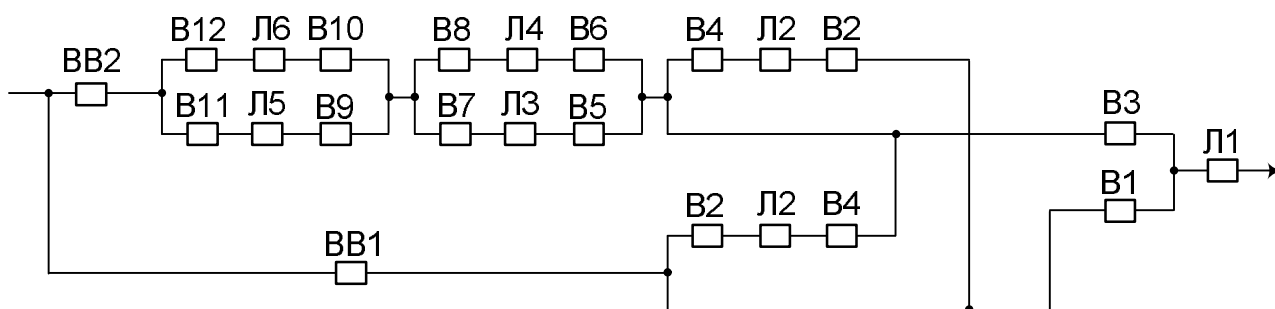


Рис. 3.5. Схема замещения по надежности схемы питания с тремя постами согласно рис. 3.1, б

В соответствии с теоремой полной вероятности уравнение вероятности безотказной работы схемы с двумя постами секционирования (для окончательной схемы замещения на рис. 3.7) запишется:

$$p_2 = p_{Л1} (1 - (1 - p_8)(1 - p_{BB1})) \times [1 - (1 - (p_{B3} (1 - (1 - p_8)(1 - p_9)))) (1 - (p_{B1} (1 - (1 - p_9)(1 - p_{BB1})))))] \quad (3.6)$$

Подставляя числовые значения, получим следующие результаты:



Ø вероятность безотказной работы схемы, представленной на рис. 3.2, а, при питании потребителя (ЭПС) на участке Л1 –  $p_1 = 0,71971$ , вероятность появления отказа  $q_1 = 0,28029$ ;

Ø вероятность безотказной работы схемы, представленной на рис. 3.2, б –  $p_2 = 0,80477$ , вероятность появления отказа  $q_2 = 0,19523$ .

Таким образом, при установке на зоне дополнительно одного ПС вероятность безотказной работы (по сравнению с узловой схемой питания) увеличилась на **12 %**.

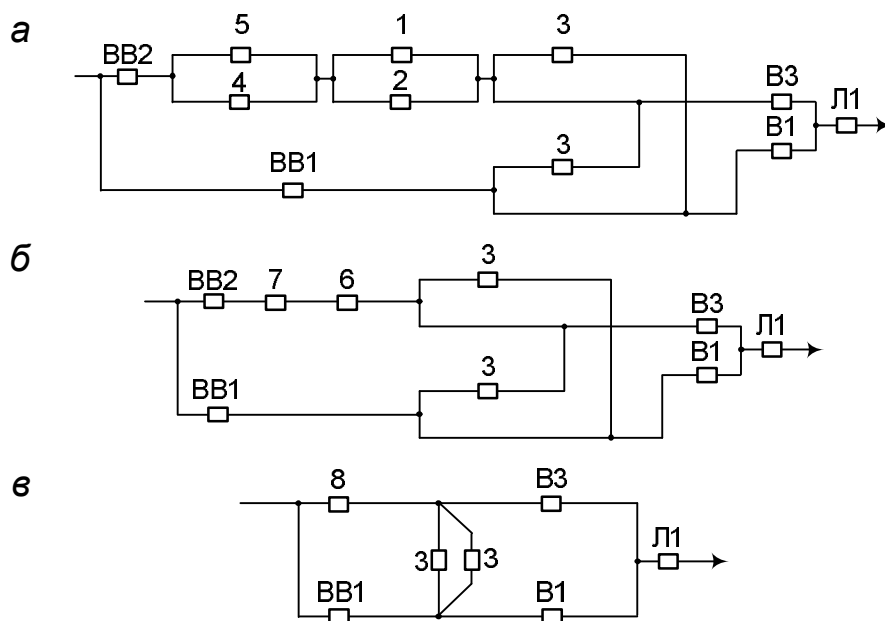


Рис. 3.6. Схемы замещения по надежности:  
а, б, в – этапы преобразования схемы

Данный пример, даже с учетом всех допущений, доказывает целесообразность применения продольного секционирования КС, с точки зрения повышения эффективности и надежности перевозочного процесса.

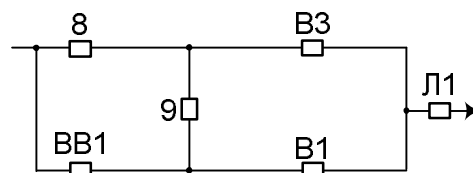


Рис. 3.7. Окончательная схема замещения по надежности

### 3.2. Определение граничных условий размещения постов секционирования на межподстанционной зоне

При определении количества ПС при продольном секционировании КС недостаточно руководствоваться только длиной межподстанционной зоны. Количество ПС зависит от многих факторов: загруженности участков железной дороги, величины доли рекуперации, типа подвески КС, величины остаточной нагрузки при КЗ и др. Причем, зная необходимое количество ПС, не всегда можно определить место на межподстанционной зоне

для их установки. Официальная методика или регламентированные способы размещения ПС на межподстанционной зоне в настоящее время отсутствуют в [5, 31]. Если ПС предусмотрен проектом, то располагают его как можно ближе к середине межподстанционной зоны, привязывая обычно к ближайшей станции. Места размещения ПС на межподстанционной зоне зависят от характеристики межподстанционной зоны: профиля пути, наличия на зоне выемок, тоннелей и других участков, на которых размещение ПС невозможно. Поэтому важно знать не только количество ПС, а также и граничные условия расстановки их на межподстанционной зоне. Тем более, что после расстановки ПС требуется оценить, сможет ли существующая система защиты контактной сети обеспечить надежность отстройки от нагрузочных режимов и требуемую чувствительность к КЗ.

Отсутствие методики, с помощью которой можно точно определить необходимое количество ПС и места их размещения, при учете всех особенностей участков и параметров работы СТЭ снижает эффективность применения продольного секционирования.

Для разработки методики необходимо учитывать параметры нормального и аварийного режимов, которые были определены в разд. 2. По результатам исследования были даны рекомендации по изменению настройки нижней границы УХС ДНЗЗ с типовых  $48^\circ$  до  $60\div 65^\circ$ . Это показывает, что отсутствие проверки отстройки третьей ступени ДНЗ от области нагрузки (в соответствии с типовой методикой) не вполне оправданно. На наш взгляд, каждая ступень ДНЗ, независимо от ее угловых настроек, должна обязательно проверяться по отстройке от нагрузки. В первую очередь это относится к защитах фидеров тяговых подстанций, поскольку для них значение  $Z_{H\min}$  меньше, нежели для защит фидеров ПС.

Сопrotивление срабатывания третьей ступени ДЗ можно определить по условиям отстройки от нагрузочного режима и обеспечения требуемой чувствительности к КЗ в конце резервируемой зоны для определенного угла нижней границы УХС ( $\alpha$ ):

$$Z_{сзз}(\alpha) = K_{ч} \cdot Z_{к\max}(\alpha); \quad (3.7)$$

$$Z_{сзз}(\alpha) \leq \frac{Z_{H\min}(\alpha)}{K_0}, \quad (3.8)$$

где  $K_{ч}$  – коэффициент чувствительности, для резервной защиты  $K_{ч} = 1,2$ ;  $K_0$  – коэффициент отстройки,  $K_0 = 1,2$ ;  $\alpha$  – угол отстройки нижней границы УХС ДНЗЗ,  $\alpha = 60\div 65^\circ$ .

Приравняв выражения (3.7) и (3.8), получим условие, необходимое для определения оптимального количества постов секционирования:

$$\frac{Z_{H \min}(\alpha)}{Z_{k \max}(\alpha)} \geq 1,44. \quad (3.9)$$

Соотношения сопротивления при  $\alpha = 60^\circ$  представлено на рис. 3.8.

В развернутом виде выражение (3.9) имеет вид:

$$1,44 \left( z_{22} \mathbf{l}_o + 2z_{21} \mathbf{l}_p + \frac{2z_{s1} + z_{22} \mathbf{l}_o + 2z_M \mathbf{l}_p}{z_{s2} + \frac{z_{22}}{2} (\mathbf{l}_\phi - \mathbf{l}_o - \mathbf{l}_p) + z_{-22} \mathbf{l}_p} z_{-22} \mathbf{l}_p \right) \geq Z_{H \min}(\alpha), \quad (3.10)$$

где  $\mathbf{l}_\phi$  – длина межподстанционной зоны, км.

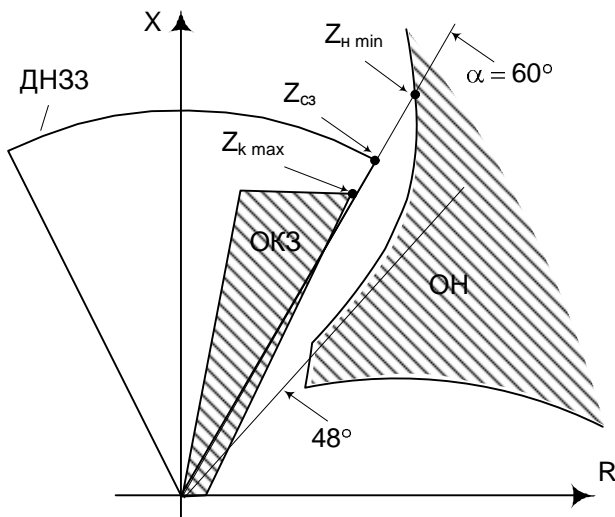


Рис. 3.8. Соотношения сопротивлений при  $\alpha = 60^\circ$  по (3.9)

Сопротивление, измеряемое защитами в режиме максимальной нагрузки определяется

$$Z_{H \min} = \frac{I_{H \max}^{\min}}{I_{H \max}^{\max} + I_{H \max}^{\max}}, \quad (3.11)$$

где  $I_{H \max}^{\min}$  и  $I_{H \max}^{\max}$  – максимальные токи в режимах тяги и рекуперации соответственно.

При соблюдении условия (3.10) третьей ступени ДЗ фидеров подстанций и постов надежно отстроены от области нагрузки и захватывают область КЗ с требуемым коэффициентом чувствительности.

Естественно, что условие (3.10) будет выполняться только при определенных параметрах рассматриваемого участка СТЭ. Изменение количества постов секционирования на межподстанционной зоне не приведет к изменению нагрузки фидеров тяговых подстанций. Однако увеличение числа ПС на межподстанционной зоне приведет к уменьшению длин основной и резервируемой зон защиты.

Таким образом, выполнению условия (3.9) в первую очередь способствует увеличение количества ПС на зоне. Поэтому главной задачей разрабатываемой методики является определение оптимального количества постов на межподстанционной зоне, при котором УХС защит удастся надежно отстроить от области нагрузки.

На рис. 3.9 представлен алгоритм расчета количества постов секционирования по условию надежной отстройки нормального режима от аварийного при различных параметрах работы СТЭ.

Данный алгоритм включает в себя расчетные формулы по определению параметров нагрузочного и аварийного режимов и учитывает различные параметры работы СТЭ. Алгоритм применим для различных схем секционирования КС.

Подробные исследования области нагрузочного режима, проведенные в соответствии с алгоритмом расчета при различных вариациях параметров СТЭ, позволили определить граничные условия для определения количества постов секционирования, необходимого для надежной отстройки УХС защит ФКС от области нагрузки. В свою очередь, это дает возможность определить необходимое количество постов секционирования для протяженных межподстанционных зон различной длины при изменяющихся параметрах СТЭ.

На основании проведенных исследований предлагаются следующие рекомендации по количеству ПС на межподстанционных зонах при различных параметрах СТЭ:

Ø при длине межподстанционной зоны **95–100 км**, контактной подвеске с ЭУП и доле рекуперации не более 0,2 к установке рекомендуется четыре поста, при контактной подвеске с УП и доле рекуперации не более 0,2 количество ПС должно быть не менее трех;

Ø при длине межподстанционной зоны **90–95 км**, любом типе контактной подвески и доле рекуперации не более 0,2 количество ПС должно быть не менее трех;

Ø при длине зоны **70–90 км**, любом типе контактной подвески и доле рекуперации не более 0,2 рекомендуется установка трех постов секционирования;

Ø при протяженности межподстанционной зоны **60–70 км**, любом типе контактной подвески и доле рекуперации не более 0,2 – к установке рекомендуется не менее двух постов.

Расчеты, проведенные нами в соответствии с алгоритмом, приведенным на рис. 3.9, позволили определить только необходимое количество постов секционирования при различных характеристиках СТЭ. В приведенных выше расчетах рассматривалась равномерная расстановка ПС на межподстанционных зонах, т. е. с одинаковым расстоянием между ними и подстанциями. Вместе с тем в эксплуатации добиться такого расположения ПС практически невозможно.

Размещение постов секционирования на протяженных межподстанционных зонах зависит, как было указано ранее, от многих факторов, на которые мы повлиять не можем: профиль пути, тоннели, выемки, отсутствие населенных пунктов и др. Поэтому на основании вышеприведенных исследований нагрузочных и аварийных режимов работы СТЭ с фидерными зонами протяженностью 60–100 км определим требования к расстановке выбранного количества ПС.

Исследуем граничные условия размещения постов секционирования, основными из которых являются минимальные расстояния между ПС и ТПС (или между смежными постами), а также диапазоны изменения местоположения ПС по отношению к обоим смежным постам (или подстанциям). Расчеты проводились для различных вариаций следующих параметров СТЭ: длин фидерных зон, типов контактных подвесок и расстояний между ПС и подстанциями.

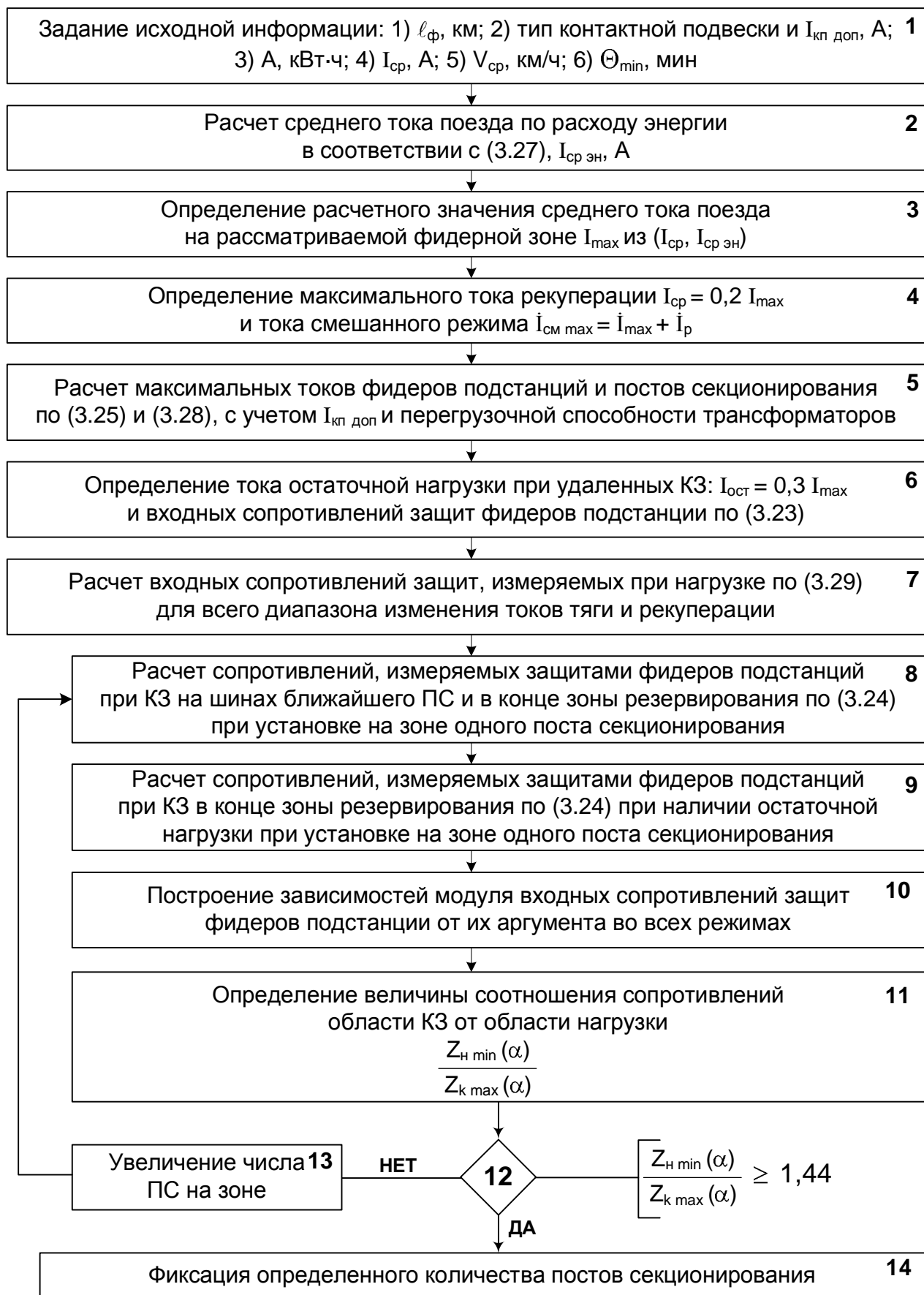


Рис. 3.9. Алгоритм расчета количества постов секционирования

При расчетах сопротивлений срабатывания третьих ступеней ДЗ были введены следующие ограничения: минимальное сопротивление ступеней ДЗ, выставяемое на комплектах защит  $Z_{дз\ min}$ ; сопротивление нагрузки, измеряемое защитами фидеров ТПС и ПС в нормальном режиме минимальное  $Z_{н\ min}$ .

Минимальное сопротивление срабатывания  $Z_{дз\ min}$  составляет 1,2–1,3 Ом. В первую очередь, это ограничение будет касаться первой ступени ДЗ, поскольку в соответствии с требованием селективности она не должна выходить за пределы 85 % длины основной защищаемой зоны. Для определения минимальной длины защищаемой зоны воспользуемся выражением для определения сопротивления срабатывания первой ступени ДЗ [5]:

$$Z_{сз\ min} = 0,85 \cdot z_{21} \cdot I_{\min} \quad (3.12)$$

Откуда

$$I_{\min} = \frac{Z_{дз\ min} \cdot K_{ТН}}{0,85 \cdot z_{21} \cdot K_{ТТ}}, \quad (3.13)$$

где  $K_{ТН}$ ,  $K_{ТТ}$  – коэффициент трансформации измерительных трансформаторов напряжения и тока соответственно.

В настоящее время в распределительных устройствах напряжением 27,5 кВ большинства тяговых подстанций установлены измерительные трансформаторы напряжения типа ЗНОМ–27,5 с коэффициентом трансформации 275. Измерительные трансформаторы тока типа ТФЗМ-35 для фидеров КС тяговых подстанций имеют коэффициенты трансформации 1000/5А и 1500/5А.

Тогда с учетом параметров подвески с ЭУП:

$$I_{\min} = \frac{1,3 \cdot 275}{0,85 \cdot 0,25 \cdot 200} \approx 8 \text{ км}; \quad I_{\min} = \frac{1,3 \cdot 275}{0,85 \cdot 0,25 \cdot 300} \approx 6 \text{ км}.$$

Следовательно, размещение ПС ближе 10 км к ТПС или смежному посту нежелательно. В противном случае имеется вероятность появления неселективной работы первых ступеней ДЗ фидеров подстанции и смежного поста секционирования.

В соответствии со вторым ограничением (3.17) необходимо определить минимальные сопротивления, измеряемые защитами фидеров подстанции и постов в нагрузочном режиме. На этапе 10 алгоритма расчета количества ПС, приведенного на рис. 3.9, данные величины уже были рассчитаны. Причем проведенные расчеты показали, что для межподстанционных зон различной длины при наиболее тяжелых режимах нагрузки сопротивления, измеряемые защитами фидеров подстанций и постов, практически одинаковые. При этом расчетная погрешность находит-

ся в пределах 5 %. Так, например, в нагрузочном режиме для фидерных зон протяженностью от 70 до 100 км при наличии подвески с ЭУП одни и те же параметры можно использовать для определения входных сопротивлений как защит фидеров подстанций, так и постов секционирования.

Типы подвесок контактной сети также можно разделить на группы, в которых погонные сопротивления будут отличаться друг от друга не более, чем на 5 %. Выделим три основные группы: подвески КП+НТ; КП+НТ+УП и ЭУП.

Из выделенных групп в расчетах учитывалась контактная подвеска с наибольшими погонными сопротивлениями (табл. 3.1).

Таблица 3.1

### Сопротивления контактных подвесок и погрешности в группах

Подвеска		$Z_{21}$ , Ом	$\Delta Z$ , %	$Z_{22}$ , Ом	$\Delta Z$ , %
КП+НТ	ПБСМ–70+МФ–100	0,462	4,3	0,57	3,6
	ПБСМ–95+МФ–100	0,443		0,55	
КП+НТ+УП	ПБСМ–70+МФ–100+А185	0,327	1,9	0,439	1,4
	ПБСМ–95+МФ–100+ А185	0,321		0,433	
ЭУП	ПБСМ–95+МФ–100+ А185+ А185э	0,261	4,4	0,309	1,6
	М–95+МФ–100+А185+ А185э	0,250		0,314	

На рис. 3.11, 3.12 и 3.13 показаны зависимости сопротивлений, измеряемых заштрихованными на рис. 3.10 защитами подстанций и постов, в нагрузочном режиме при различном количестве ПС и различных параметрах СТЭ от их фазового сдвига.

Зависимости, приведенные на рис. 3.11, 3.12 и 3.13, позволяют произвести отстройку от нагрузочного режима третьих ступеней ДНЗ фидеров КС ТПС и любого поста при различных углах настройки УХС защит с учетом различного количества ПС.

Основные критерии размещения постов секционирования рассмотрим на примере межподстанционной зоны длиной 100 км для различного количества ПС с оценкой условий функционирования релейной защиты фидеров.

Как было отмечено выше, при длине межподстанционной зоны 100 км обеспечить необходимую отстройку защит от области нагрузок и требуемую чувствительность к КЗ можно только при установке не менее трех ПС. Расчетные схемы для этого варианта приведены на рис. 3.14.

Проанализируем, как повлияет на сопротивления срабатывания ДНЗЗ фидеров ТПС1 и ПС2 местоположение ПС1. Для начала расположение ПС2 было выбрано произвольно (в середине межподстанционной зоны).

В соответствии с расчетной схемой на рис. 3.14, а, сопротивления срабатывания защит фидеров ТПС1 можно определить по выражению:



$$Z_{\text{сз3 ТПС1}} = 1,2 \left( z_{22} \mathbf{l}_1 + 2z_{21} \mathbf{l}_2 + \frac{2z_{s1} + z_{22} \mathbf{l}_1 + 2z_M \mathbf{l}_2}{z_{s2} + 0,5z_{22} \mathbf{l}_3 + z_{-22} \mathbf{l}_2} z_{-22} \mathbf{l}_2 \right); \quad (3.14)$$

по аналогии – для защит фидеров ПС1 (рис. 3.14, б):

$$Z_{\text{сз3 ПС2}} = 1,2 \left( z_{22} \mathbf{l}_2 + 2z_{21} \mathbf{l}_1 + \frac{2z_{s2} + z_{22} \mathbf{l}_2 + 2z_M \mathbf{l}_1}{z_{s1} + 0,5z_{22} \mathbf{l}_3 + z_{-22} \mathbf{l}_1} z_{-22} \mathbf{l}_1 \right). \quad (3.15)$$

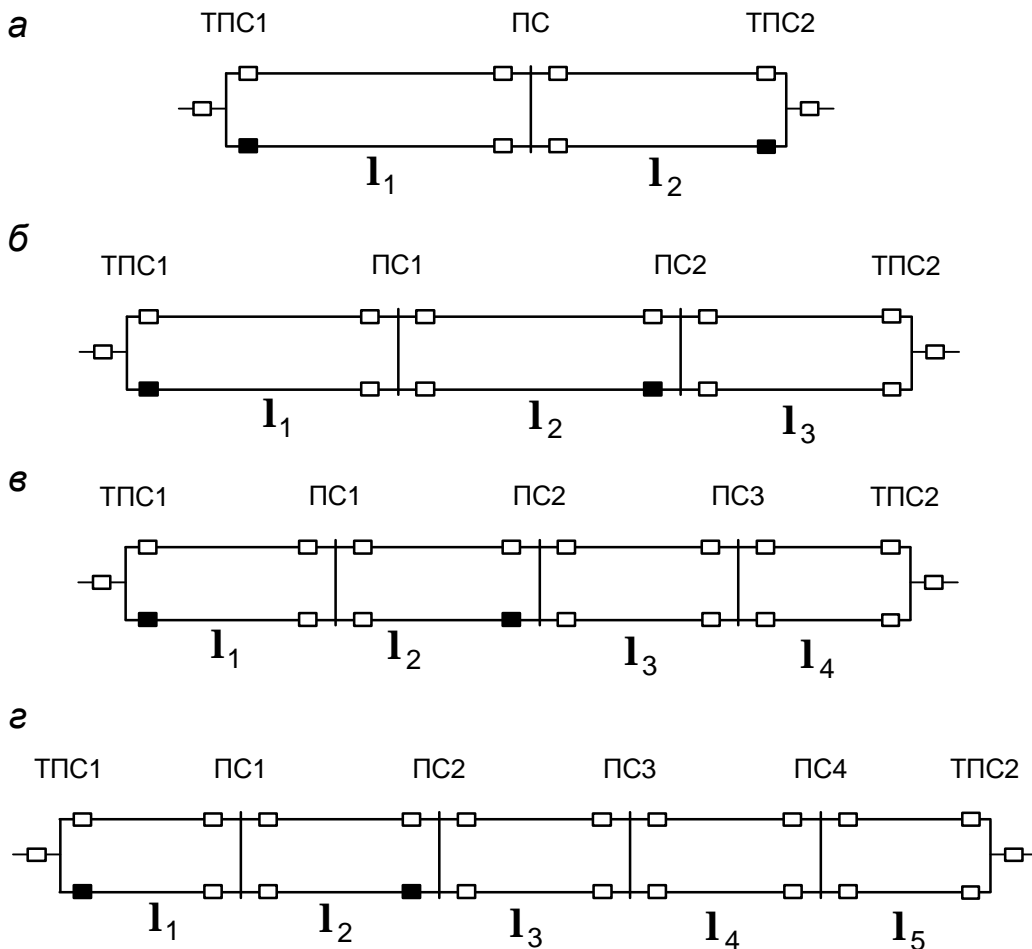


Рис. 3.10. Варианты расположения двух рассматриваемых защит в схемах питания: а – с одним ПС; б – двумя ПС; в – тремя ПС; г – четырьмя ПС

На рис. 3.15 приведены значения сопротивлений срабатывания ДНЗ3 фидеров ТПС1 и ПС2 в соответствии с расчетными схемами на рис. 3.14, при различном местоположении ПС1. Положение ПС1 определяется соотношением  $\mathbf{l}_1$  и  $\mathbf{l}_2$ . На рис. 3.15 показаны границы выставления уставок ДНЗ3 при отстройке нижней границы УХС на  $65^\circ$  для подстанции (28 Ом) и для ПС2 (48 Ом).

Из графиков, приведенных на рис. 3.15, видно, что сопротивление сра-

батывания третьей ступени ДЗ фидера рассматриваемой защиты на ПС2 (в сторону ТПС1) меньше минимального сопротивления нагрузки, равного 48 Ом при отношении  $\frac{I_1}{I_2} < 1,8$ . В отличие от ПС2 защита фидера ТПС1 имеет ограничение по сопротивлению нагрузки 28 Ом, что значительно затрудняет отстройку уставки от области нагрузки. Из рис. 3.15 видно, что при  $I_3 = 50$  км сопротивление срабатывания ДНЗ3 подстанции ТПС1 меньше допустимых 28 Ом только при отношении  $\frac{I_1}{I_2} > 2,3$ . То есть при любом расположении ПС1 и  $I_3 = 50$  км, защиты фидеров ТПС1 и ПС2 не могут быть одновременно отстроены от нагрузки.

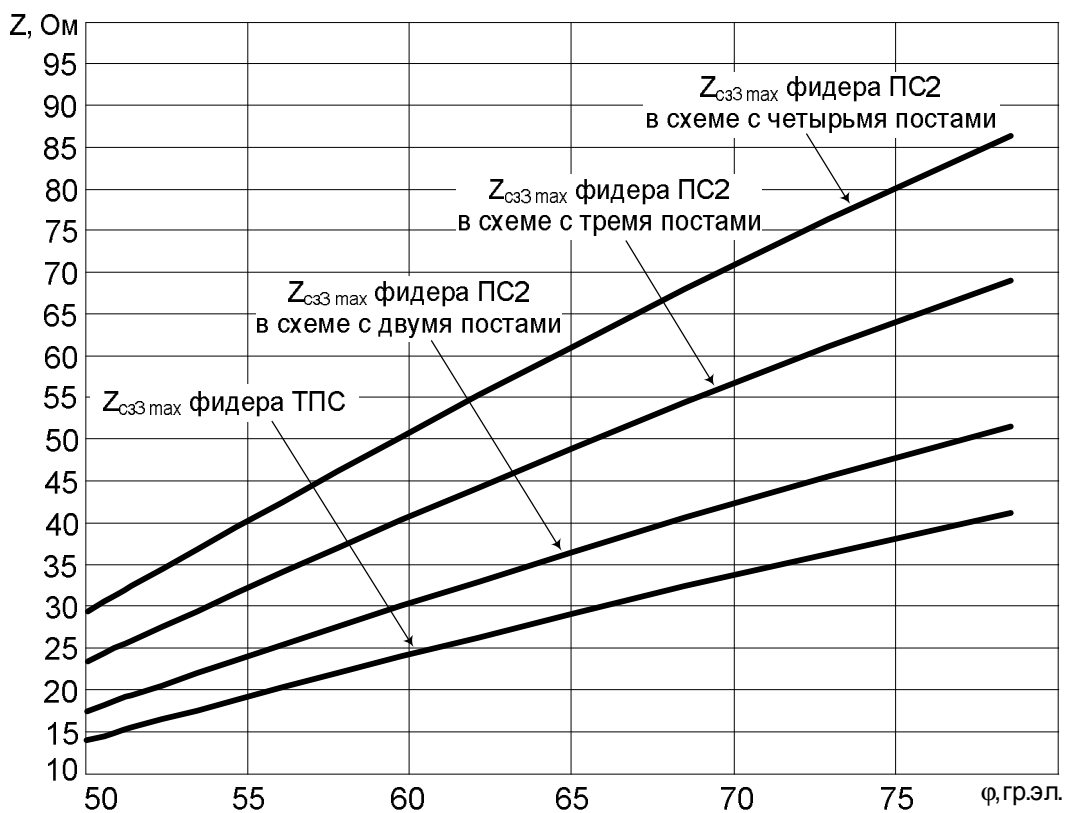


Рис. 3.11. Максимальные значения сопротивлений срабатывания ДНЗ3 для межподстанционной зоны длиной 70–100 км и подвески с ЭУП

Следовательно, при наличии на межподстанционной зоне протяженностью 100 км контактной подвески с усиливающим и экранирующим проводом и трех постов секционирования надежная отстройка защит фидеров тяговых подстанций от области нагрузки невозможна.

Рассмотрим вариант с установкой на зоне четырех постов секционирования. Расчетные схемы при наличии на зоне четырех ПС представлены на рис. 3.16.

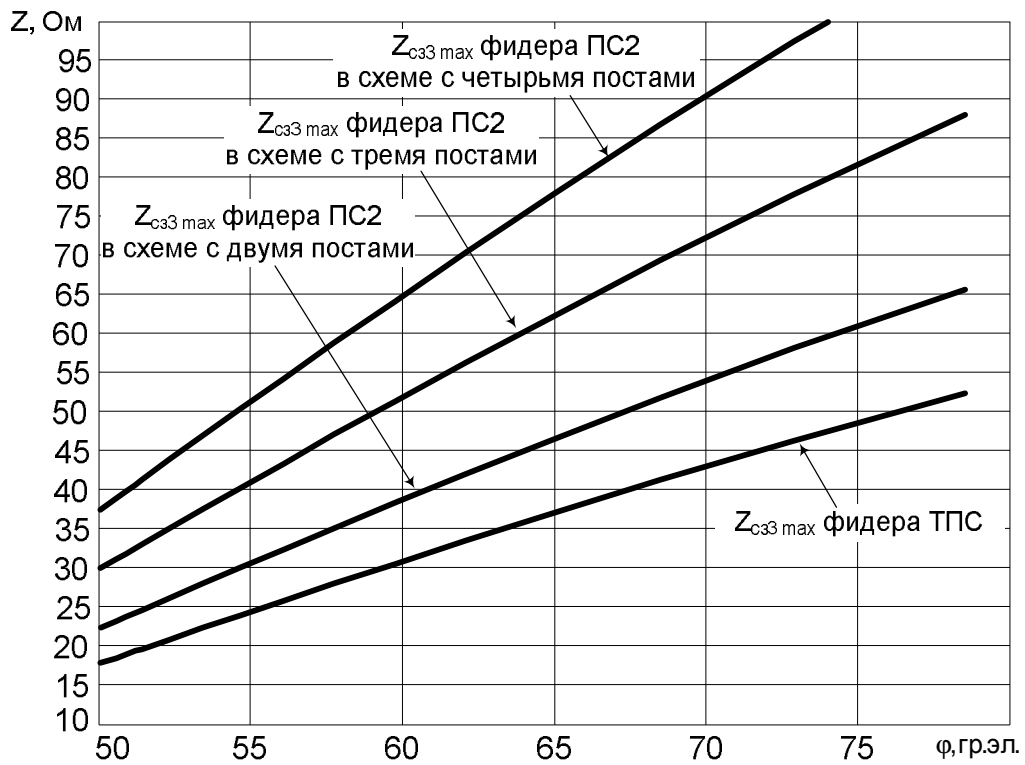


Рис. 3.12. Максимальные значения сопротивлений срабатывания ДНЗЗ для межподстанционной зоны длиной 60–75 км и любого типа подвески с усиливающим проводом

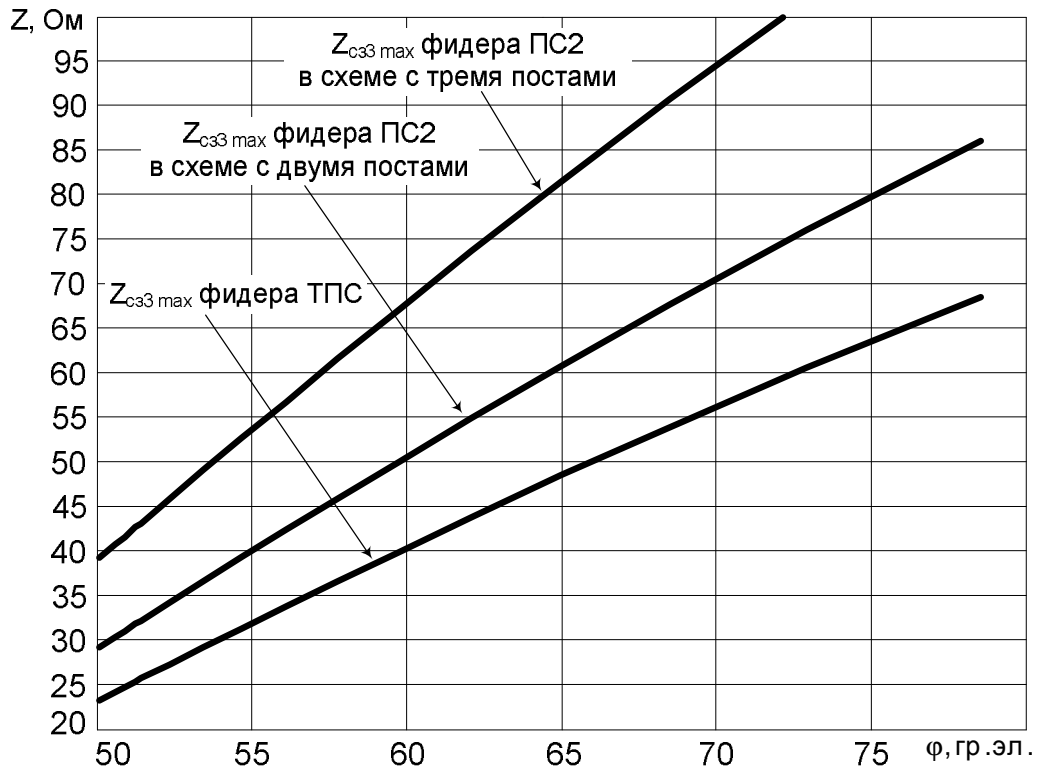


Рис. 3.13. Максимальные значения сопротивлений срабатывания ДНЗЗ для межподстанционной зоны длиной 60–65 км с подвеской КП+НТ

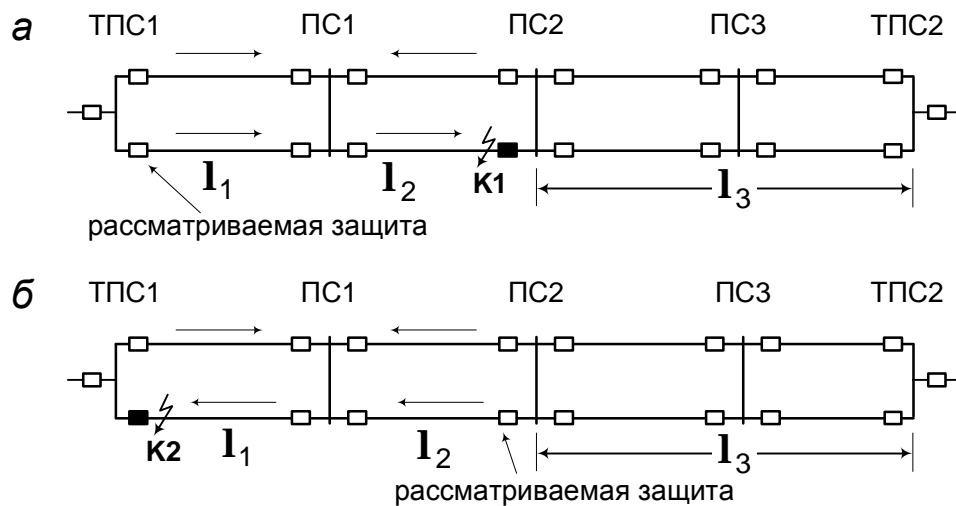


Рис. 3.14. Расчетные схемы определения сопротивлений срабатывания защит подстанций при установке на зоне трех постов секционирования

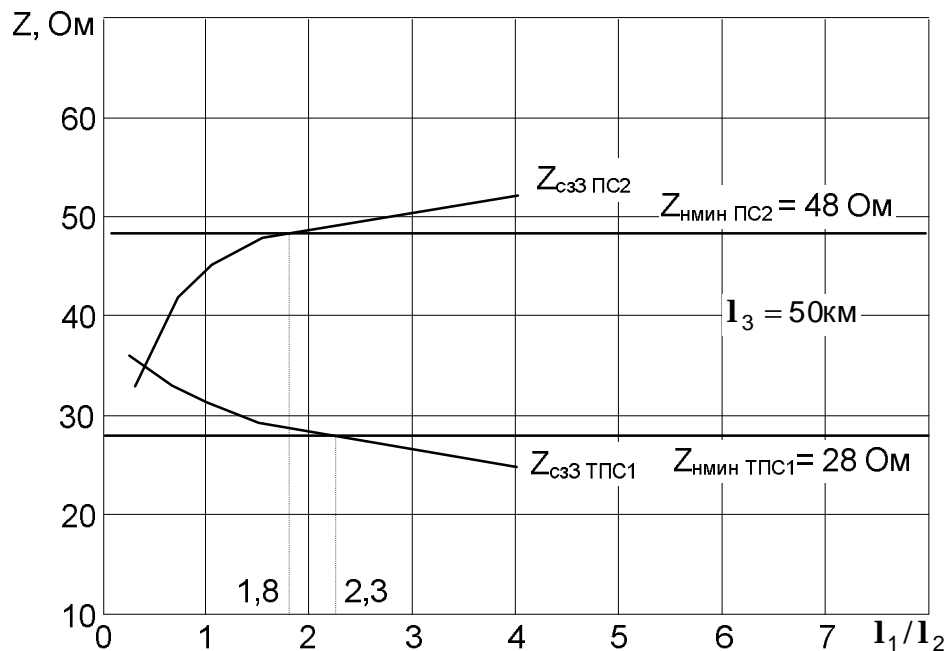


Рис. 3.15. Сопротивления срабатывания ДНЗЗ фидеров ТПС1 и ПС2 при различном местоположении ПС1 на зоне 100 км с тремя постами (по схеме на рис. 3.10, в)

На рис. 3.17 представлены зависимости первичных сопротивлений срабатывания при различном местоположении ПС1 на участке ТПС1–ПС2 и суммарной длине участка ТПС2–ПС2, равной  $I_3 = 60$  км. Ограничение по области нагрузки не меняется: для фидеров подстанций – 28 Ом, для защит фидеров ПС2 в сторону ТПС1 сопротивление нагрузки равно 62 Ом. При таком количестве ПС расстановку их на зоне можно считать практически равномерной.

Как видно из рис. 3.17, при  $I_3 = 60$  км сопротивления срабатывания третьих ступеней ДНЗ защит фидеров ТПС1 и ПС2 при любом расположении ПС1 меньше минимальных сопротивлений нагрузки. То есть ПС1 может быть установлен в любой точке участка ТПС1–ПС2. Единственным ограничением в этом случае является минимальное расстояние между смежными ПС и подстанциями, равное 10 км.

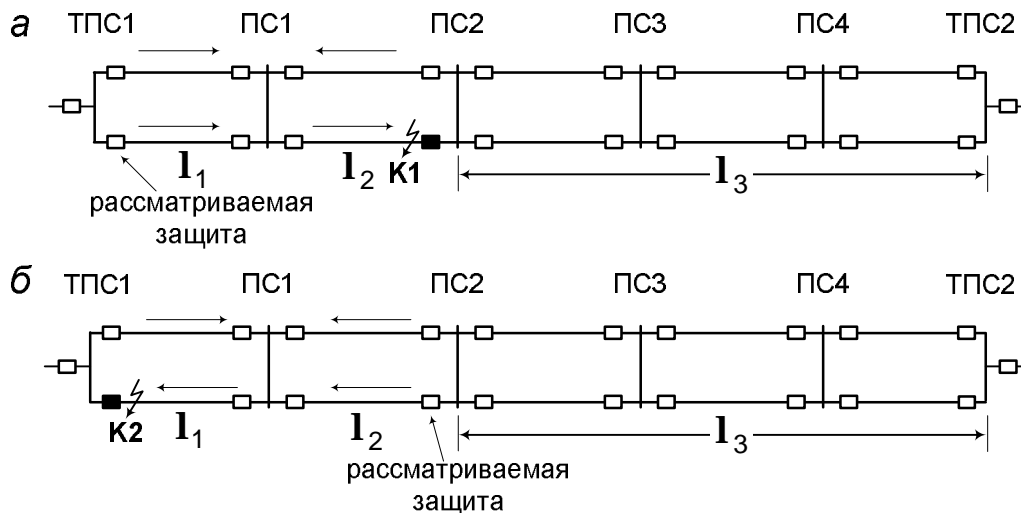


Рис. 3.16. Расчетные схемы определения сопротивлений срабатывания защит подстанций при установке на зоне четырех постов секционирования

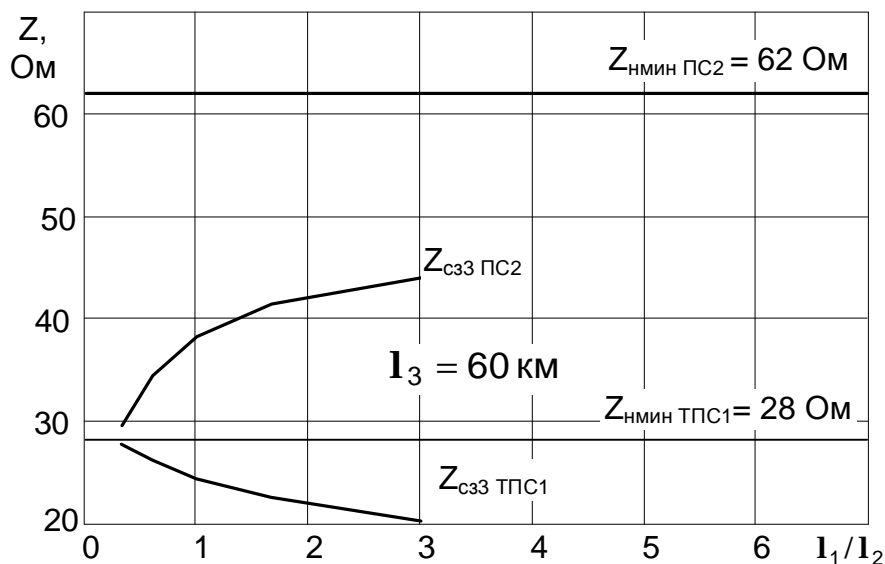


Рис. 3.17. Сопротивления срабатывания ДНЗЗ фидеров ТПС1 и ПС2 при различном местоположении ПС1 на межподстанционной зоне длиной 100 км с четырьмя постами (по схеме на рис. 3.10, а)

Следовательно, при установке на межподстанционной зоне протяженностью 100 км четырех постов секционирования, надежная отстройка защиты от области нагрузки и захват области КЗ с требуемой чувствительностью, возможны практически при любом расположении ПС на зоне.

Зависимости сопротивлений срабатывания защит при различных положениях постов секционирования были построены для всего рассматриваемого диапазона длин фидерных зон при применении на них различных типов контактных подвесок, определяемых по токам максимальных нагрузок. Данные зависимости были классифицированы по схожести параметров и объединены в группы. В результате чего были построены диаграммы для определения мест установки постов секционирования на межподстанционных зонах и сопротивлений срабатывания третьих ступеней ДЗ фидеров ТПС и ПС (рис. 3.18–3.19).

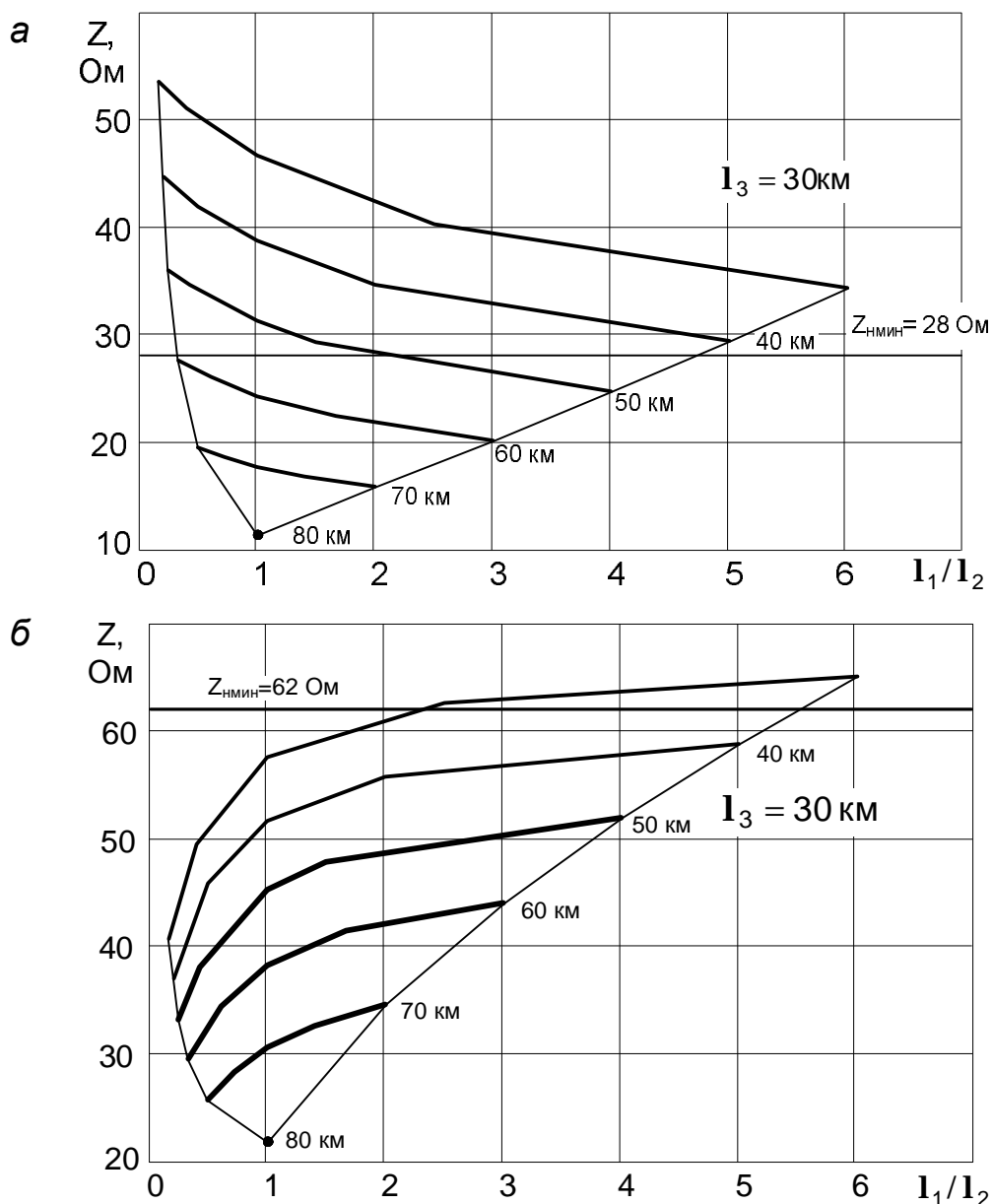


Рис. 3.18. Диаграммы определения диапазона изменения положения ПС1 и уставок ДНЗ3 ТПС1 (а) и ПС2 (б) в схеме с четырьмя постами (согласно рис. 3.10, а) при длине межподстанционной зоны 96–100 км, подвеске с ЭУП и различных  $I_3$

Диаграммы построены для межподстанционных зон различной длины с учетом типов контактной подвески и количества постов секционирования. На рис. 3.18 и 3.19 в качестве примера приведены диаграммы для двух случаев: межподстанционной зоны длиной 96–100 км с четырьмя постами и подвеской с ЭУП и для зоны 61–65 км с двумя ПС и подвеской НТ+КП.

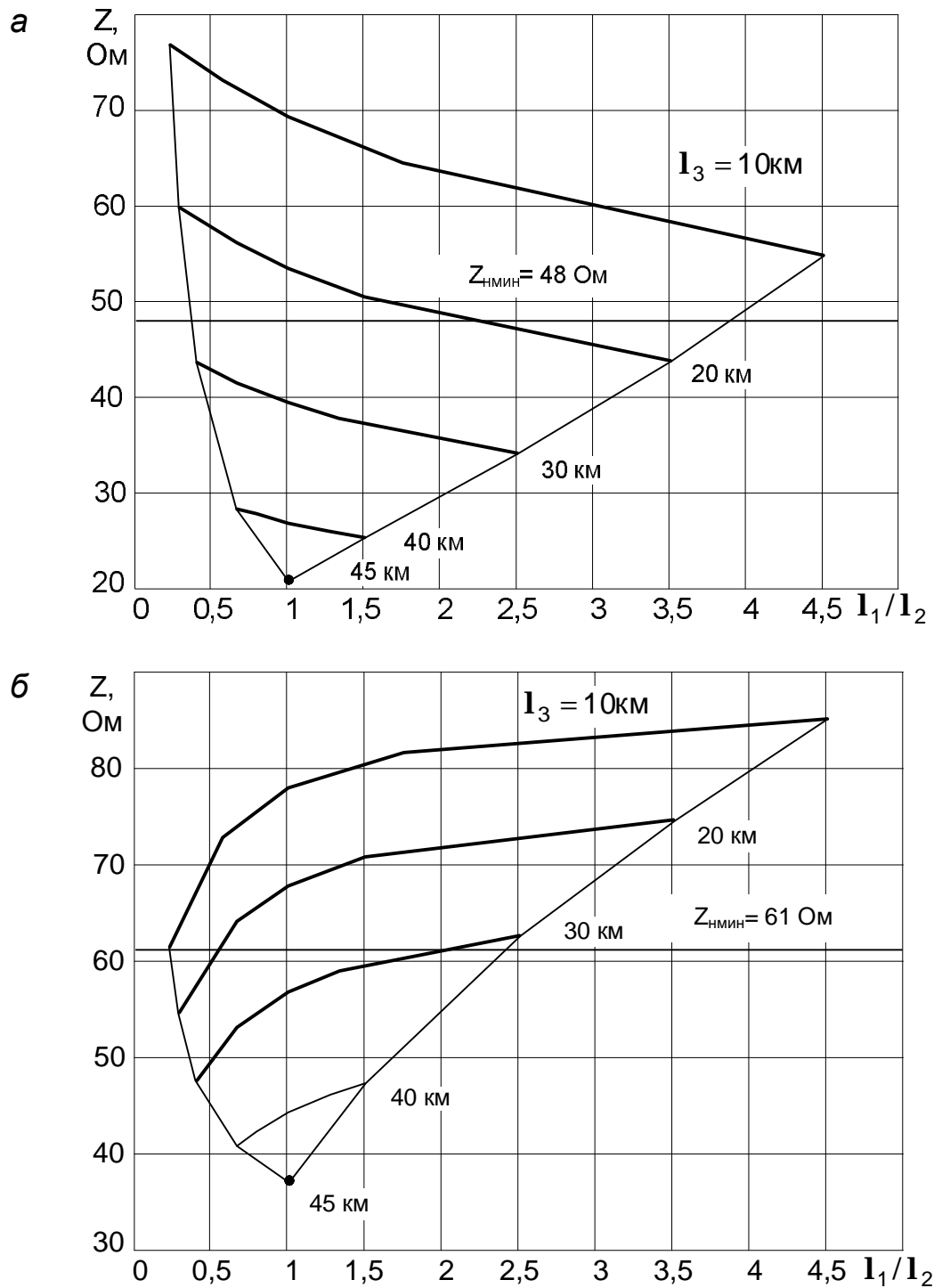


Рис. 3.19. Диаграммы определения диапазона изменения положения ПС1 и уставок ДНЗЗ ТПС1 (а) и ПС2 (б) в схеме с двумя постами (согласно рис. 3.10, б) при длине межподстанционной зоны 61–65 км, подвески НТ+КП и различных  $I_3$

Таким образом, приведенные рекомендации по определению количества постов секционирования на межподстанционных зонах различной длины с использованием полученных зависимостей сопротивлений срабатывания ДНЗЗ защит позволяют принимать технически обоснованные решения при организации защиты протяженных межподстанционных зон с обеспечением всех предъявляемых требований.

### **3.3. Разработка методики размещения постов секционирования на межподстанционных зонах**

После выбора количества постов секционирования возникает задача их правильного размещения. При этом возникает вопрос – какими критериями руководствоваться? Как уже было отмечено выше, конкретные методики или рекомендации по размещению ПС на межподстанционных зонах отсутствуют. В соответствии с [31] все межподстанционные зоны должны иметь ПС, количество которых определяют технико-экономическим расчетом исходя из уровня напряжения на ЭПС, потерь энергии и обеспечения селективности защит контактной сети. Согласование параметров аварийного и нормального режимов работы СТЭ при этом не учитывается, что может приводить к невозможности обеспечения эффективной системы защиты тяговой сети. Как правило, ПС размещают в горловине железнодорожной станции у воздушного промежутка. Естественно, что при этом условия функционирования защит не учитываются. При определении количества ПС необходимо руководствоваться не только уровнем напряжения, но и обеспечением защиты КС в соответствии с предъявляемыми требованиями, поскольку ущерб от отказов защиты не менее значителен, чем при снижении уровня напряжения на токоприемнике электровоза ниже допустимого значения.

Предлагаемая методика определения мест расположения постов секционирования на межподстанционных зонах не требует жесткой увязки места установки ПС к конкретному километру пути, а указывает рекомендуемые диапазоны их расстановки, что позволяет размещать ПС, привязывая их к станциям, как и определено [31]. Преимуществом данной методики является то, что при выборе места установки одновременно производится оценка условий функционирования защит фидеров КС подстанции и ПС с учетом предъявляемых требований, а также определяется установка третьей ступени ДНЗ. Такой комплексный подход позволяет решить одновременно несколько задач: повысить надежность работы КС, снизить вероятность отказов устройств РЗ и пр.

Рассмотрим основные положения данной методики применительно к протяженным межподстанционным зонам с различным количеством постов секционирования.



### 3.3.1. Определение мест установки двух постов секционирования на межподстанционной зоне

Параметры СТЭ, при которых можно устанавливать два поста секционирования, были указаны выше (подразд. 3.3).

При работе с диаграммами для нахождения местоположения двух ПС на межподстанционной зоне, схема которой приведена на рис. 3.20, следует соблюдать следующий порядок:

1) выбирается местоположение ПС2 на произвольно выбранном расстоянии от ТПС2 (можно привязать к ж.-д. станции);

2) по диаграммам определения местоположения ПС для соответствующей длины межподстанционной зоны и выбранного расстояния ТПС2–ПС2 ( $l_3$ ) оценивается возможный диапазон изменения положения ПС1;

3) выбирается и фиксируется положение ПС1, наиболее подходящее с точки зрения привязки к профилю пути, ж.-д. станции или др. По соответствующим диаграммам определяется отношение  $l_1 / l_2$  (рис. 3.20);

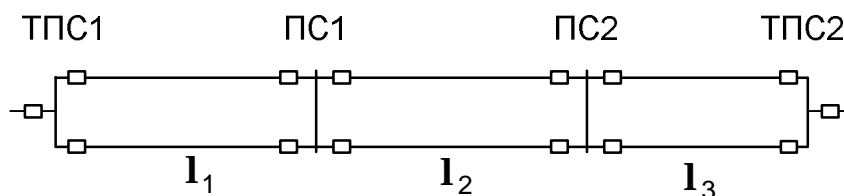


Рис. 3.20. Схема межподстанционной зоны с двумя ПС

4) по тем же диаграммам определения местоположения ПС определяются уставки защит фидеров ТПС1 и ПС2 в сторону ТПС1;

5) по диаграммам определения местоположения ПС при фиксированном положении ПС1 определяется возможный диапазон положения ПС2 на участке ПС1–ТПС2;

6) выбирается наиболее удобное значение отношения  $l_3 / l_2$  и фиксируется положение ПС2;

7) по диаграммам определения местоположения ПС определяются уставки защит фидеров ТПС2 и ПС1 в сторону ТПС2;

8) в том случае, если хотя бы для одной защиты не выполняется усло-

вие  $Z_{сз3}(\alpha) \leq \frac{Z_{нmin}(\alpha)}{k_0}$ , необходимо изменить положение ПС1 и повторить

операции по пп. 1–7.

### 3.3.2. Определение мест установки трех постов секционирования на межподстанционной зоне

Порядок работы при определении местоположения трех ПС на межподстанционной зоне следующий (рис. 3.21):

- 1) определяется местоположение ПС2 на произвольно выбранном расстоянии от ТПС2;
- 2) по диаграммам определения местоположения ПС для соответствующей длины межподстанционной зоны и расстояния от ТПС2 до ПС2 ( $l_3 + l_4$ ) оценивается возможный диапазон изменения положения ПС1;
- 3) выбирается наиболее удобное значение отношения  $l_1 / l_2$  (рис. 3.21) и фиксируется положение ПС1;

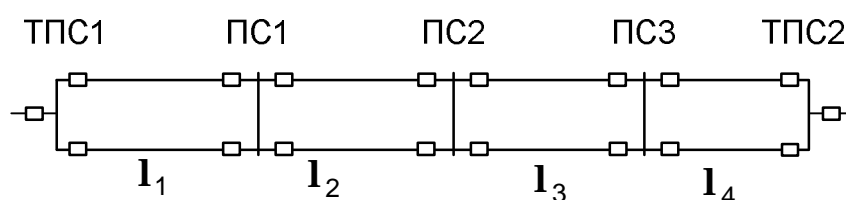


Рис. 3.21. Схема межподстанционной зоны с тремя ПС

- 4) по диаграммам определения местоположения ПС определяются уставки защит фидеров ТПС1 и ПС2 в сторону ТПС1;
- 5) по тем же диаграммам, при фиксированном положении ПС2, определяется возможный диапазон положения ПС3 на участке ПС2–ТПС2;
- 6) выбирается наиболее удобное значение отношения  $l_3 / l_2$  (рис. 3.21) и фиксируется положение ПС3;
- 7) по диаграммам определяются уставки защит фидеров ТПС2 и ПС1 в сторону ТПС2;
- 8) в случае, если хотя бы для одной защиты не выполняется условие  $Z_{сзз}(\alpha) \leq \frac{Z_{нmin}(\alpha)}{K_0}$ , необходимо изменить положение ПС1 и ПС3 и повторить операции по пп. 3–7.

### 3.3.3. Определение мест установки четырех постов секционирования на межподстанционной зоне

Порядок определения местоположения четырех ПС на межподстанционной зоне длиной 100 км следующий (рис. 3.22):

- 1) ПС2–ПС3, расстояние между которыми должно быть не менее 10 км, устанавливаем произвольно;
- 2) определяем длины участков ТПС1–ПС2 ( $l_1 + l_2$ ), ТПС1–ПС3 ( $l_1 + l_2 + l_3$ ), ТПС2–ПС3 ( $l_4 + l_5$ ) и ТПС2–ПС2 ( $l_3 + l_4 + l_5$ );

2) по диаграммам определения местоположения ПС для известного расстояния от ТПС2 до ПС2 ( $I_3 + I_4 + I_5$ ) оценивается возможный диапазон изменения положения ПС1;

3) с точки зрения привязки к станции выбирается наиболее удобное значение отношения  $I_1 / I_2$  (рис. 3.22) и фиксируется положение ПС1;

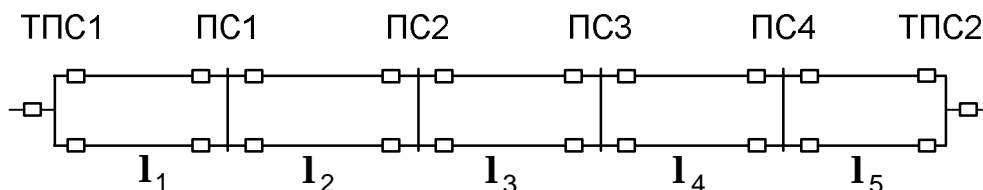


Рис. 3.22. Схема межподстанционной зоны с четырьмя ПС

4) по диаграммам определения местоположения ПС определяются уставки защит фидеров ТПС1 и ПС2 в сторону ТПС1;

5) по тем же диаграммам при фиксированном положении ПС2 и ПС3, для известного расстояния от ТПС1 до ПС3 ( $I_1 + I_2 + I_3$ ) определяется возможный диапазон изменения положения ПС4;

6) выбирается наиболее удобное значение отношения  $I_5 / I_4$  (рис. 3.22) и фиксируется положение ПС4;

7) по диаграммам определяются уставки защит фидеров ТПС2 и ПС3 в сторону ТПС2.

8) в случае, если хотя бы для одной защиты не выполняется условие  $Z_{сз3}(\alpha) \leq \frac{Z_{нmin}(\alpha)}{K_0}$ , необходимо, не меняя местоположение ПС2 и ПС3 изменить соотношение  $I_1 / I_2$  для ПС1 и  $I_5 / I_4$  для ПС3 и повторить операции по пп. 2–7.

Уставки третьих ступеней защит ПС, которые не были рассчитаны графически, определяются по методике, приведенной в разд. 2.

Рассмотрим пример применения методики определения мест положения постов секционирования на межподстанционной зоне. При этом используем фидерную зону длиной 94,6 км. На межподстанционной зоне запланирована установка трех ПС. Предположим, что размещение среднего ПС в середине зоны невозможно по ряду причин, и место его установки определено на расстоянии 34 км от ТПС1 (рис. 3.23).

Как уже было отмечено ранее, выполнить защиту межподстанционной зоны такой длины при установке на ней одного ПС практически невозможно. В разд. 2 была описана подобная ситуация на реальном участке, когда в работе находится только один ПС. Также было отмечено, что для построения эффективной системы защиты такого участка необходимо применение трех или четырех постов.

Рассмотрим пример расстановки трех постов на данной зоне. Оставим местоположение ПС2 неизменным.

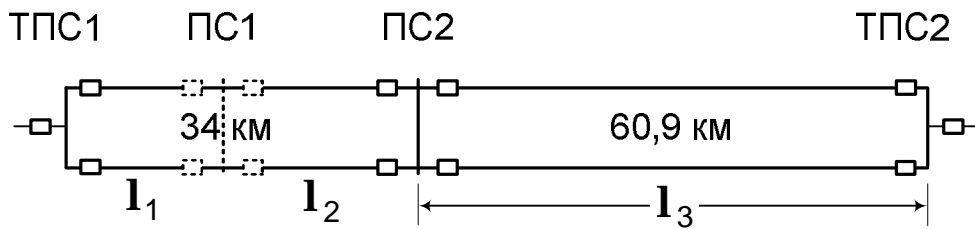


Рис. 3.23. Схема рассматриваемой межподстанционной зоны

Из диаграмм на рис. 3.24 и 3.25 видно, что при  $I_3$ , равном 60 км, диапазон изменения положения ПС1 определяется как  $I_1 / I_2 = 0,3-3,0$ . Как мы видим из рис. 3.24 и 3.25, сопротивление срабатывания третьих ступеней меньше минимальных сопротивлений нагрузки, т. е. при установке ПС1 в указанном диапазоне защиты будут надежно отстроены от нагрузочной области.

Поскольку минимальное расстояние между смежными постами (или шинами постов и подстанций) следует принимать не менее 10 км (разд. 2), то можно установить ПС1 на расстоянии 20 км от ТПС1 (считаем, что именно при таком положении ПС1 возможна привязка его к ж.-д. станции).

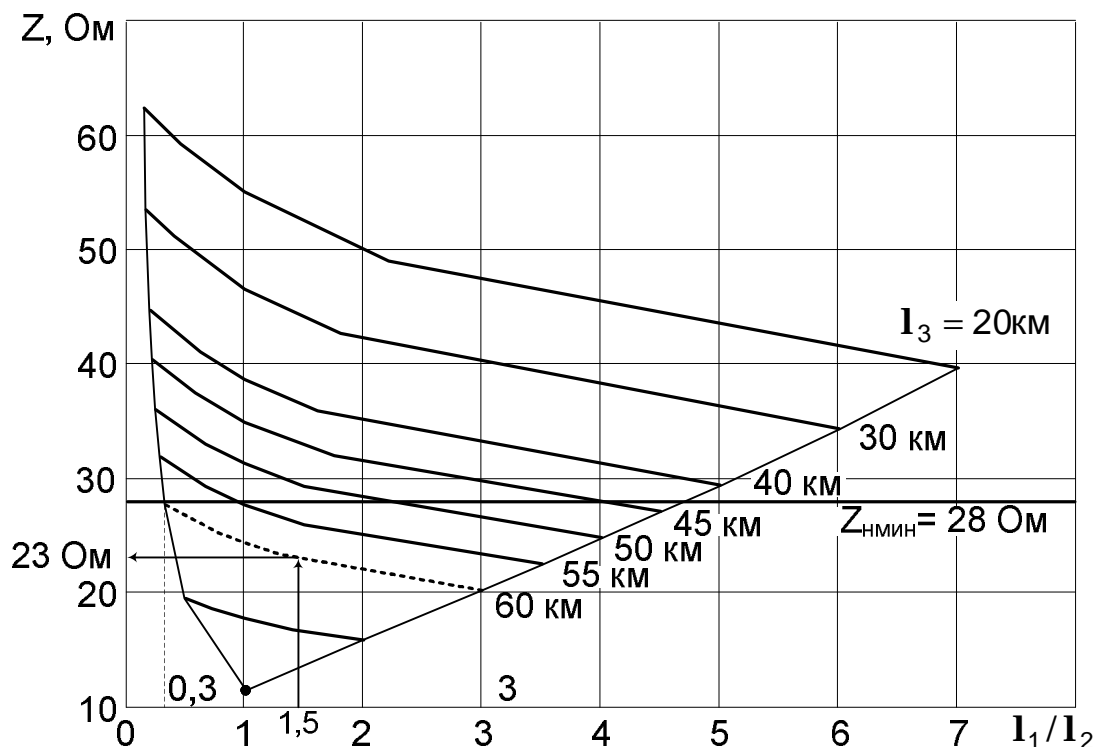


Рис. 3.24. Определение местоположения ПС1 и уставок третьей ступени ДНЗ фидеров ТПС1

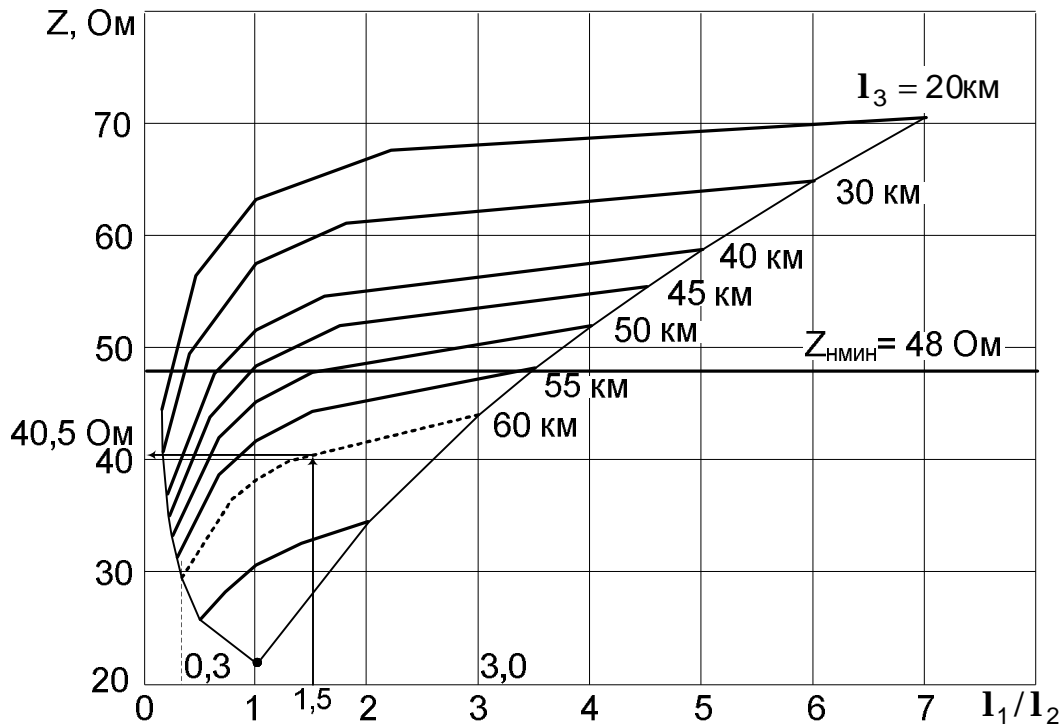


Рис. 3.25. Определение местоположения ПС1 и уставок третьей ступени ДНЗ фидеров ПС2 (в сторону ТПС1)

Отношение  $I_1/I_2$  при принятом положении ПС1 равно  $20/14 = 1,5$ . По диаграммам на рис. 3.24 и 3.25 для выбранного положения ПС1 определяем уставки третьих ступеней ДЗ фидеров ТПС1 и ПС2 в сторону ТПС1. Они равны: для фидеров ТПС1 – 23 Ом, а для ПС2 (в сторону ТПС1) – 40,5 Ом.

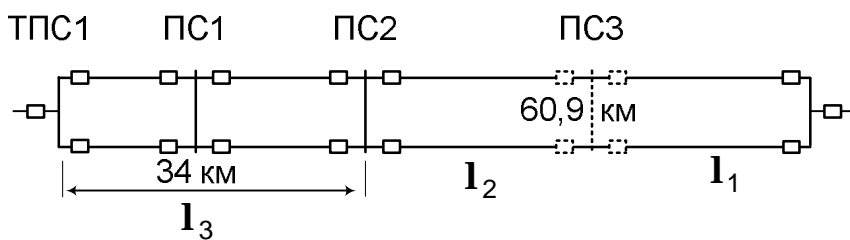


Рис. 3.26. Схема для определения местоположения ПС3

Далее определяем положение ПС3, для чего расстояние от ТПС1 до ПС2 (равного 34 км) принимаем за  $I_3$ . По диаграммам на рис. 3.27 и 3.28 определяем границы допустимого диапазона установки ПС3, аналогично рассмотренному выше примеру.

Как мы видим из рис. 3.27 и 3.28, при любом положении ПС3 сопротивления срабатывания ДНЗ3 больше допустимого сопротивления по нагрузке. Следовательно, обеспечить защиту при установке на участке ПС2–ТПС2 только одного поста секционирования невозможно.

Таким образом, для обеспечения эффективной защиты тяговой сети рассматриваемого участка необходима установка четырех постов секционирования, местоположение которых также может быть определено по предложенной методике.

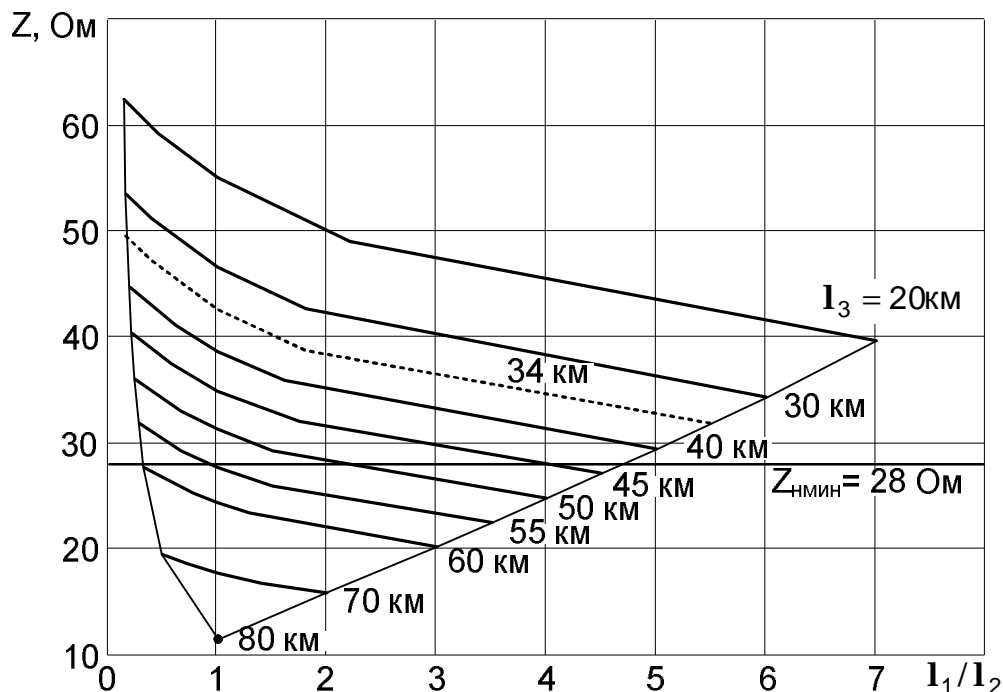


Рис. 3.27. Определение местоположения ПС3 и уставок третьей ступени Д3 фидеров ТПС2

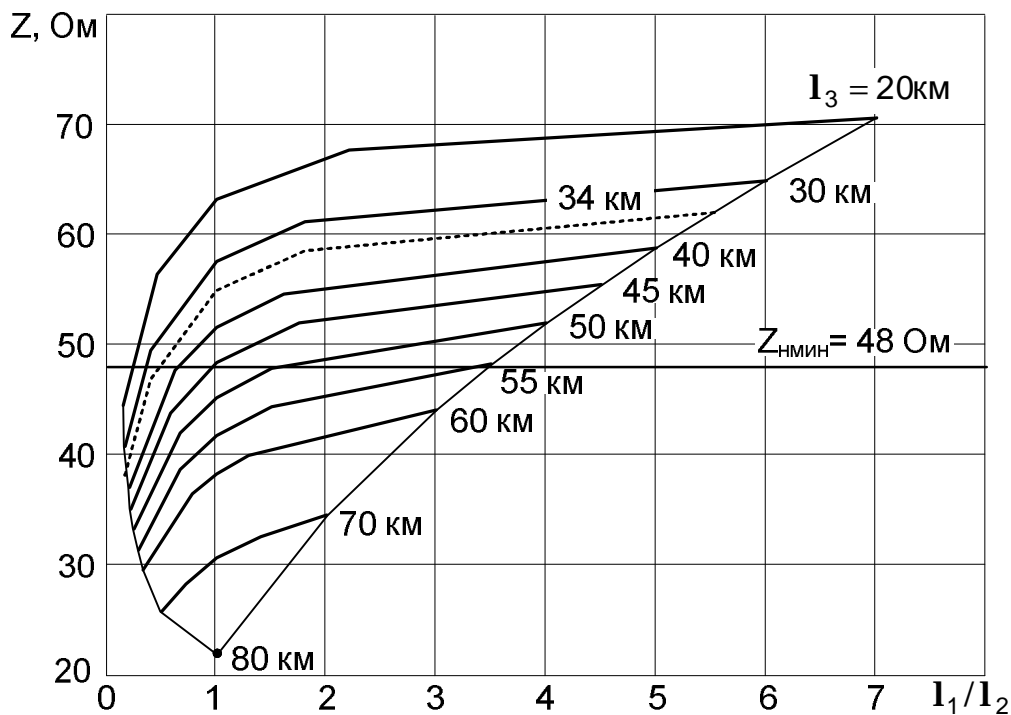


Рис. 3.28. Определение местоположения ПС3 и уставок третьей ступени Д3 фидеров ПС2 (в сторону ТПС2)

Следует отметить, что неоспоримым преимуществом данной методики является то, что она позволяет находить не только местоположение ПС на зоне, а также определять уставки третьих ступеней ДНЗ фидеров тяговых подстанций и постов секционирования.

### 3.4. Исследование работы защит при секционировании контактной сети пунктами продольного секционирования

Стоимость поста секционирования с четырьмя вакуумными выключателями и аппаратурой защиты составляет порядка 8 млн. руб. (в ценах 2003 г.). При такой стоимости не всегда будет экономически выгодно устанавливать на зонах по три или четыре поста. В такой ситуации одним из возможных вариантов обеспечения защиты протяженной межподстанционной зоны будет являться установка пункта продольного секционирования (ППРС). ППРС имеет только один выключатель, что значительно снижает его стоимость, упрощает монтаж и позволяет устанавливать ППРС там, где установка ПС невозможна.

Рассмотрим, как повлияет установка на межподстанционной зоне четырех ППРС на условия функционирования защит тяговой сети. Расчетная схема приведена на рис. 3.29.

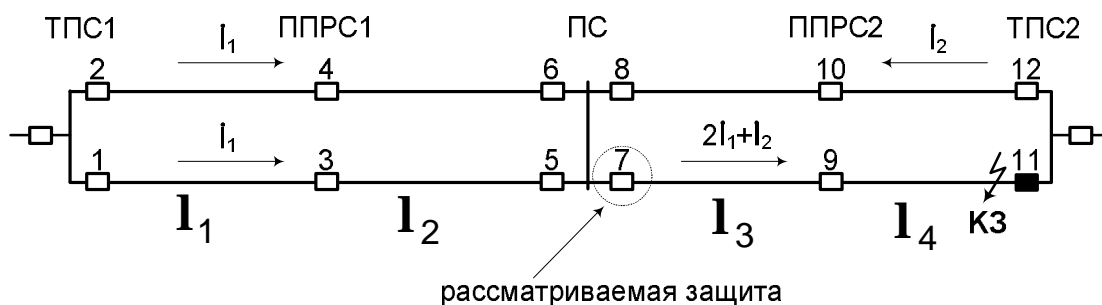


Рис. 3.29. Схема секционирования тяговой сети с ППРС

Исследуем работу защиты 7 (рис. 3.29) при КЗ в конце резервируемой зоны, отказе защиты 9 и отключении выключателя 11.

Напряжения на шинах ПС можно определить по выражению:

$$U_{\text{ПС}} = (2f_1 + f_2)Z_{21}(I_3 + I_4) - f_2 \cdot Z_m(I_3 + I_4) + (2f_1 + f_2)R_{\text{п}}, \quad (3.16)$$

Входное сопротивление, измеряемое защитой 7, будет определяться по выражению

$$Z_{\text{вх}7} = Z_{21}(I_3 + I_4) + R_{\text{д}} - \frac{f_2}{2f_1 + f_2} Z_m(I_3 + I_4), \quad (3.17)$$

Соотношение токов  $I_1$  и  $I_2$  можно определить по (2.22):

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{2Z_{s1} + Z_{22}(I_1 + I_2) + 2Z_M(I_3 + I_4)}{Z_{s2} + Z_{-22}(I_3 + I_4)}, \quad (3.18)$$

откуда

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{2Z_{s1} + Z_{22}(I_1 + I_2) + 2Z_M(I_3 + I_4)}{Z_{s2} + Z_{-22}(I_3 + I_4)}. \quad (3.19)$$

Из выражения (3.17) видно, что ток подпитки КЗ со стороны ТПС2 оказывает размагничивающее действие на ток фидера 7, что снижает входное сопротивление при КЗ, улучшая условия функционирования защиты ПС.

То же самое можно сказать и про защиты фидеров тяговых подстанций. При КЗ в конце резервируемой зоны (т. е. на шинах ПС) подпитка со стороны смежной подстанции не будет оказывать влияния на входные сопротивления защит фидеров ТПС. Поэтому для защит ТПС самым тяжелым режимом будет КЗ на шинах ПС при подмагничивающем действии тока в подвеске соседнего пути.

В целом установка на зоне ППРС положительно сказывается на условиях функционирования защит фидеров ТПС и ПС.

Особенностью защит на ППРС является то, что работать они должны в двух направлениях: в сторону подстанции и в сторону ПС. Из рис. 3.30 видно, что для защиты 3 основными зонами защиты будут участки  $I_1$  (1) и  $I_2$  (2), а резервируемыми – участки  $I_3$  (3) и  $I_2$  смежного пути (4). При повреждениях в резервируемых зонах появляется подпитка места КЗ от смежной подстанции. Подпитка КЗ со стороны ТПС2 будет увеличивать входные сопротивления защиты 3. Поэтому для расчета уставок ДНЗЗ защит ППРС, действующих в направлении ПС (рис. 3.30), необходимо пользоваться методикой, предложенной в разд. 2.

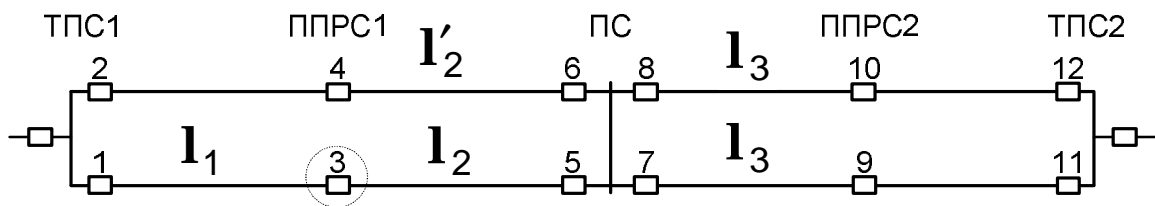


Рис. 3.30. Схема секционирования тяговой сети с ППРС

Рассмотрим параметры аварийного режима при различных точках КЗ и их влияние на входные сопротивления защиты 3 по схеме на рис. 3.31. За расчетную примем схему с одним постом секционирования и двумя ППРС. Длину межподстанционной зоны примем равной 100 км. ПС и ППРС расставлены равномерно, т. е. расстояние между ними 25 км. КЗ в основных и резервируемых зонах находится на различном удалении от



рассматриваемой защиты 3. Переходное сопротивление дуги в месте К3 принимаем равным 0, 0,5 и 1 Ом.

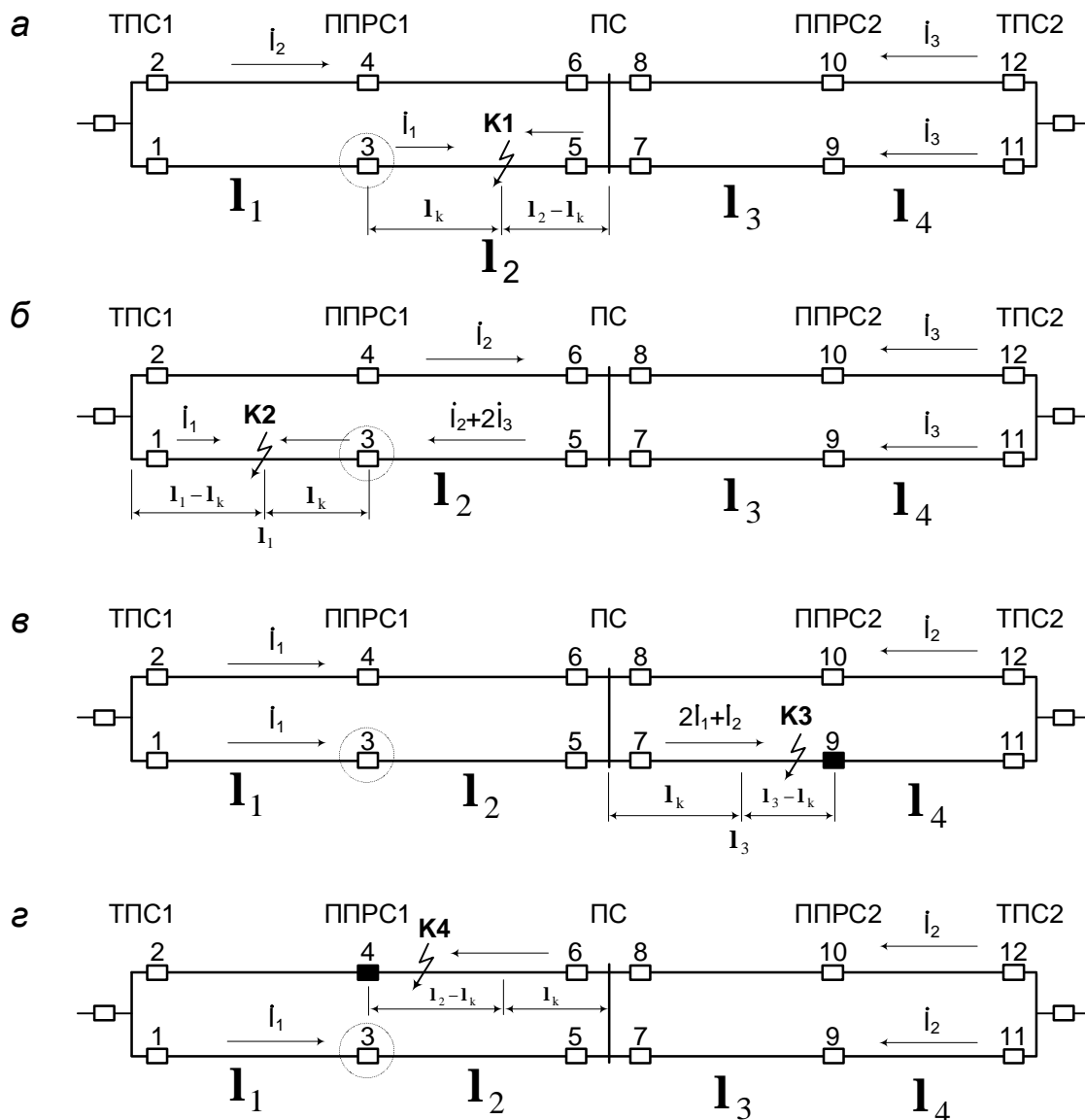


Рис. 3.31. Расчетные схемы аварийного режима для защиты 3:  
а, б, в, г – варианты расположения точек К3

Входные сопротивления защиты 3 для вариантов а–г точек К3 на рис. 3.31 определяются по выражениям:

$$Z_{\text{вхК1}} = z_{21} I_k + R_{\text{п}} + \frac{l_2}{l_1} (z_{\text{м}} I_k + R_{\text{п}}) + \frac{l_3}{l_1} 2R_{\text{п}}; \quad (3.20)$$

$$Z_{\text{вхК2}} = z_{21} I_k + R_{\text{п}} + \frac{l_1}{l_2 + 2l_3} R_{\text{п}} - \frac{l_2}{l_2 + 2l_3} z_{\text{м}} I_k; \quad (3.21)$$

$$\underline{Z}_{\text{вхК3}} = \underline{z}_{22} \mathbf{I}_2 + 2\underline{z}_{21} \mathbf{I}_k + 2R_{\text{п}} + \frac{f_2}{f_1} (\underline{z}_{-22} \mathbf{I}_k + R_{\text{п}}); \quad (3.22)$$

$$\underline{Z}_{\text{вхК4}} = \underline{z}_{21} \mathbf{I}_2 + \underline{z}_{-22} \mathbf{I}_k - \underline{z}_m \mathbf{I}_k + R_{\text{п}} + \frac{f_2}{f_1} (2\underline{z}_{-22} \mathbf{I}_k + 2R_{\text{п}}). \quad (3.23)$$

Значения токов, входящих в выражения (3.20) – (3.23), можно определить при помощи матричного метода

$$[\mathbf{I}] = [\mathbf{Z}]^{-1} \cdot [\mathbf{U}_H], \quad (3.24)$$

где  $[\mathbf{I}]$  – матрица токов;  $[\mathbf{Z}]$  – матрица сопротивлений,  $[\mathbf{U}_H]$  – матрица напряжений.

Матрицы сопротивлений для рассматриваемых на рис. 3.49, а–е случаев КЗ определяется по выражениям (3.25), (3.26), (3.27) и (3.28).

Результаты расчета по выражениям (3.20)–(3.28) в виде комплексной плоскости сопротивлений, измеряемых защитой 3 при различном положении точки КЗ в основных и резервируемых зонах, приведены на рис. 3.32.

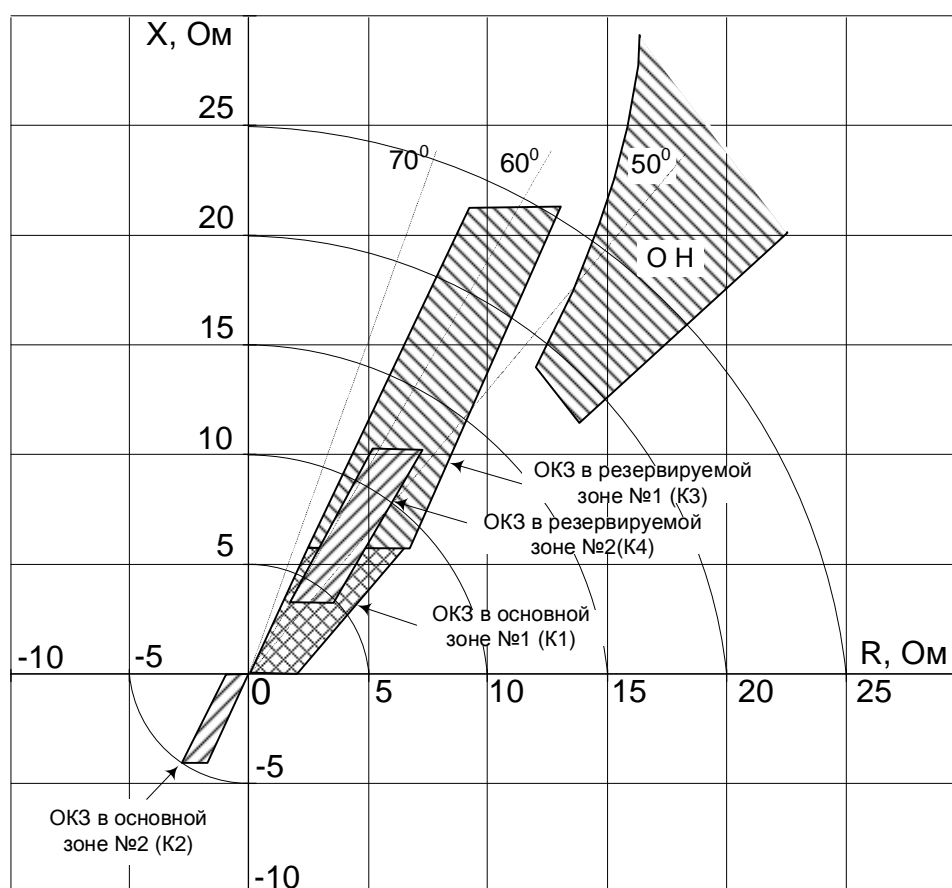


Рис. 3.32. Комплексная плоскость сопротивлений, измеряемых защитами ППРС при КЗ в основных и резервируемых зонах

$$\underline{Z}_1 = \begin{bmatrix} \underline{z}_{s1} + \underline{z}_{21}\mathbf{1}_1 + \underline{z}_{21}\mathbf{1}_k + R_n & \underline{z}_{s1} + \underline{z}_M\mathbf{1}_1 + \underline{z}_M\mathbf{1}_k + R_n & 2R_n \\ \underline{z}_{s1} + \underline{z}_M\mathbf{1}_1 + \underline{z}_M\mathbf{1}_k + R_n & \underline{z}_{s1} + \underline{z}_{21}(\mathbf{1}_1 + \mathbf{1}_2) - \underline{z}_M(\mathbf{1}_2 - \mathbf{1}_k) + \underline{z}_{-22}(\mathbf{1}_2 - \mathbf{1}_k) + R_n & 2\underline{z}_{-22}(\mathbf{1}_2 - \mathbf{1}_k) + 2R_n \\ R_n & \underline{z}_{-22}(\mathbf{1}_2 - \mathbf{1}_k) + R_n & 2\underline{z}_{s2} + \underline{z}_{22}(\mathbf{1}_3 + \mathbf{1}_4) + 2\underline{z}_{21}(\mathbf{1}_2 - \mathbf{1}_k) + 2R_n \end{bmatrix}; \quad (3.25)$$

$$\underline{Z}_2 = \begin{bmatrix} \underline{z}_{s1} + \underline{z}_{21}(\mathbf{1}_1 - \mathbf{1}_k) + R_n & \underline{z}_{s1} + \underline{z}_M(\mathbf{1}_1 - \mathbf{1}_k) + R_n & 2R_n \\ \underline{z}_{s1} + \underline{z}_M(\mathbf{1}_1 - \mathbf{1}_k) + R_n & \underline{z}_{s1} + \underline{z}_{21}(\mathbf{1}_1 + \mathbf{1}_2) + \underline{z}_{-22}(\mathbf{1}_2 + \mathbf{1}_k) - \underline{z}_M(\mathbf{1}_2 + \mathbf{1}_k) + R_n & 2\underline{z}_{-22}(\mathbf{1}_2 + \mathbf{1}_k) + 2R_n \\ R_n & \underline{z}_{-22}(\mathbf{1}_2 + \mathbf{1}_k) + R_n & 2\underline{z}_{s2} + \underline{z}_{22}(\mathbf{1}_3 + \mathbf{1}_4) + 2\underline{z}_{21}(\mathbf{1}_2 + \mathbf{1}_k) + 2R_n \end{bmatrix}; \quad (3.26)$$

$$\underline{Z}_3 = \begin{bmatrix} 2\underline{z}_{s1} + \underline{z}_{22}(\mathbf{1}_1 + \mathbf{1}_2) + 2\underline{z}_{21}\mathbf{1}_k + 2R_n & \underline{z}_{-22}\mathbf{1}_k + R_n \\ 2\underline{z}_{-22}\mathbf{1}_k + 2R_n & \underline{z}_{s2} + \underline{z}_{21}(\mathbf{1}_3 + \mathbf{1}_4) + \underline{z}_{-22}\mathbf{1}_k - \underline{z}_M\mathbf{1}_k + R_n \end{bmatrix}; \quad (3.27)$$

$$\underline{Z}_4 = \begin{bmatrix} \underline{z}_{s1} + \underline{z}_{21}(\mathbf{1}_1 + \mathbf{1}_2) + \underline{z}_{-22}\mathbf{1}_k - \underline{z}_M\mathbf{1}_k + 2R_n & 2\underline{z}_{-22}\mathbf{1}_k + 2R_n \\ \underline{z}_{-22}\mathbf{1}_k + R_n & 2\underline{z}_{s2} + \underline{z}_{22}(\mathbf{1}_3 + \mathbf{1}_4) + 2\underline{z}_{21}\mathbf{1}_k + 2R_n \end{bmatrix}. \quad (3.28)$$

Как видно из рис. 3.32, при наличии на межподстанционной зоне протяженностью 100 км одного ПС и двух ППРС обеспечивается отстройка УХС защиты от нагрузочной области, что невозможно сделать при наличии трех ПС на зоне такой же длины.

Поскольку все ППРС будут работать в одинаковых условиях, то характеристику защиты на ППРС можно построить так, что одним комплектом защиты захватить КЗ во всех защищаемых зонах.

На рис. 3.33 представлена возможная УХС такого комплекта защиты, устанавливаемого на ППРС.

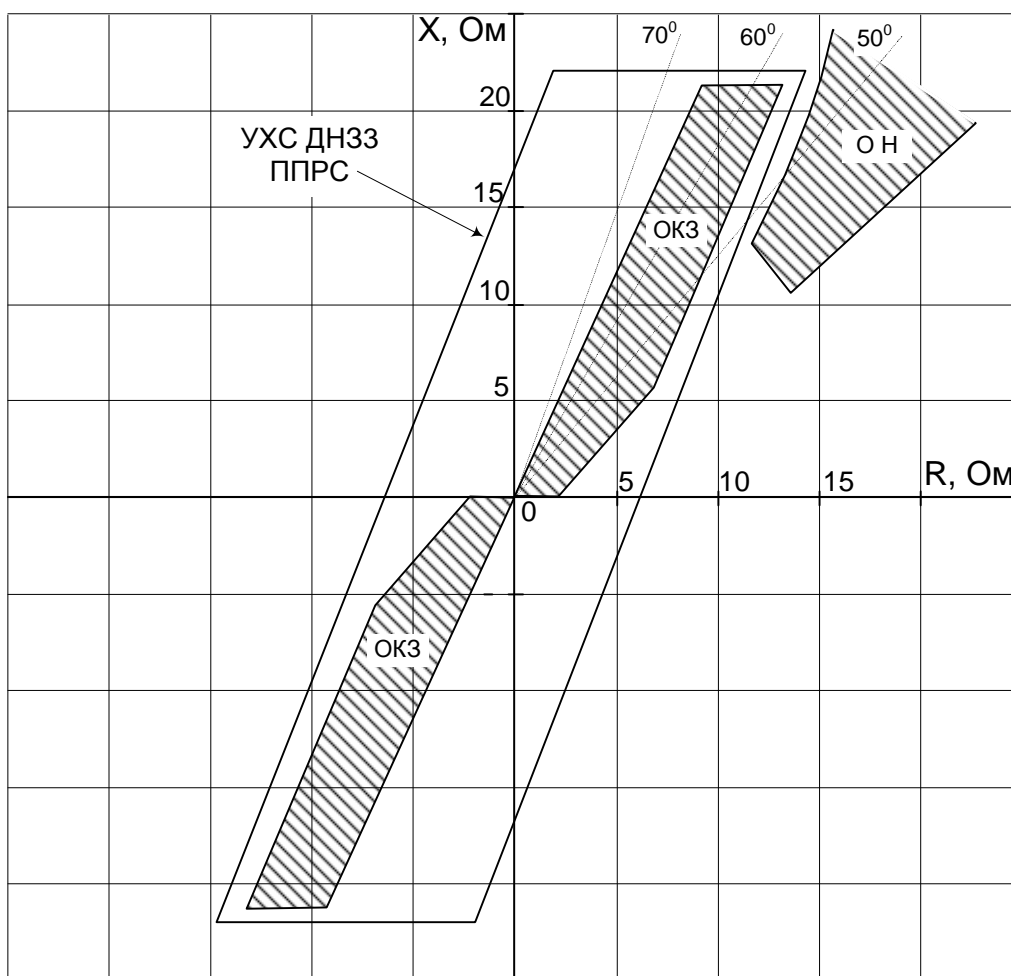


Рис. 3.33. УХС предполагаемого комплекта защиты для ППРС

Такая характеристика сделает комплект универсальным, что позволит устанавливать его на любом ППРС, и исключит необходимость проверки защиты по направлению действия.

Естественно, что схема секционирования с ППРС не обладает оперативной гибкостью схемы с ПС. Тем не менее ППРС могут оказаться незаменимыми там, где установка требуемого количества ПС невозможна по ряду причин. При этом ППРС облегчат условия работы защит ПС и ТПС.

### 3.5. Определение экономической эффективности применения многократного продольного секционирования

В соответствии с [14, 28, 29, 30] внедрение инноваций должно, в первую очередь, обеспечивать улучшение качества и повышение эффективности перевозочного процесса.

Известны случаи, когда при повреждениях в контактной сети защиты фидеров недостаточно быстро производили отключение КЗ или вообще отказывали, что приводило к пережогу КП и необходимости восстановления работоспособности КС. Нередко отжиг КП сопровождался обрывом его движущимся ЭПС. В таких случаях восстановлению подлежала контактная подвеска на целом анкерном участке, протяженностью до 1,5 км. Естественно, что это приводило к перерыву в движении поездов до нескольких часов. Такие случаи не единичны, и на их примере можно показать преимущества многократного продольного секционирования тем более, что по данным [1] на электрифицированных дорогах РФ каждый год происходит от 8 до 24 отказов устройств релейной защиты. Так, в 2002 г. на ДВостЖД зафиксировано 2 случая отказа защит контактной сети.

В случаях, когда время отключения питания определяется действием автоматики фидеров КС (т. е. КЗ неустойчивое), ущерб будет определяться затратами от перерыва движения поездов.

В том случае, если КЗ сопровождается повреждением КС, ущерб будет определяться двумя составляющими: ущербом от перерыва движения поездов и затратами на восстановление поврежденных устройств КС.

Время задержки поездов определяется по формуле [22]

$$t = t_0 + \tau_B, \quad (3.29)$$

где  $t_0$  – время освобождения перегона от «растянувшихся» поездов, мин.;  
 $\tau_B$  – время восстановления питания контактной сети, мин.

Потери поездо-часов, ч, при этом будут равны [22]:

$$\sum Nt = \frac{t^2}{120 \cdot \Theta_{cp}}, \quad (3.30)$$

где  $\Theta_{cp}$  – средний интервал попутного следования между поездами, мин.

Число поездов, остановленных на подъемах, можно определить по выражению

$$N_p = P_p \frac{60 I_y}{v_{cp} \Theta_{cp}}, \quad (3.31)$$

где  $l_y$  – длина отключенного участка КС, км;  $P_p$  – вероятность нахождения поезда на подъеме к моменту КЗ на участке  $l_y$ ;  $v_{cp}$  – среднеучастковая скорость движения по межподстанционной зоне, км/ч.

Для вытягивания «растянувшихся» поездов потребуется привлечение дополнительных локомотивов. Потери локомотивочасов, ч, в этом случае будут иметь вид:

$$\sum Mt = N_p \cdot t_{техн}, \quad (3.32)$$

где  $t_{техн}$  – средняя технологически необходимая норма на операции, связанные с подготовкой локомотива, находящегося в резерве следования с поездом и обратной постановкой локомотива в резерв, принимается равной 0,7 час на один «растянувшийся» поезд.

Для каждого конкретного случая  $t_{техн}$  будет зависеть от параметров СТЭ, размеров движения и т. д.

Вероятность нахождения поезда на подъеме определяется по выражению [22]:

$$P_p = \frac{\sum l_{под}}{l_y}, \quad (3.33)$$

где  $\sum l_{под}$  – суммарная длина подъемов на участке  $l_y$ , км.

Ущерб от простоя поездов в этом случае следующий [22]:

$$Y'_n = P(m) [\sum Nt (0,7 \Theta_{гп} + 0,3 \Theta_{пп}) + \sum Mt \cdot \Theta_n + N \cdot \Theta_o], \quad (3.34)$$

где  $P(m)$  – вероятность нахождения на участке  $m$  поездов к моменту КЗ;  $\Theta_o$  – приведенные затраты на одну остановку поезда, руб./ч;  $N$  – число остановленных поездов;  $\Theta_{гп}$  – приведенные затраты на 1 поезд-ч грузового поезда, руб./ч;  $\Theta_{пп}$  – приведенные затраты на 1 поезд-ч пассажирского поезда, руб./ч.

В выражении (3.34) величины 0,7 и 0,3 это доли грузовых и пассажирских поездов соответственно от общего числа остановленных поездов.

Вероятность нахождения на участке секционирования  $m$  поездов при равномерном графике движения можно считать равной 1.

По данным [1] приведенные затраты от простоя поездов равны: 1320 руб./поездо-ч для грузовых поездов и 3129,7 руб/поездо-ч для пассажирских поездов. Приведенные затраты на одну остановку поезда равны 300 руб.

Число остановленных поездов за время перерыва в движении можно определить как

$$N = \frac{t}{\Theta_{cp}}. \quad (3.35)$$

Затраты на восстановление работоспособности поврежденного участка КС определяются стоимостью работ бригад и механизмов и стоимостью материалов.

Затраты, связанные с работой восстановительной бригады, можно определить по формуле

$$C_{\bar{6}} = C_M \cdot t_1 + n \cdot \sum_{i=1}^m C_{ip} \cdot t_1, \quad (3.36)$$

где  $C_M$  – стоимость одного часа работы моторисы, руб./ч;  $C_{ip}$  – стоимость одного часа работы члена восстановительной бригады  $i$ -го разряда, руб./ч;  $m$  – число членов бригады;  $n$  – начисления на заработную плату,  $n = 1,359$ .

По данным, предоставленным службой электроснабжения ДВостЖД, в состав восстановительных бригад включаются: электромеханик 9-го разряда (81,14 руб./ч), электромонтер 5-го разряда (52,64 руб./ч), электромонтер 4-го разряда (48,30 руб./ч). Стоимость работы автомоторисы 515,98 руб./ч.

Стоимость материалов для восстановления контактной подвески определяется как

$$C_{\text{мат}} = \sum_i C_i \cdot n_i, \quad (3.37)$$

где  $C_i$  – стоимость единицы измерения материалов, руб.;  $n_i$  – число единиц  $i$ -го материала.

Стоимость контактного провода МФ-100 – 67031,46 руб./т, провода ПБСМ-95 – 94657,00 руб./т.

Определим затраты при повреждениях в КС и перерыве движения для двух вариантов секционирования участка КС длиной 60 км. Первый вариант – один ПС посередине, второй – два ПС с равномерной установкой на межподстанционной зоне. В обоих случаях эксплуатируется контактная подвеска типа – КП+НТ (рис. 3.34).

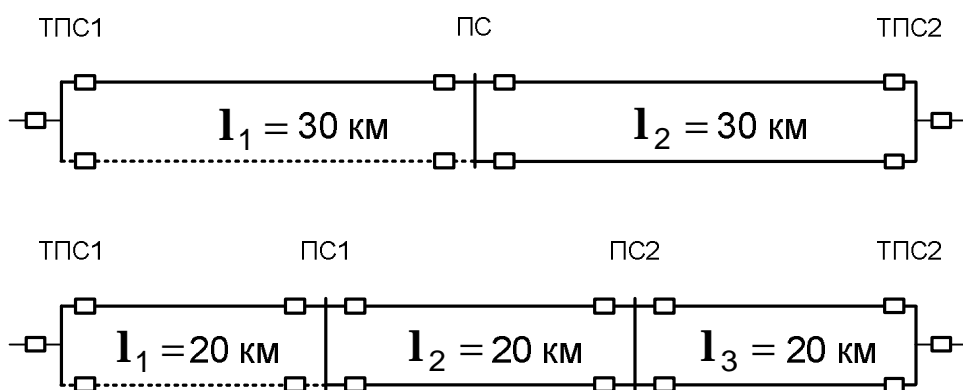


Рис. 3.34. Варианты секционирования КС на межподстанционной зоне длиной 60 км

Рассчитаем потери от простоя поездов при неустойчивом КЗ. В этом случае время восстановления питания определяется временем действия АПВ. Перерыв в движении определяется временем освобождения перегона от «растянувшихся» поездов.

### Для межподстанционной зоны с одним ПС (рис. 3.34, а)

Число поездов, остановленных на подъеме, после восстановления питания в КС в соответствии с (3.31) имеет вид:

$$N'_p = 0,5 \cdot \frac{60 \cdot 30}{50 \cdot 8} \approx 3.$$

Вероятность нахождения поезда на подъеме принимаем равным 0,5.

Тогда потери локомотивочасов на вытяжку трех поездов, оказавшихся на подъеме, в соответствии с (3.32):

$$\sum Mt' = 3 \cdot 0,7 = 2,1 \text{ локом.-ч.}$$

По этому времени определим потери по (3.30):

$$\sum Nt' = \frac{2,1^2}{120 \cdot 8} = 16,5 \text{ поездо-ч.}$$

Ущерб от простоя поездов в этом случае определится по (3.33):

$$Y'_n = [16,5 \cdot (0,7 \cdot 1,32 + 0,3 \cdot 3,13) + 2,1 \cdot 1,0 + 3 \cdot 0,3] = 33,74 \text{ тыс. руб.}$$

### Для межподстанционной зоны с двумя ПС (рис. 3.34, б)

Число поездов, остановленных на подъеме, после восстановления питания в КС в соответствии с (3.31) следующее:

$$N''_p = 0,5 \cdot \frac{60 \cdot 20}{50 \cdot 8} \approx 2.$$

Потери локом.-ч на вытяжку двух поездов, оказавшихся на подъеме, в соответствии с (3.32):

$$\sum Mt'' = 2 \cdot 0,7 = 1,4 \text{ локом.-ч.}$$

По этому времени определим потери поездо-часов по (3.30):

$$\sum Nt'' = \frac{1,4^2}{120 \cdot 8} = 7,35 \text{ поездо-ч.}$$

Ущерб от простоя поездов в этом случае определится по (3.33):

$$Y''_n = [7,35 \cdot (0,7 \cdot 1,32 + 0,3 \cdot 3,13) + 1,4 \cdot 1,0 + 2 \cdot 0,3] = 15,7 \text{ тыс. руб.}$$

Как видно из расчетов, при секционировании КС двумя постами секционирования ущерб от простоя поездов уменьшается на 18,04 тыс. руб., т. е. снижается практически в 2 раза.



В случае устойчивого КЗ время восстановления питания увеличивается и зависит от степени повреждения элементов контактной подвески.

Проведем расчет времени и стоимости восстановления работоспособности контактной подвески на анкерном участке длиной 1,5 км.

В соответствии с [13] время раскатки 1,5 км несущего троса в седла бригадой в составе 5 человек равно 2,4 часа. Время раскатки 1,5 км контактного провода бригадой из 6 человек равно 1,8 часов. Помимо этого, в состав работ входят анкеровка подвески по обоим концам участка и монтаж контактной подвески. Время одной анкеровки бригадой из 6 человек равно 1,65 ч. При этом суммарное время восстановления контактной подвески анкерного участка составляет приблизительно 5 часов.

Тогда, в соответствии с (3.36) общие затраты, связанные с работой восстановительных бригад, будут следующие:

$$C_6 = 799 \cdot 2,4 + 799 \cdot 1,8 + 847,3 \cdot 3,3 = 6151,89 \text{ руб.}$$

Стоимость материалов, тыс. руб., в соответствии с (3.37):

$$C_{\text{мат}} = C_{\text{кп}} \cdot I_{\text{ау}} + C_{\text{нт}} \cdot I_{\text{ау}} + C_{\text{др}},$$

где  $C_{\text{кп}}$  – стоимость 1 км контактного провода, тыс. руб.;  $C_{\text{нт}}$  – стоимость одного километра несущего троса, тыс. руб.;  $C_{\text{др}}$  – стоимость других элементов контактной подвески, поврежденных и требующих замены, принимается равным 10 % от стоимости проводов, тыс. руб.;  $I_{\text{ау}}$  – длина анкерного участка, км.

$$C_{\text{мат}} = (67,0 \cdot 1,5 + 94,7 \cdot 1,5) \cdot 1,1 = 266,805.$$

Суммарные затраты на восстановление работоспособности контактной подвески:

$$C_{\text{вост}} = C_6 + C_{\text{мат}} = 6,152 + 266,805 \approx 273,0 \text{ тыс. руб.}$$

Естественно, что при таком повреждении меняется и время задержки поездов.

**Для межподстанционной зоны с одним ПС (рис. 3.34, а)**

Время восстановления питания в соответствии с (3.29):

$$t' = 2,1 + 5,0 = 7,1 \text{ ч.}$$

По этому времени определим потери по (3.30):

$$\sum Nt' = \frac{7,1^2}{120 \cdot 8} = 189 \text{ поездо-ч.}$$

Ущерб от простоя поездов в этом случае определится по (3.33):

$$Y'_n = [189 (0,7 \cdot 1,32 + 0,3 \cdot 3,13) + 2,1 \cdot 1,0 + 3 \cdot 0,3] = 355,11 \text{ тыс. руб.}$$

### Для межподстанционной зоны с двумя ПС (рис. 3.34, б)

Проведенные в разд. 2 исследования позволяют снизить вероятность отказа защит и уменьшить время отключения КЗ. Следовательно, для второго рассматриваемого варианта секционирования КС ущерб от перегрева контактной подвески можно исключить.

Тогда ущерб от простоя поездов по второму варианту (в случае применения разработанных мероприятий) не изменится  $У''_п = 15,7$  тыс. руб.

Приведенные затраты, тыс. руб. в год, по обоим предложенным вариантам следующие:

$$\mathcal{E} = C_э + E_n \cdot K + (У + C_{\text{вост}}), \quad (3.38)$$

где  $C_э$  – эксплуатационные расходы, принимаются равными 5,5 % от стоимости основного оборудования, тыс. руб.;  $K$  – капитальные затраты, тыс. руб.;  $E_n$  – нормированный коэффициент капитальных вложений, для устройств электроэнергетики принимается равным 0,12.

Капитальные затраты предполагаются только во втором случае в виде установки дополнительного поста секционирования. Стоимость поста секционирования с четырьмя вакуумными выключателями и его монтажа составляет около 8000 тыс. руб.

По данным [1] отключение питания КС (при неустойчивых КЗ) происходит не менее 1 раза в месяц, а повреждения, сопровождающиеся выходом из строя элементов контактной подвески, 1–2 раза в год.

Тогда приведенные затраты по первому варианту с одним ПС (без капитальных вложений):

$$\mathcal{E}' = 0,055 \cdot 8000 + 0,12 \cdot 0 + [(355,11 + 273,0) \cdot 2 + (33,74 \cdot 12)] = 2101,1 \text{ тыс. руб.}$$

Приведенные затраты по второму варианту, с установкой дополнительного ПС, имеют вид:

$$\mathcal{E}'' = 0,055 \cdot 8000 \cdot 2 + 0,12 \cdot 8000 + (15,7 + 0) = 1855,7 \text{ тыс. руб.}$$

Как видно из проведенных расчетов, приведенные затраты по второму варианту меньше на 245,4 тыс. руб.

Следовательно, установка дополнительных постов секционирования экономически оправдана. Установка дополнительных ПС позволяет не только повысить безопасность движения поездов, но и снизить ущерб от задержек поездов и повреждений элементов контактной сети, составляющий порядка 300–400 тыс. руб./год, что также важно в современных экономических условиях.

По итогам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1) при проектировании новых участков электрифицированных ж.д. с протяженными межподстанционными зонами тяговая сеть должна иметь

многократное продольное секционирование, которое необходимо производить с помощью ПС с функционирующими защитами;

2) при определении количества постов секционирования на межподстанционной зоне необходимо учитывать параметры нормального режима работы СТЭ;

3) минимальное расстояние между смежными постами (или между подстанцией и ближайшим постом) должно составлять не менее 10 км;

4) местоположение выбранного числа постов секционирования определяется по предложенной методике с использованием диаграмм определения местоположения ПС для всех возможных режимов и параметров работы СТЭ;

5) первичные сопротивления срабатывания третьих ступеней ДНЗ фидеров подстанций и постов определяются по диаграммам для фиксированного положения ПС на межподстанционной зоне;

6) в случае невозможности монтажа ПС в месте, определенном по методике, необходимо устанавливать ППРС;

7) установка дополнительных ПС на межподстанционных зонах экономически оправдано и позволяет снизить ущерб от задержек поездов и повреждений КС на 300–400 тыс. руб./год, наряду с повышением безопасности движения.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В результате проведенных исследований были решены следующие теоретические и практические задачи, направленные на повышение эффективности работы защиты тяговой сети и обеспечения стабильного перевозочного процесса.

1. Произведен анализ угловых характеристик срабатывания защит фидеров контактной сети.

2. Обобщены результаты экспериментальных исследований работы защит в условиях эксплуатации действующих электрифицированных участков ж.д. переменного тока.

3. Выполнен анализ существующей методики расчета уставок защит фидеров контактной сети.

4. Произведено исследование влияния нормального и аварийного режимов работы системы тягового электроснабжения на условия функционирования защит.

5. Оценена эффективность применения продольного секционирования тяговой сети для обеспечения ее надежной защиты.

6. Разработана и предложена принципиально новая методика определения количества постов секционирования.

7. Разработана и предложена принципиально новая методика размещения постов секционирования на межподстанционной зоне.

8. Обоснована эффективность применения пунктов продольного секционирования для повышения надежности работы защит тяговой сети.

8. Даны рекомендации по организации защиты тяговой сети при многократном продольном секционировании.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анализ производственно-хозяйственной деятельности хозяйства электроснабжения за 2002 г. – М. : ЦЭ МПС, 2003. – 121 с.
2. Механизмы разупрочнения и разрушения контактного провода // Е.А. Карнаков [и др.] / Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов : сб. тр. третьей Всероссийской науч.-техн. конф. с международным участием. Т. 2. – Благовещенск : Изд-во Амурского государственного университета, 2003. – 406 с.
3. Пинчуков, П.С. Расчет надежности элементов электроэнергетических систем : метод. указания по решению задач / П.С. Пинчуков. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2006. – 24 с.: ил.
4. Правила устройства электроустановок. – СПб. : Изд-во ДЕАН, 2003. – 928 с.
5. Руководящие материалы по релейной защите систем тягового электроснабжения: нормативный документ / ОАО «РЖД», Департамент электрификации и электроснабжения. – М. : Трансиздат, 2005. – 216 с.
6. Фигурнов, Е.П. Релейная защита сетей тягового электроснабжения : учеб. пособие / Е.П. Фигурнов. – М. : Маршрут, 2006. – 272 с.
7. Дынькин, Б.Е. Аварийные режимы работы тяговых сетей переменного тока, основные причины отказов защит и мероприятий по повышению надежности защит тяговой сети / Б.Е. Дынькин // Тезисы докладов на науч.-техн. совете МПС (секция электрификации). – М. : МПС, 1989. – С. 4–6.
8. Автоматизация систем электроснабжения : учеб. для вузов ж.-д. транспорта / Ю.А. Жарков [и др.]; под ред. Н.Д. Сухопрудского. – М. : Транспорт, 1990. – 359 с.
9. Анищенко, В.А. Надежность систем электроснабжения : учеб. пособие / В.А. Анищенко. – Мн. : УП «Технопринт», 2001. – 160 с.
10. Бей, Ю.М. Тяговые подстанции : учебник для вузов ж.-д. транспорта / Ю.М. Бей, Р.Р. Мамошин, В.Н. Пупынин. – М. : Транспорт, 1986. – 319 с.
11. Современная защита фидеров тяговых сетей переменного тока / В.В. Белов [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. – № 6. – 2001. – С. 4–7.
12. Электронные устройства релейной защиты и автоматики в системах тягового электроснабжения / В.А. Быков [и др.]. – М. : Транспорт, 1974. – 304 с.
13. Ведомственные нормы и расценки на строительство, монтаж и ремонтно-строительные работы. Сб. VI: Электрификация железных дорог. Вып. 2: Монтаж контактной сети. – М. : Прейскурантиздат, 1987. – 71 с.
14. Волков, Б.А. Экономическая эффективность инвестиций на железнодорожном транспорте в условиях рынка / Б.А. Волков. – М. : Транспорт, 1996. – 191 с.
15. Дынькин, Б.Е. Комплексная система защиты и автоматики тяговых сетей / Б.Е. Дынькин // Тезисы докл. на межвуз. науч.-практ. конф. – Самара: СамИИТ, 1993. – С. 22–24.

16. Дынькин, Б.Е. Повышение надежности и эффективности релейных защит тяговых сетей переменного тока в условиях железных дорог Восточного региона / Б.Е. Дынькин. – Хабаровск : ХабИИЖТ, 1990. – 98 с.

17. Дынькин, Б.Е. Практический способ определения мест размещения пунктов параллельного соединения при усилении тяговой сети / Б.Е. Дынькин // Повышение эффективности электрического торможения электроподвижного состава на дорогах Сибири и Дальнего Востока : межвуз. сб. науч. тр. – Хабаровск : ХабИИЖТ, 1987. – С. 62–68.

18. Дынькин, Б.Е. Особенности защиты тяговой сети при нетиповых условиях электроснабжения / Б.Е. Дынькин // Вестник ВНИИЖТ. – 2001. – № 1. – С. 22–26.

19. Дынькин, Б.Е. Защита тяговых сетей переменного тока при разземлении опор контактной сети : монография / Б.Е. Дынькин. – Хабаровск , ДВГУПС, 1999. – 170 с.

20. Дынькин, Б.Е. О необходимости применения нескольких постов секционирования в тяговых сетях переменного тока / Б.Е. Дынькин // Усиление систем электроснабжения электрифицированных железных дорог : межвуз. сб. науч. тр. – Р. на/Д. : РИИЖТ, 1989. – С. 21–27.

21. Дынькин, Б.Е. Влияние продольного секционирования на надежность функционирования системы электроснабжения тяговой сети / Б.Е. Дынькин, А.К. Дорохов // Тезисы докл. на межвуз. науч.-практ. конф. – Самара : СамИИТ, 1993.

22. Дынькин, Б.Е. Влияние продольного секционирования на надежность обеспечения перевозочного процесса / Б.Е. Дынькин, С.Ю. Поступаев, А.К. Дорохов / Повышение безопасности движения на железных дорогах : сб. науч. тр. – Хабаровск : ХабИИЖТ, 1989. – С. 24–32.

23. Ефимов, А.В. Надежность и диагностика систем электроснабжения железных дорог : учеб. для вузов ж/д транспорта / А.В. Ефимов, А.Г. Галькин. – М. : УМК МПС России, 2000. – 512 с.

24. Котельников, А.В. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы / А.В. Котельников. – М. : Интекст, 2002. – 104 с.

25. Макашева, С.И. Влияние рекуперативного торможения на качество электрической энергии по напряжению и эффективность работы системы тягового электроснабжения : автореф. дис. канд. техн. наук. – Хабаровск : ДВГУПС, 2002. – 21 с.

26. Марквардт, К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К.Г. Марквардт. – М. : Транспорт, 1982. – 528 с.

27. Марквардт, К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К.Г. Марквардт. – М. : Транспорт, 1965. – 464 с.

28. Методические рекомендации по обоснованию эффективности инноваций на железнодорожном транспорте. – М.: МПС РФ НИИ тепловозов и путевых машин «Транспорт», 1999. – 230 с.

29. Методические рекомендации по определению экономического эффекта мероприятий научно-технического прогресса на ж.-д. транспорте. – М. : Транспорт, 1991.

30. Методические рекомендации по оценке инвестиционных проектов на ж.-д. тр-те. – М. : МПС РФ, 1998.

31. Правила устройства системы тягового электроснабжения железных дорог Российской Федерации. – М. : МПС РФ, 1997. – С. 78.

32. Пупынин, В.Н. Защита и отключение тяговых сетей в аварийных режимах : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М. : МГУПС, 1986. – 48 с.

33. Сердинов, С.М. Анализ работы и повышение надежности устройств энергоснабжения электрифицированных железных дорог / С.М. Сердинов. – М. : Транспорт, 1975. – 366 с.

34. Тихменев, Б.Н. Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями / Б.Н. Тихменев, В.А. Кучумов. – М. : Транспорт, 1988. – 311 с.

35. Фигурнов, Е.П. Защита электротяговых сетей переменного тока от коротких замыканий / Е.П. Фигурнов. – М. : Транспорт, 1979. – 160 с.

36. Фигурнов Е.П. О влиянии нагрузки электровозов со статическими преобразователями на релейную защиту фидеров / Е.П. Фигурнов // Тр. Ростовского-на-Дону ин-та инж. ж.-д. трансп. – Ростов на/Д, 1967. – Вып. 71. – С. 62–85.

37. Фигурнов, Е.П. Релейная защита устройств электроснабжения железных дорог / Е.П. Фигурнов. – М. : Транспорт, 1981. – 215 с.

38. Фигурнов, Е.П. Релейная защита : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / Е.П. Фигурнов. – М. : Желдориздат, 2002. – 720 с.

39. Якимов, Г.Б. Второе рождение электрификации / Г.Б. Якимов // Вестник ВНИИЖТ. – 2000. – № 1. – С. 36–39.

40. Funk H.W., Liebach Th., Schneerson E. PC – Tool für Schutzeinstellungen in Oberleitungsnetz. // Elektrische Bahnen. – 1999. – № 7.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ .....	4
1. РОЛЬ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ В СИСТЕМЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И ПЕРЕВОЗОЧНОМ ПРОЦЕССЕ .....	5
2. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЗАЩИТЫ ТЯГОВЫХ СЕТЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА .....	7
2.1. Характеристика комплектов защит, применяемых в тяговых сетях переменного тока .....	7
2.2. Экспериментальные исследования работы защит в условиях эксплуатации .....	10
2.3. Анализ типовой методики расчета защит тяговых сетей переменного тока .....	20
2.4. Исследование влияния режимов работы СТЭ на защиты тяговой сети .....	23
2.4.1. Влияние продольного секционирования на работу защит .....	23
2.4.2. Оценка влияния переходных сопротивлений в месте КЗ и формы УХС на ложные срабатывания защит .....	33
2.5. Исследование влияния параметров нормального режима на работу защит .....	36
2.6. Предложения по корректировке методики расчета защиты контактной сети .....	48
3. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ТЯГОВОЙ СЕТИ С МНОГОКРАТНЫМ ПРОДОЛЬНОМ СЕКЦИОНИРОВАНИЕМ.....	52
3.1. Исследование эффективности применения многократного продольного секционирования .....	52
3.2. Определение граничных условий размещения постов секционирования на межподстанционной зоне .....	57
3.3. Разработка методики размещения постов секционирования на межподстанционных зонах .....	72
3.3.1. Определение мест установки двух постов секционирования на межподстанционной зоне .....	73
3.3.2. Определение мест установки трех постов секционирования на межподстанционной зоне .....	74
3.3.3. Определение мест установки четырех постов секционирования на межподстанционной зоне .....	74
3.4. Исследование работы защит при секционировании контактной сети пунктами продольного секционирования .....	79
3.5. Определение экономической эффективности применения многократного продольного секционирования .....	85
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	92
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	93



Научное издание

**Пинчуков** Павел Сергеевич

**ЗАЩИТА СЕКЦИОНИРОВАННЫХ  
ТЯГОВЫХ СЕТЕЙ  
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Монография

Редактор *А.А. Иванова*  
Технический редактор *Н.В. Ларионова*

---

План 2010 г. Поз. 6.10.  
Подписано в печать 02.02.2010.  
Гарнитура Arial. Печать RISO. Усл. печ. л. 5,6.  
Зак. 28. Тираж 100 экз.

---

Издательство ДВГУПС  
680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47.