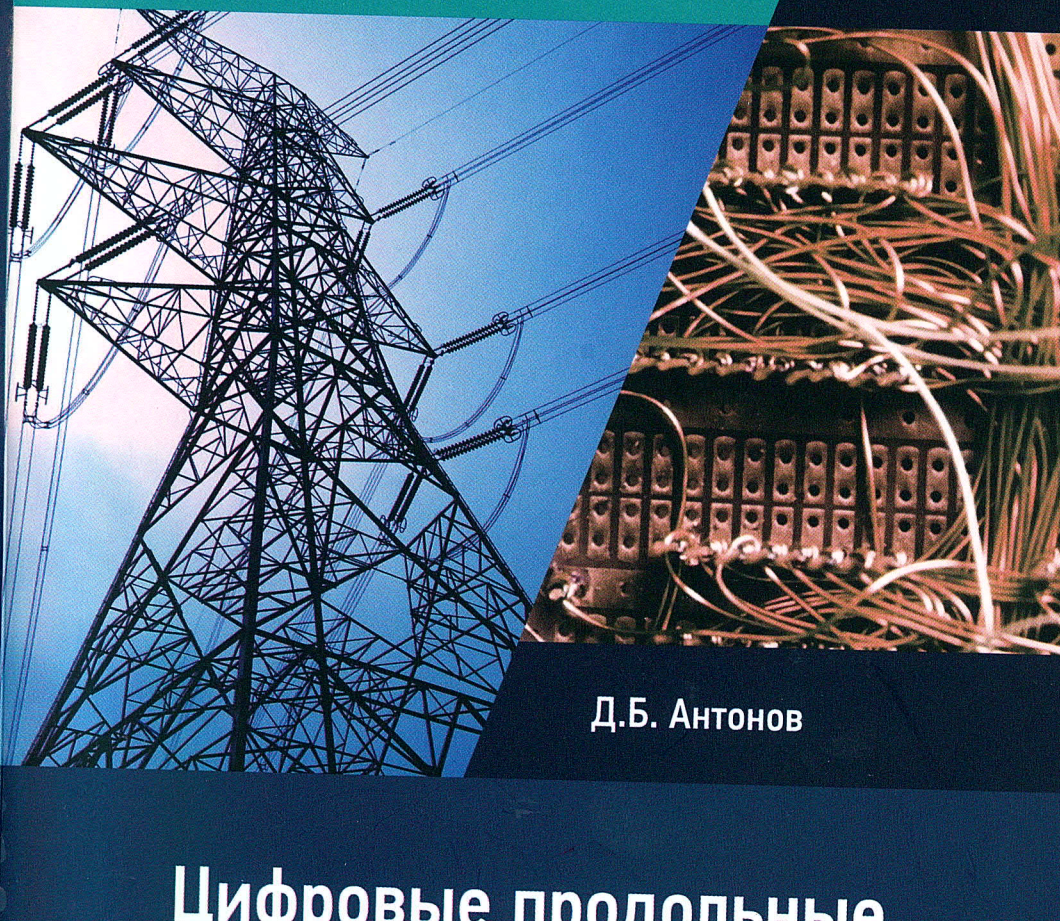


ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Учебное пособие



Д.Б. Антонов

# Цифровые продольные дифференциальные защиты линий электропередач





МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

---

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

---

**Д.Б. Антонов**

**ЦИФРОВЫЕ ПРОДОЛЬНЫЕ  
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ЗАЩИТЫ  
ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ**

**Принцип работы и выбор параметров  
срабатывания**

*Под редакцией А.Ф. Дьякова*

Допущено Учебно-методическим объединением вузов России по образованию в области энергетики и электротехники в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 140400 — «Электроэнергетика и электротехника», модуль «Электроэнергетика»

УДК 621.311  
А79

*Подготовлено на кафедре релейной защиты и автоматизации энергосистем*

Рецензенты: докт. техн. наук Б.К. Максимов,  
канд. техн. наук А.А. Акинин

**Антонов Д.Б.**

А79 Цифровые продольные дифференциальные защиты линий электропередач. Принцип работы и выбор параметров срабатывания / Д.Б. Антонов; под ред. А.Ф. Дьякова. — М.: Издательство МЭИ, 2012. — 84 с.: ил.

ISBN 978-5-7046-1376-3

Изложены общие сведения по выполнению дифференциальных защит линий, алгоритмам их функционирования, конструктивному выполнению терминалов, приведена методика расчета параметров срабатывания защит, даны примеры расчета.

Предназначено для студентов специальности «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем», изучающих устройства релейной защиты и автоматики электроэнергетических систем и методы проектирования их параметров срабатывания.

Пособие может быть полезным при выполнении курсового и дипломного проектирования, а также может найти применение при решении практических задач работниками энергосистем.

ISBN 978-5-7046-1376-3

© Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2012

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
<b>ГЛАВА ПЕРВАЯ. Основные понятия и принципы действия дифференциальной защиты линии .....</b>	<b>5</b>
1.1. Принцип действия продольной дифференциальной токовой защиты линии .....	5
1.2. Дифференциальная защита с торможением. Тормозные характеристики .....	7
1.3. Построение дифференциальной защиты линии с использованием цифровых каналов связи .....	14
1.4. Область применения и дополнительные возможности современных дифференциальных защит линий.....	15
1.5. Передача дополнительных сигналов между полукомплектами.....	24
1.6. Комплект ступенчатых защит в составе терминала дифференциальной защиты линии .....	24
Контрольные вопросы к главе 1 .....	25
<b>ГЛАВА ВТОРАЯ. Цифровые каналы связи для организации дифференциальной защиты линии .....</b>	<b>26</b>
2.1. Общие сведения .....	26
2.2. Выделенная волоконно-оптическая линия связи .....	28
2.3. Мультиплексированные цифровые сети.....	35
2.4. Информация, передаваемая по защитным каналам. Структура пакета данных.....	40
2.5. Способы синхронизации по времени полукомплектов дифференциальной защиты линии .....	42
2.6. Требования, предъявляемые к защитным каналам связи .....	46
Контрольные вопросы к главе 2 .....	48
<b>ГЛАВА ТРЕТЬЯ. Цифровое устройство дифференциальной защиты для линий 6—220 кВ «Сириус-2-ДЗЛ-01». Принцип работы и выбор параметров срабатывания .....</b>	<b>50</b>
3.1. Общие положения .....	50
3.2. Состав защит .....	52
3.3. Подключение цепей переменного тока.....	52
3.4. Ступень ДЗЛ-2 .....	53
3.5. Ступень ДЗЛ-3 .....	59
3.6. Расчет дифференциальной защиты линии .....	59
Контрольные вопросы к главе 3 .....	66
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....</b>	<b>67</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ.....</b>	<b>69</b>
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Сводная таблица уставок дифференциальной защиты линии устройства «Сириус-2-ДЗЛ-01».....	69
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Примеры расчета уставок дифференциальной защиты линии .....	71
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Интерфейс связи по стандарту IEEE C37.94 .....	81



## ВВЕДЕНИЕ

Дифференциальный принцип является наиболее совершенным из современных принципов выполнения устройств релейной защиты. Продольные дифференциальные защиты, обладая абсолютной селективностью, обеспечивают высокую чувствительность и малое время срабатывания.

Дифференциальный принцип широко используется для защиты территориально сосредоточенных объектов: силовых трансформаторов, генераторов, мощных двигателей, сборных шин и т.д. Использование дифференциального принципа для защиты распределенных объектов — воздушных и кабельных линий электропередач — традиционно ограничены сложностью передачи информации о токах с одного конца линии на другой. Поэтому распространение получили защиты абсолютной селективности с косвенным сравнением токов — дифференциально-фазные, высокочастотные направленные.

В настоящее время ситуация коренным образом изменилась. Переход устройств РЗА на микропроцессорную элементную базу, а также стремительное развитие и внедрение телекоммуникационных технологий привели к появлению нового типа защит — дифференциальных защит линий (ДЗЛ) с *цифровым каналом связи*. Использование данного типа защит на линиях высокого и сверхвысокого напряжений регламентируется нормативными документами [1, 2]. ДЗЛ призвано обеспечить основную защиту линий наряду с другими типами защит — дифференциально-фазными (ДФЗ) и ВЧ-направленными.

Эффективное внедрение ДЗЛ с цифровыми каналами связи требует понимания принципов ее работы, основ выбора уставок и организации цифрового канала. К сожалению, построение и использование ДЗЛ слабо отражены в отечественной литературе. Данное учебное пособие призвано, хотя бы частично, компенсировать данный пробел. В сжатой форме приводится информация о дифференциальном принципе, особенностях его реализации в цифровых защитах, дополнительных возможностях современных терминалов ДЗЛ. Большое внимание уделено материалу, посвященному особенностям организации цифровых каналов связи как неотъемлемой части системы защиты.

На примере ДЗЛ, выпускаемой фирмой ЗАО «РАДИУС Автоматика» [3], рассматриваются особенности реализации терминала, а также рекомендации по выбору уставок защиты.

Автор выражает искреннюю благодарность д.т.н., профессору Ивановского государственного энергетического университета Е.А. Аржанникову за ценные рекомендации и помощь при написании этой работы.

## ГЛАВА ПЕРВАЯ

# ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПРИНЦИПЫ ДЕЙСТВИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ЛИНИИ

### 1.1. Принцип действия продольной дифференциальной токовой защиты линии

Продольная дифференциальная токовая защита линии относится к защитам с абсолютной селективностью с непосредственным сравнением токов по концам защищаемого объекта.

Классическое выполнение продольной ДЗЛ известно с конца XIX столетия [4]. Принцип сборки токовых цепей для одной фазы показан на рис. 1.1. Трансформаторы тока  $TA1$  и  $TA2$ , расположенные на двух концах линии, объединяются соединительными проводами, а измерительный орган защиты — реле тока  $KA$  — включен в дифференциальную цепь защиты так, что ток в нем равен сумме фазных токов с двух сторон:

$$i_{\text{диф}} = i_1 + i_2. \quad (1.1)$$

Условные положительные направления первичных токов приняты от шин в линию. В нагрузочном режиме и при любом внешнем замыкании дифференциальный ток равен нулю (а с учетом погрешностей трансформаторов тока — току небаланса в дифференциальной цепи), и реле  $KA$  не срабатывает. При внутреннем КЗ сумма первичных токов двух сторон равна току КЗ, что приводит к появлению значительного тока в дифференциальной цепи и срабатыванию реле  $KA$ .

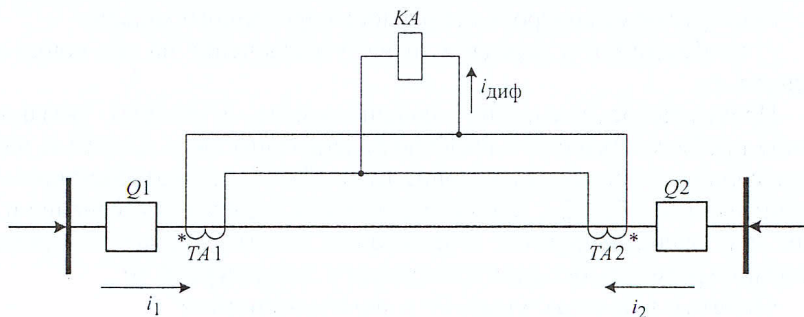


Рис. 1.1. Принципиальная схема токовых цепей ДЗЛ традиционного исполнения



Основные свойства защиты:

— зоной действия является весь участок линии, заключенный между трансформаторами тока;

— защита в трехфазном исполнении реагирует на все виды замыканий и не реагирует на токи нагрузочного режима или токи качаний;

— защита обладает абсолютной селективностью, поэтому используется обычно как основная быстродействующая защита линии, действующая без выдержки времени при КЗ в любой точке защищаемой линии;

— защита не может выполнять функции дальнего резервирования.

Необходимо отметить, что рассмотренная простейшая схема исполнения ДЗЛ с проводным каналом может применяться только на очень коротких линиях — до нескольких сотен метров. Можно выделить несколько причин, по которым классическая схема ДЗЛ не применяется на практике:

а) измерительные трансформаторы тока (ТТ), к которым подключается ДЗЛ, располагаются по концам защищаемой линии. Поэтому связывающие их соединительные провода имеют большую длину и соответственно большое сопротивление, которое значительно превышает допустимую нагрузку ТТ. Например, медный провод сечением  $1,5 \text{ мм}^2$  имеет удельное сопротивление  $13 \text{ Ом/км}$ . Допустимая нагрузка ТТ в общем случае составляет около  $1\text{—}3 \text{ Ом}$ ;

б) при пофазном сравнении токов по концам линии необходим проводной канал связи, состоящий минимум из четырех проводов (три фазных провода и общий обратный провод). При больших длинах защищаемой линии стоимость проводного канала делает использование ДЗЛ экономически нецелесообразным;

в) отсутствует контроль исправности проводного канала;

г) необходимость передачи сигнала отключения на оба конца линии и т.д.

Практическое применение нашли защиты, в которых указанные выше проблемы решены с помощью специальных мер. С 1961 г. началось серийное производство защит типа «ДЗЛ-1», а впоследствии — ее модификации «ДЗЛ-2». Данные реле нашли широкое применение и до сих пор эксплуатируются в некоторых энергосистемах. Подробное описание реле данного типа приводится в литературе [5, 6].

Отметим ключевые моменты в конструкции реле:

— использование комбинированного фильтра токов  $(I_1 + kI_2)$ , чтобы по соединительным проводам протекали не фазные токи, а

комбинация из токов прямой и обратной последовательностей. Это позволяет использовать не четыре соединительных провода, а только два;

— использование промежуточных трансформаторов, позволяющих снизить циркулирующие токи в соединительных проводах с ампер до миллиампер. Это позволяет уменьшить сечение соединительных проводов и значительно снизить нагрузку на измерительные ТТ;

— для обеспечения правильной работы реле в условиях больших токов КЗ (с возможным насыщением ТТ) используется сравнение не векторов, а только фаз токов. Таким образом, при больших токах реле переходит с дифференциального токового на дифференциально-фазный принцип;

— обеспечение непрерывного контроля исправности канала связи с помощью наложения постоянного тока.

Комплекс реализованных мер позволил получить эффективную (для используемой элементной базы) дифференциальную защиту линий напряжением до 220 кВ. Существенным недостатком данной защиты является ограничение длины защищаемой линии — не более 10—15 км.

## **1.2. Дифференциальная защита с торможением.**

### **Тормозные характеристики**

#### ***1.2.1. Использование торможения для обеспечения несрабатывания защиты при внешних КЗ***

Традиционным и испытанным способом обеспечения несрабатывания продольной дифференциальной токовой защиты (линии, трансформатора, генератора, шин) при внешнем КЗ является использование измерительных органов с торможением. В защите на электромеханических реле такой измерительный орган имел две обмотки — одну рабочую, вторую тормозную. Ток рабочей обмотки должен вызывать срабатывание измерительного органа, ток в тормозной должен затруднять срабатывание, заглубляя измерительный орган. В дифференциальной защите в качестве рабочего тока обычно используется ток дифференциальной цепи, формируемый для простейшей линии с двумя концами по выражению (1.1):

$$I_{\text{диф}} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2.$$



Реально в качестве дифференциального берется модуль тока, сформированного по выражению (1.1):

$$I_{\text{диф}} = |\underline{I}_1 + \underline{I}_2|.$$

Естественно, что для линии с многими концами дифференциальный ток должен получаться как сумма токов всех концов. По закону Кирхгофа при внешнем КЗ дифференциальный ток равен нулю при идеальных трансформаторах тока или току небаланса при наличии погрешностей ТТ. Тормозной ток выбирается так, чтобы он был максимален при внешнем КЗ.

Чаще всего в защите, предназначенной для использования на линиях с двумя концами, тормозной ток формируется как полусумма модулей токов двух сторон линии:

$$I_{\text{торм}} = 0,5(|\underline{I}_1| + |\underline{I}_2|). \quad (1.2)$$

Именно так формируется тормозной ток в защитах REL 551 (фирма «АВВ»), TOP 200-ДЗЛ («ИЦ Бреслер»), Сириус-2-ДЗЛ-01 («РА-ДИУС Автоматика»).

В разработанном НПП «ЭКРА» шкафе ДЗЛ типа ШЭ2607 с терминалом БЭ2704 091 предусмотрена возможность выбора между двумя вариантами формирования тормозного тока: как суммы модулей токов  $I_{\text{торм}} = K_T (|\underline{I}_1| + |\underline{I}_2|)$  или как модуля векторной разности токов:  $I_{\text{торм}} = K_T (\underline{I}_1 - \underline{I}_2)$ . Как показано в [5], во втором случае появляется зависимость тормозной величины от угла сдвига фаз токов по концам линии. Торможение становится максимальным при внешних повреждениях и минимальным при внутренних. Коэффициент  $K_T$  может в терминале регулироваться от 0,1 до 0,9. При  $K_T = 0,5$  получается торможение по выражению (1.2).

Применяются и другие способы формирования тормозного тока. Например, в устройстве RED 670 для линии со многими концами согласно техническому описанию «тормозным током является наибольший фазный ток со всех концов линии, что обеспечивает надежную устойчивость к сквозному току повреждения даже при сильном насыщении трансформаторов тока».

### ***1.2.2. Токи небаланса при внешних КЗ. Тормозные характеристики***

В режиме внешнего КЗ в дифференциальной цепи имеется ток небаланса. Именно он и определяет параметры срабатывания защиты.

Согласно [5] расчетный ток небаланса, порождаемый в дифференциальной цепи сквозным током  $I_{скв}$ , состоит из двух составляющих:

$$I_{нб. расч} = I'_{нб} + I''_{нб}. \quad (1.3)$$

Первое слагаемое обусловлено погрешностями трансформаторов тока:

$$I'_{нб} = K_{пер} K_{одн} \varepsilon I_{скв}, \quad (1.4)$$

где  $\varepsilon$  — относительное значение полной погрешности трансформаторов тока в установившемся режиме;  $K_{пер}$  — коэффициент, учитывающий повышение погрешности ТТ в переходном режиме;  $K_{одн}$  — коэффициент однотипности трансформаторов тока.

Второе слагаемое обусловлено неточностью выравнивания вторичных токов при неравенстве коэффициентов трансформации по концам линии и метрологическими погрешностями, вносимыми элементами устройства.

В основном коэффициенты трансформации ТТ по концам линии выбираются одинаковыми, тогда проблема с выравниванием подводимых к защите токов отпадает. В некоторых случаях коэффициенты трансформации не совпадают, тогда выполняется искусственное выравнивание вторичных токов и появляется дополнительная составляющая погрешности, учитываемая в  $I''_{нб}$ .

Второе слагаемое можно выразить как произведение некоторой погрешности выравнивания вторичных токов  $\Delta f_{выр}$  на сквозной ток:

$$I''_{нб} = \Delta f_{выр} I_{скв}. \quad (1.5)$$

У микропроцессорных терминалов погрешность выравнивания весьма невелика. Ее расчетное значение можно принимать  $\Delta f_{выр} = 0,03$ .

Под сквозным током следует понимать ток внешнего КЗ, если определяется  $I_{нб. кз}$ , или ток нагрузки, если определяется  $I_{нб. нагр}$ .

Отстройка ДЗЛ от внешних КЗ задается тормозной характеристикой, определяющей соотношения между дифференциальным и тормозным токами, при которых ДЗЛ срабатывает, и токами, при которых не срабатывает.



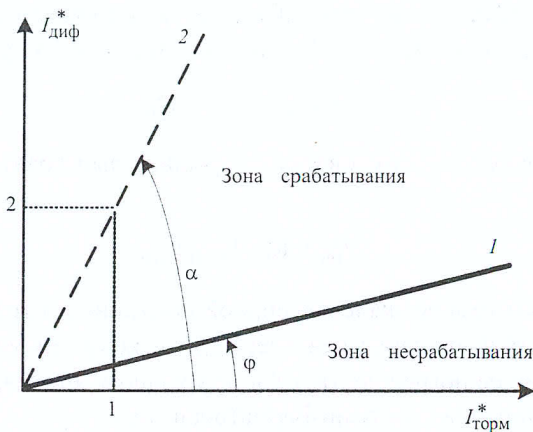


Рис. 1.2. Принцип построения тормозной характеристики

Тормозную характеристику традиционно принято строить в плоскости, в которой по оси абсцисс откладываются токи тормозной цепи, а по оси ординат — дифференциальной (рис. 1.2). Обычно токи перед построением приводят к относительным единицам, принимая за базисный либо первичный номинальный ток трансформатора тока, либо максимальный рабочий ток защищаемой линии.

Известны и другие формы представления характеристики срабатывания, которые в некоторых случаях могут быть более удобными. В частности, большое распространение получило представление характеристики срабатывания в комплексной плоскости отношения сравниваемых токов, которое позволяет учитывать влияние фазового сдвига контролируемых токов [7].

Тормозной ток, формируемый по выражению (1.2), в условиях внешнего КЗ или в нагрузочном режиме равен сквозному току, а дифференциальный — соответствующему току небаланса. В этих режимах связь между токами определяется соотношением, полученным из (1.3)—(1.5):

$$I_{диф}^* = (K_{пер} K_{одн} \varepsilon + \Delta f_{выр}) I_{торм}^* .$$

Это уравнение на рис. 1.2 соответствует прямой линии 1, наклон которой к оси  $I_{торм}^*$  определяется как:

$$\operatorname{tg} \varphi = K_{пер} K_{одн} \varepsilon + \Delta f_{выр} .$$

Прямая 1 отражает предельное расчетное значение тока небаланса в дифференциальной цепи в условиях, не требующих срабатывания защиты. Соответственно реальные значения тока небаланса  $I_{\text{диф}}^*$  будут расположены ниже прямой 1. Уставка дифференциальной защиты должна быть выше ординат прямой 1. Часть плоскости ниже прямой 1 соответствует области несрабатывания защиты, а выше прямой 1 — области срабатывания. Параметр  $\text{tg}\varphi$ , определяющий наклон граничной линии характеристики, называется *коэффициентом торможения*.

Согласно выражениям (1.1) и (1.2) при внутреннем КЗ дифференциальный ток вдвое больше тормозного. Такому соотношению соответствует прямая 2 на рис. 1.2, наклоненная к оси тормозного тока под углом  $\alpha = \text{arctg}(2) \approx 63^\circ$ . Все точки прямой лежат в области срабатывания.

Ток срабатывания защиты выбирается из условия отстройки от небаланса [5]:

$$I_{\text{с.з}} \geq K_{\text{отс}} I_{\text{нб. расч.}} \quad (1.6)$$

В относительных единицах:

$$I_{\text{с.з}} \geq K_{\text{отс}} (K_{\text{пер}} K_{\text{одн}} \varepsilon + \Delta f_{\text{выр}}) I_{\text{скв. расч.}}^* \quad (1.7)$$

где  $I_{\text{скв. расч.}}^*$  — максимальный ток внешнего КЗ или ток в режиме асинхронного хода (качаний).

Коэффициент отстройки  $K_{\text{отс}}$  для микропроцессорных терминалов может приниматься равным 1,15. Тогда на рис. 1.2 характеристика срабатывания защиты приобретет вид прямой, идущей немного выше прямой 1:

$$\text{tg}\varphi_{\text{с.з}} = 1,15 (K_{\text{пер}} K_{\text{одн}} \varepsilon + \Delta f_{\text{выр}}).$$

На практике применяют более сложные тормозные характеристики, обеспечивающие большую эффективность функционирования. Типичный вид такой характеристики приведен на рис. 1.3.

Граница между областями срабатывания и несрабатывания формируется из трех отрезков, что позволяет усилить торможение по мере роста сквозного тока. В результате появляются три участка: 1 — участок без торможения; 2 — участок умеренного торможения; 3 — участок усиленного торможения. Каждый участок характеризуется своим коэффициентом торможения. На участке 1 дифференциальный ток срабатывания защиты минимален и назван базовой уставкой.



Усиление торможения на участке 3 позволяет более эффективно отстроиться от токов небаланса при больших токах внешних КЗ, когда ТТ имеют существенные погрешности. При этом при малых токах работа на участках 1—2 обеспечивает высокую чувствительность.

Показанную на рис. 1.3 характеристику имеют терминалы RED 670, REL 551, TOP 200-ДЗЛ, Сириус-2-ДЗЛ-01.

Величина базовой уставки определяет один из важнейших параметров защиты — ее чувствительность. Объясняется это следующим образом. Обозначим минимальный ток металлического внутреннего короткого замыкания  $I_{КЗ \text{ мин}}$ .

Дифференциальный ток в рассматриваемых условиях равен току КЗ, т.е. той же величине  $I_{КЗ \text{ мин}}$ . На рис. 1.2 точка, соответствующая  $I_{КЗ \text{ мин}}$ , обязательно лежит на прямой 2 — где-то довольно высоко. При появлении в месте КЗ переходного сопротивления и постепенном росте его величины рабочая точка опускается по прямой 2. Когда-то она пересечет тормозную характеристику. Это произойдет обязательно на первом участке характеристики, на котором ток срабатывания равен базовой уставке. Поэтому коэффициент чувствительности ДЗЛ принято определять по выражению:

$$K_{\text{ч}} = I_{\text{КЗ мин}} / I_{\text{диф. мин}}, \quad (1.8)$$

где  $I_{\text{диф. мин}}$  — базовая уставка.

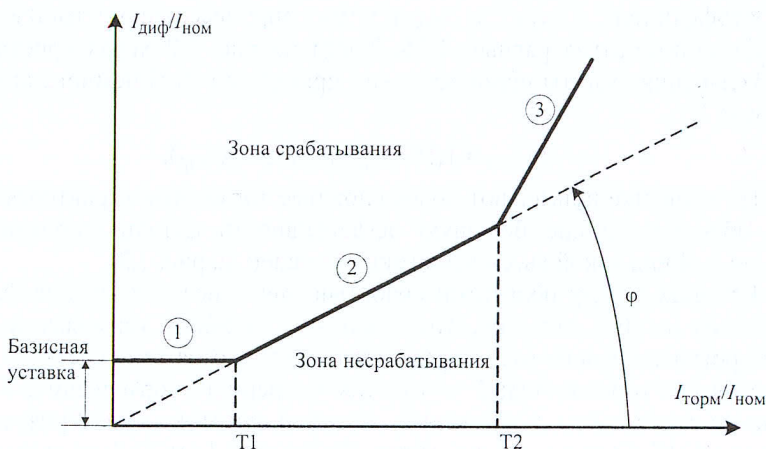


Рис. 1.3. Типичная тормозная характеристика ДЗЛ

### 1.2.3. Торможение с адаптированной характеристикой

Терминалы ДЗЛ непрерывно совершенствуются. Последние (по времени разработки) терминалы имеют торможение по расчетной погрешности трансформаторов тока.

Приводим отрывок из описания терминала GE Multilin L90: «...основным отличием между дифференциальной схемой устройства L90 и схемой дифференциальной защиты с торможением является использование оценки погрешностей во входных цепях для увеличения параметра торможения при КЗ».

В защите Siemens 7SD52 применено аналогичное решение для многотерминальной защиты линии со многими концами. Принцип формирования тормозного тока формулируется в «Руководстве по эксплуатации» защиты следующим образом: «Каждый терминал рассчитывает дифференциальный ток из общей суммы векторов тока, которые были сформированы на каждом конце и переданы на другие концы. В идеале величина тока равна току повреждения.

Ток отстройки (тормозной) противодействует дифференциальному току. Это полная погрешность из максимальных замеряемых погрешностей по концам защищаемой зоны рассчитывается из действительных замеряемых величин и установленных параметров энергосистемы. Поэтому наибольшая возможная величина погрешности ТТ

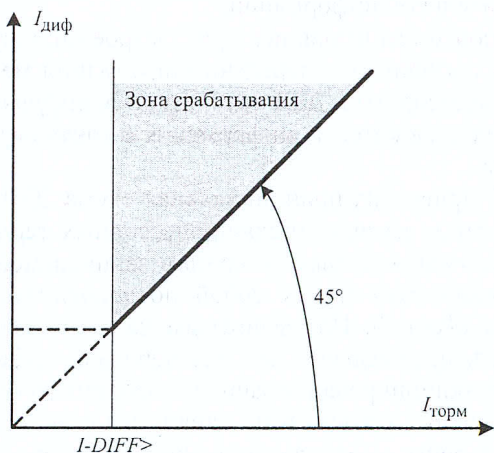


Рис. 1.4. Тормозная характеристика при торможении от расчетной погрешности



в диапазоне токов короткого замыкания умножается на ток, протекающий на каждом из концов защищаемого объекта. Затем полная величина, включая внутренние измерительные погрешности, передается на другие концы».

В соответствии с алгоритмом суммируются погрешности всех ТТ и получается наибольшая возможная погрешность измерения  $\Sigma$ . Условие срабатывания защиты:

$$(I_{\text{диф}} - \Sigma) > (I-DIFF>), \quad (1.9)$$

где  $I-DIFF >$  — порог срабатывания чувствительной ступени защиты.

Изображение тормозной характеристики при торможении от расчетной погрешности приведено на рис. 1.4.

### 1.3. Построение дифференциальной защиты линии с использованием цифровых каналов связи

Свойства продольной ДЗЛ во многом определяются используемым каналом связи и способом передачи информации по нему.

В традиционных ДЗЛ информация о токе в противоположный полуконтакт передается по проводному каналу в аналоговом виде. Такой подход имеет существенные ограничения, в первую очередь по длине канала связи (длине защищаемой линии) и невозможности передачи дополнительной информации.

Новые возможности появились при построении устройств РЗА на базе цифровой техники. Для передачи информации между современными микропроцессорными ДЗЛ используются *цифровые каналы связи* (*digital channels*), в которых информация о токах передается в виде цифрового кода.

На рис. 1.5 приведена принципиальная схема ДЗЛ двухконцевой линии. ДЗЛ состоит из двух микропроцессорных терминалов (полуконтактов), устанавливаемых по концам защищаемой линии. Полуконтакты связываются между собой по *защитному каналу связи* (*protection data channel*). Под защитным каналом связи понимается цифровой канал, предназначенный для передачи информации, необходимой для функционирования защиты абсолютной селективности.

Для подключения к защитному каналу в терминале ДЗЛ должны быть предусмотрены специализированные *защитные интерфейсы* (*protection data interface*). Типы применяемых каналов связи и интерфейсов подробно описываются в главе 2.

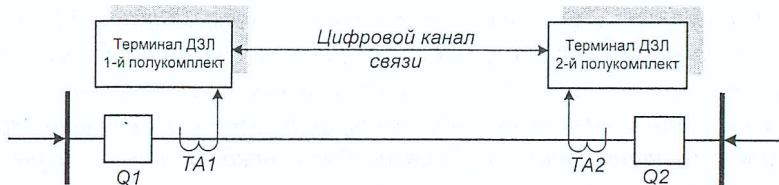


Рис. 1.5. Принципиальная схема ДЗЛ с цифровым каналом связи

В зависимости от используемого канала связи длина защищаемой линии может варьироваться от 2 до 120 км.

Схема, изображенная на рис. 1.5, должна рассматриваться как однолинейная. Реально все современные ДЗЛ создаются с пофазным сравнением токов, т.е. полукомплект подключается к ТТ трех фаз, по каналу связи последовательно передается информация о всех фазных токах, а алгоритм последующей обработки сигналов обеспечивает защиту каждой фазы. Этим решается задача обеспечения функционирования защиты при всех видах повреждения.

## 1.4. Область применения и дополнительные возможности современных дифференциальных защит линии

### 1.4.1. Область применения ДЗЛ

Принцип действия ДЗЛ позволяет использовать ее в качестве основной защиты при всех видах коротких замыканий на воздушных, кабельных и смешанных воздушно-кабельных линиях в сетях с любым классом напряжения и вариантом заземления нейтрали. Практически во всех случаях необходимость установки ДЗЛ как быстродействующей защиты определяется исходя из требований сохранения устойчивости работы энергосистемы, устойчивости синхронной нагрузки, надежной работы электроустановок потребителей, а также в случаях, когда возникает проблема с выполнением ступенчатых защит — дистанционной защиты (ДЗ), токовой защиты нулевой последовательности (ТЗНП), максимальной токовой защиты (МТЗ) и т.д. — применительно к коротким линиям. Основанием для практического применения ДЗЛ является возможность выполнения или наличия свободного канала связи между полукомплектами.

Применение ДЗЛ в сетях 110—750 кВ регламентируется нормативным документом [1]:

«На линиях с двухсторонним питанием, отнесенным к ЕНЭС, а также отходящих от ПС ЕНЭС, должны устанавливаться две независимые защиты от всех видов повреждения: быстродействующая защита с абсолютной селективностью и комплект ступенчатых защит (резервная защита). Должны быть предусмотрены меры по отстройке быстродействующих защит от коротких замыканий за силовыми трансформаторами отпаечных подстанций.

В качестве основной быстродействующей защиты необходимо применять один из следующих вариантов:

- 1) продольную дифференциальную защиту (ДЗЛ);
- 2) дифференциально-фазную (ДФЗ) защиту;
- 3) защиту с высокочастотной блокировкой (направленная высокочастотная фильтровая защита);
- 4) комплект ступенчатых защит с передачей блокирующих или разрешающих сигналов.

Установка второй быстродействующей защиты предусматривается на особо ответственных линиях напряжением 110—220 кВ, если при отказе срабатывания или выводе из действия основной быстродействующей защиты отключение короткого замыкания на линии резервной защитой с выдержкой времени может привести к нарушению устойчивости нагрузки, к нарушению технологии особо ответственных производств, надежной работы атомных станций, а также требований экологии.

Две основные быстродействующие защиты должны устанавливаться на кабельных и кабельно-воздушных линиях, а также на воздушных линиях в местах массовой застройки.

В качестве второй быстродействующей защиты может быть использован комплект ступенчатых защит с передачей разрешающих или блокирующих сигналов.

Для обеспечения взаимодействия полукомплектов быстродействующих защит должны использоваться высокочастотные каналы связи (ВЧКС), кабельные линии связи (КЛС) и волоконно-оптические линии связи (ВОЛС).

При наличии ВОЛС предпочтение следует отдавать варианту с ДЗЛ.

Предпочтительно, чтобы ступенчатые защиты также входили в терминалы ДФЗ и ДЗЛ.»



Аналогичным образом определяется использование ДЗЛ в [2]:

*«В качестве основной защиты ЛЭП должны предусматриваться защиты от всех видов КЗ с абсолютной селективностью. При наличии волоконно-оптического канала связи предпочтение должно отдаваться ДЗЛ».*

В сетях 6—35 кВ ДЗЛ применяется на ответственных линиях, где другими защитами не удается обеспечить селективность и быстродействующее отключение КЗ по всей длине защищаемой линии.

ДЗЛ находит применение в системах электроснабжения промышленных предприятий, где очень важно быстрое отключение КЗ для сохранения устойчивости синхронных двигателей и успешного самозапуска асинхронных машин.

В последнее время с развитием малой энергетики крупные производственные предприятия стали строить и эксплуатировать собственные электростанции на напряжение 6—10 кВ (в большинстве случаев на основе газотурбинных установок). Как правило, предусматривается возможность параллельной работы с объединенной энергосистемой. ДЗЛ применяется для защиты линий связи электростанции с энергосистемой, на которых трудно выбрать эффективную токовую отсечку, а максимальные токовые защиты обладают недостаточным быстродействием.

Необходимо отметить, что ДЗЛ с цифровым каналом в отечественных энергосистемах пока встречаются крайне редко. Освоение и внедрение данного типа защит только начинается. В иностранных энергосистемах применение ДЗЛ началось достаточно давно, и они широко используются. Поэтому первыми на рынок электроэнергетического оборудования России с терминалами ДЗЛ пришли иностранные производители:

— фирма АВВ с несколькими поколениями терминалов ДЗЛ: REL-551, RED-670, SPAC-810-Л29 (Л69);

— фирма Siemens: SIPROTEC 7SD52, 7SD60;

— фирма Areva (Alstom): P521, P540;

— фирма General Electric (GE): Multilin L60.

Появились и отечественные разработки ДЗЛ:

— фирма ООО «ИЦ «Бреслер»: ТОР 200-ДЗЛ;

— фирма НПП «ЭКРА»: шкаф дифференциальной защиты линии ШЭ2607 091 (на базе терминала БЭ2704 091);

— фирма ЗАО «РАДИУС Автоматика»: Сириус-2-ДЗЛ-01.

Следует отметить, что все упомянутые выше продольные защиты используют близкие между собой принципы. В основном различия заключаются в дополнительных функциях, составе защит и коммуникационных возможностях. Условно можно разделить терминалы ДЗЛ на используемые для защиты линий 6—35 кВ и 110—750 кВ. Сам принцип действия ДЗЛ, как уже упоминалось выше, универсальный и подходит для любого класса напряжения, но состав дополнительных (резервных) защит, средства автоматики, коммуникационные возможности, сложность и стоимость терминалов разграничивает область их применения.

#### 1.4.2. Защита многоконцевых линий

Простейший вариант применения ДЗЛ — защита двухконцевых линий (см. рис. 1.5). В этом случае защитным каналом связи соединяются два терминала. Такой вариант поддерживают устройства всех фирм-производителей.

Рядом фирм выпускаются терминалы ДЗЛ, позволяющие защищать трехконцевые линии (ШЭ2607 091, P540, L90 фирмы GE). В этом случае используется три терминала ДЗЛ, которые объединяются между собой. Пример такого подключения приведен на рис. 1.6.

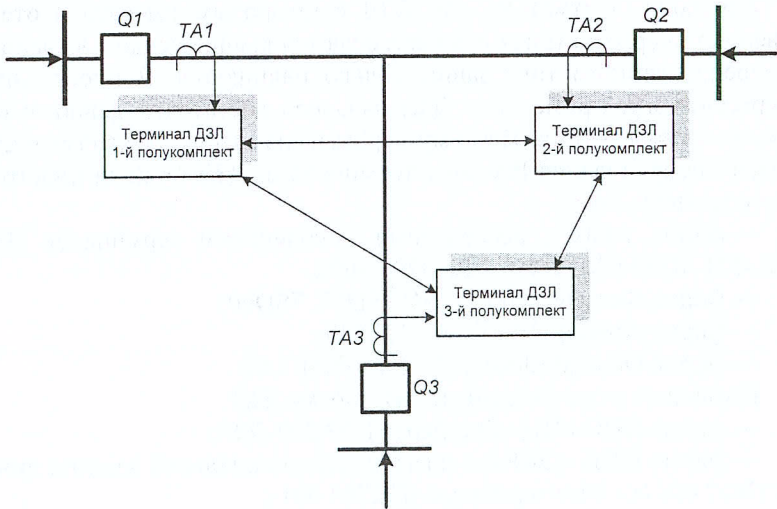
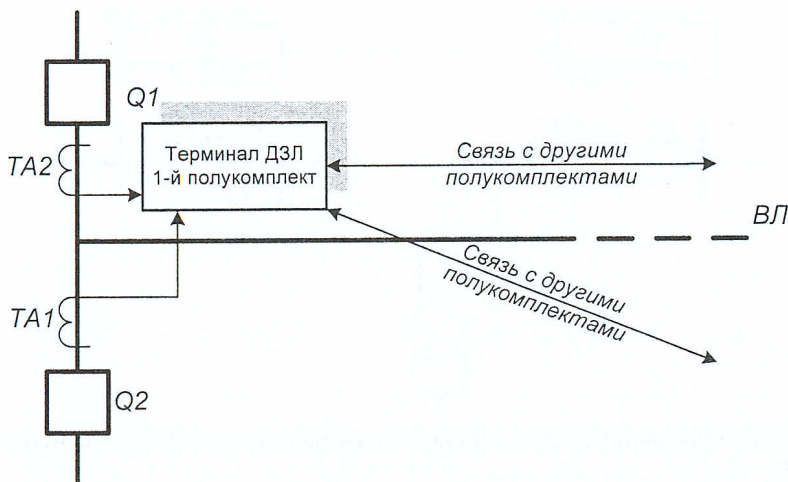


Рис. 1.6. ДЗЛ трехконцевой линии



**Рис. 1.7.** ДЗЛ трехконцевой линии, полукомплект подключен к двум группам трехфазных ТТ

Новейшие терминалы ДЗЛ позволяют защищать многоконцевые линии. При этом объединяются до 5 (RED-670) или даже 6 (7SD52) комплектов ДЗЛ.

Взаимодействие терминалов в ДЗЛ многоконцевой линии осуществляется по достаточно сложному алгоритму, резко возрастают требования к производительности терминала, что вызывает существенное повышение стоимости терминалов. Кроме того, во много раз усложняется процесс наладки многотерминальной ДЗЛ по сравнению с простым вариантом защиты двухконцевой линии.

Топология связи терминалов ДЗЛ в защите многоконцевых линий рассматривается в главе 2.

Для использования в «полуторной» первичной схеме РУ или в схеме «четырёхугольник» разработан вариант терминалов с возможностью подключения к двум группам трансформаторов тока. Пример такого подключения приведен на рис. 1.7. Необходимо отметить, что каждая группа ТТ выступает в качестве отдельного «плеча» защиты.

#### **1.4.3. Применение ДЗЛ на линиях с ответвлениями**

Пример линии с понижающей подстанцией на ответвлении приведен на рис. 1.8. В случае отсутствия подпитки на ответвлении используются два полукомплекта ДЗЛ, которые устанавливаются на питающих подстанциях.



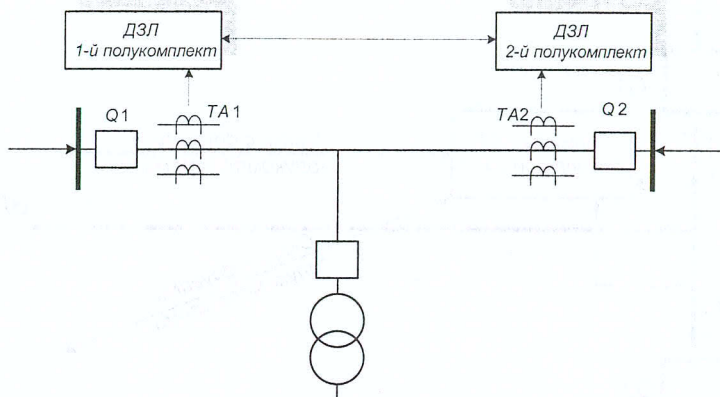


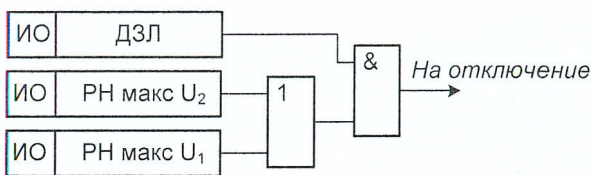
Рис. 1.8. Применение ДЗЛ на линии с понижающей подстанцией на ответвлении

Токи, протекающие в ответвление от линии, воспринимаются ДЗЛ как небаланс. Для исключения неправильной работы защиты необходимо, чтобы ток срабатывания ступени ДЗЛ был отстроен от возможных максимальных токов ответвления в следующих возможных режимах:

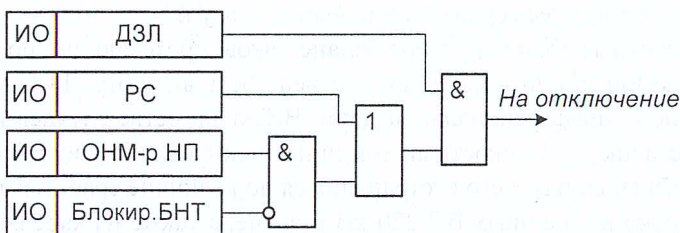
- нагрузочный режим;
- КЗ за силовым трансформатором;
- бросок намагничивающего тока трансформатора при постановке под напряжение.

С учетом обеспечения необходимой чувствительности ДЗЛ эти условия можно выполнить, как правило, при маломощном трансформаторе ответвления, когда токи в указанных режимах невелики. В иных случаях в терминалах ДЗЛ предусматривают специальные измерительные органы, отстроенные от этих режимов. При этом должно обеспечиваться надежное срабатывание измерительных органов при КЗ на защищаемой линии.

При малой длине защищаемой линии и небольшой мощности трансформаторов ответвления отстройка от КЗ на стороне низкого напряжения трансформатора может осуществляться с использованием пуска ДЗЛ по напряжению обратной последовательности и по минимальному напряжению прямой последовательности (рис. 1.9, а, как правило, на линиях 6—35 кВ). Если данная мера не обеспечивает необходимую чувствительность ДЗЛ, то применяется дополнительный комплект измерительных органов, состоящий из трех реле междуфазного



а)



б)

**Рис. 1.9. Дополнительный комплект ИО:**

РС — реле междуфазного сопротивления; ОНМ-р НП — разрешающий орган направления мощности нулевой последовательности; Блокир. БНТ — орган блокировки при бросках тока намагничивания

сопротивления и реле направления мощности нулевой последовательности, отстроенного от броска намагничивающего тока трансформаторов (рис. 1.9, б).

Возможен вариант, когда пуск ДЗЛ осуществляется с помощью дискретного входа терминала, на который подается сигнал от внешнего комплекта измерительных органов, собранных на отдельных реле либо имеющихся в другом терминале, например, резервной защите линии. При этом более правильно использовать пусковой разрешающий вход, а не блокирующий, иначе возникает проблема согласования действия измерительных органов по времени.

#### 1.4.4. Компенсация емкостных токов в защитах длинных линий

Величина емкостного (зарядного) тока определяется емкостной проводимостью, которая зависит от класса номинального напряжения линии. Среднее значение удельного емкостного тока  $I_C$  на один километр ВЛ при номинальном напряжении составляет примерно:

750 кВ — 1,6 А;  
500 кВ — 1,2 А;  
330 кВ — 0,65 А;  
220 кВ — 0,46 А;  
110 кВ — 0,2 А.

Емкостная проводимость кабельных линий в несколько раз выше, чем воздушных. Соответственно величина емкостных токов при одинаковой длине здесь существенно выше, чем у ВЛ.

Емкостные токи нарушают баланс токов, протекающих по концам защищаемой линии, чем вносят погрешность в работу ДЗЛ, вызывая небаланс в дифференциальной цепи. В большинстве случаев при выборе уставок ДЗЛ емкостный ток принимают как одну из составляющих небаланса и от него отстраиваются по величине срабатывания.

Однако на длинных ВЛ 220 кВ и выше, а также на кабельных линиях длиной более 20 км емкостные токи достигают таких величин, что отстройка по току срабатывания приводит к значительному загроблению защиты.

В современных устройствах защиты используют алгоритмы, компенсирующие влияние емкостных токов. Все они построены на определении текущей величины емкостного тока и его учете в алгоритме защиты.

Одним из способов является компенсация половины емкостного тока линии, представленной П-образной схемой замещения. Данный способ применяется в дифференциально-фазных защитах, разработанных для защиты ВЛ сверхвысоких напряжений [8]. Компенсация по аналогичному принципу реализована в большинстве терминалов ДЗЛ, например в ШЭ2607 091.

На рис. 1.10 показан подход при построении П-образной схемы замещения линии. Распределенная емкость линии заменяется на две сосредоточенные емкости  $C_{л}$ , которые задаются в устройстве в качестве уставки. На основе измеряемого напряжения вычисляется текущая величина емкостного тока, что позволяет выполнять выравнивание токов по концам защищаемой линии. Расчетное выражение для тока одного из полуконтактов:

$$i_{\text{комп}} = i - \frac{C_{л}}{2} \cdot \frac{du}{dt}. \quad (1.10)$$



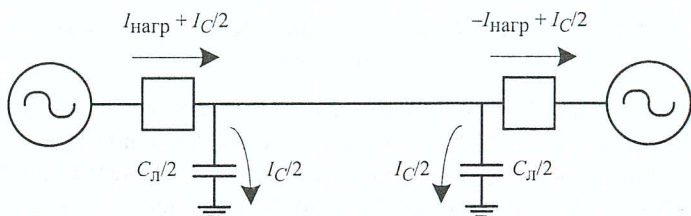


Рис. 1.10. Емкостный ток линии (согласно П-образной схеме замещения)

При неисправностях в цепях напряжения компенсация емкостного тока невозможна, поэтому защита автоматически выводится из действия либо увеличивается порог срабатывания до величины, рассчитанной без учета компенсации емкостной проводимости.

Оригинальный способ компенсации небаланса от емкостных токов используется в терминале RED-670 фирмы АBB. В алгоритме компенсации определяется дифференциальный ток, измеряемый в нормальном (неаварийном) режиме работы линии, и устраняется данный небаланс. В результате этого в нагрузочных режимах дифференциальный ток поддерживается близким к нулю. Данная функция выполняется отдельно для каждой фазы.

Значения предаварийных дифференциальных токов (величина небаланса в дифференциальной цепи, который компенсируется алгоритмом) фиксируются при возникновении повреждения. Функция устранения текущего небаланса снова вводится в действие через 50 мс после восстановления нормальных условий в сети, когда отсутствуют пусковые сигналы в терминале.

Следует отметить, что все небалансы в дифференциальной цепи в нагрузочном режиме устраняются данным алгоритмом независимо от их происхождения:

- емкостные токи линии;
- погрешности измерительных трансформаторов тока;
- токи нагрузки ответвлений от линии и т.д.

Компенсация не использует цепи напряжения, что является плюсом данного алгоритма. Но это же можно отнести к недостатку, так как не учитывается изменение величины емкостных токов в момент аварии из-за снижения напряжения на линии.

## **1.5. Передача дополнительных сигналов между полукомплектами**

В терминалах ДЗЛ имеется возможность передачи по защитному каналу дополнительных дискретных сигналов, не используемых для функционирования дифференциальной защиты. Количество сигналов варьируется в зависимости от назначения терминалов — от 4 до 32.

В простейшем случае сигнал поступает на дискретный вход первого полукомплекта, затем передается по защитному каналу во второй, где воздействует на выходное реле терминала. Таким способом можно обеспечить обмен сигналами между любыми внешними устройствами, расположенными по разные стороны линии.

С помощью передачи сигналов можно организовать телеуправление высоковольтным выключателем, когда командами с одного конца линии выполняются операции включения/отключения выключателя другого конца.

Передача сигналов позволяет организовать телеускорение соответствующих ступеней резервных защит. В этом случае, действуя на отключение параллельно с ДЗЛ, дистанционная и токовая защиты могут использоваться как вторая основная защита.

## **1.6. Комплект ступенчатых защит в составе терминала дифференциальной защиты линии**

Микропроцессорная элементная база позволяет включать в состав терминалов дополнительные функции без значительного увеличения стоимости изделия, сложности его обслуживания. Поэтому большинство терминалов ДЗЛ содержат в своем составе комплекты ступенчатых защит (КСЗ).

Для сетей 110—750 кВ, как правило, выполняется полноценный комплект резервных защит линии: четыре ступени ДЗ, четыре-пять ступеней направленной токовой защиты нулевой последовательности (ТЗНП), токовая отсечка.

Для сетей 6—35 кВ состав защит упрощенный: трехступенчатая МТЗ, защита от обрыва фаз (ЗОФ) и в некоторых случаях — защита от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ).

Указанные ступени могут быть настроены как аварийные, которые вводятся в действие автоматически при неисправности защитного канала связи либо действуют всегда параллельно с основной защитой ДЗЛ.

Необходимо отметить, что дополнительные ступени, входящие в терминал ДЗЛ, не могут считаться полноценным резервом, так как в этом случае основная и резервная защиты выполнены в едином устройстве, отказ которого приведет к полному отказу всех защит. На линии необходима установка двух независимых устройств защиты: терминала ДЗЛ и терминала резервных ступенчатых защит. В некоторых случаях руководящие документы требуют установки трех комплектов защит линии: двух основных защит и одной резервной [1].

### **Контрольные вопросы к главе 1**

1. К какому типу защит относится ДЗЛ?
2. В плоскости каких величин принято строить тормозную характеристику?
3. Чем характеризуется торможение с адаптивной характеристикой?
4. Что понимается под термином «защитный канал связи»?
5. Какие дополнительные режимы необходимо учитывать при выборе порога срабатывания ДЗЛ, установленной на линии с понижающей подстанцией на ответвлении?



## ГЛАВА ВТОРАЯ

# ЦИФРОВЫЕ КАНАЛЫ СВЯЗИ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ЛИНИИ

### 2.1. Общие сведения

Данная глава посвящена вопросу организации цифровых каналов связи, которые могут использоваться для построения ДЗЛ. В большей части информация относится к смежной области знаний, называемой телекоммуникацией, — передаче информации на расстояние с помощью технических средств [9, 10].

Современному специалисту по релейной защите крайне желательно обладать базовыми знаниями принципов организации и работы телекоммуникационных каналов, а также владеть соответствующей терминологией. Это позволяет правильно сформулировать требования при выборе вариантов построения цифрового канала для ДЗЛ, а затем, при реализации проекта, качественно проводить наладку и последующую эксплуатацию защит данного типа.

Передача цифровой информации возможна по каналам различного типа. В мировой практике для организации канала ДЗЛ нашли применение следующие основные типы каналов: кабельные, выделенные волоконно-оптические, радиорелейные линии связи, а также мультимплексированные цифровые сети [7, 11].

**Кабельные линии связи (КС).** Информация передается с помощью кабельных каналов связи, которые организуются медными проводниками. В электросвязи в основном используется кабель на витой паре, который представляет собой два изолированных медных провода, равномерно скрученных вместе, что позволяет несколько повысить помехоустойчивость. К аналогичному эффекту приводит экранирование кабеля.

Затухание сигнала в КС сильно зависит от частоты передаваемого сигнала. С помощью специальных мер удастся добиться относительно высокой пропускной способности, но при этом протяженность непрерывного участка (без промежуточных элементов) резко снижается. Кроме того, КС подвержены влиянию электромагнитных помех, особенно при их прокладке вблизи силового оборудования станции или подстанции.

С учетом развития оптоволоконных линий связи использование КС становится все менее перспективным. В основном КС используются для соединения оборудования потребителя линии связи (например, терминала ДЗЛ) с телекоммуникационным оборудованием, если они расположены на незначительном расстоянии.

**Выделенные волоконно-оптические линии связи (ВОЛС).** Оптические линии связи основаны на применении в качестве среды передачи оптических волоконных световодов, встроенных в оптический кабель. Оптические кабели связи имеют существенные преимущества перед медными кабелями. К ним относятся высокая пропускная способность, защищенность от внешних электромагнитных полей, низкие потери и, следовательно, большая длина канала без промежуточных усилителей, малые габариты и масса, высокая экономичность и т.д.

В основном ВОЛС используется в современных цифровых сетях для организации передачи большого потока информации на большие расстояния.

В электроэнергетике для организации цифровых каналов связи широко применяются *выделенные ВОЛС*. Это ВОЛС, которые не являются частью какой-то цифровой сети, а предназначены для непосредственного соединения двух полуккомплектов приемопередающего оборудования. Например, в качестве такого оборудования могут выступать полуккомплекты ДЗЛ, которые соединяются с помощью выделенной ВОЛС. Существует жаргонное название выделенной ВОЛС — *темная оптика*, где подчеркивается, что канал используется только одним каким-то потребителем.

**Радиорелейные линии связи (РРЛ).** Радиорелейные линии связи представляют собой линейки или цепочки приемопередающих станций, работающих в сантиметровом, дециметровом или метровом диапазонах длин волн (микрорadioволны — microwave) и расположенных на расстоянии друг от друга в пределах прямой видимости. Использование РРЛ с антенными системами высокой направленности позволяют достичь высокой устойчивости передачи информации на большие расстояния, однако они подвержены воздействию атмосферных явлений (грозам, осадкам, солнечной активности и т.д.).

РРЛ обеспечивают среднюю пропускную способность, чего вполне достаточно для решения задач в электроэнергетике.

*Мультиплексированные цифровые сети.* Развитие телекоммуникационных технологий привело к появлению глобальных цифровых сетей. Большинство из них явилось развитием телефонных сетей, где основной целью была передача речи. В настоящее время глобальные цифровые сети стали мультисервисными, т. е. предназначенными для передачи различного рода информации: голоса, видео, любого вида данных (в том числе Internet).

Совместимость сетей на международном уровне обеспечивается благодаря усилиям Международного союза телекоммуникаций (ITU — International Telecommunications Union).

Ключевым элементом сетей являются мультиплексоры, с помощью которых цифровые потоки от множества абонентов сети мультиплексируются в каналы различной емкости, соединяющие узловые станции. В связи с этим сети называют мультиплексированными.

Выделение одного или нескольких каналов мультиплексированной цифровой сети позволяет организовать связь между оборудованием, применяемым в электроэнергетике. В том числе таким способом возможна организация канала связи между полуккомплектами ДЗЛ.

В настоящий момент наиболее перспективными представляются варианты организации ДЗЛ с помощью двух типов каналов связи: ВОЛС и каналов мультиплексированных цифровых сетей. Далее рассматриваются более подробно технологии, применяемые при организации данных типов каналов связи.

## **2.2. Выделенная волоконно-оптическая линия связи**

### *2.2.1. Волоконные световоды*

В основе оптической передачи лежит эффект полного внутреннего отражения луча, падающего на границу двух сред с различными показателями преломления. Волоконный световод представляет собой тонкий двухслойный стеклянный стержень, у которого показатель преломления внутреннего слоя больше, чем наружного. Если в торец такого стержня ввести световой луч под углом к оси, то луч будет полностью отражаться от поверхности раздела слоев и распространяться вдоль световода. На практике используется источник света с длиной волны в диапазоне 600—1600 нм (часть видимого спектра и инфракрасного диапазона).



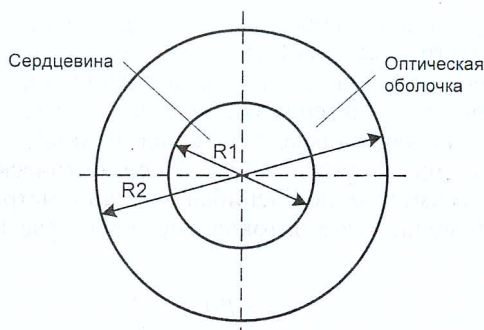


Рис. 2.1. Поперечное сечение волоконного световода

Устройство световода изображено на рис. 2.1. Внутренняя часть световода называется сердцевинной (сердечником), внешняя — оптической оболочкой. Важными параметрами являются диаметры сердечника и оптической оболочки. При указании значений этих величин для конкретного оптоволокна используется запись, в которой после численного значения диаметра сердечника через «/» указывается значение диаметра оптической оболочки. Например, оптоволокно имеет маркировку 62,5/125, что означает: диаметр сердечника — 62,5 мкм, диаметр оптической оболочки — 125 мкм.

В зависимости от траектории распространения света различают одномодовое (single-mode fiber) и многомодовое (multimode fiber) оптоволокно.

В одномодовом оптоволокне диаметр сердцевинной соизмерим с длиной волны оптического излучателя, поэтому в нем распространяется только одна направляемая мода (луч) излучения. Для оптического излучения с длинами волн 1300 и 1550 нм диаметр сердцевинной обычно равен 7—9 мкм, а стандартный диаметр оболочки — 125 мкм.

Многомодовое оптоволокно имеет относительно большой по сравнению с длиной волны света передатчика диаметр сердцевинной. Наибольшее распространение получили волокна с диаметром 50 и 62,5 мкм. Стандартный диаметр оптической оболочки — 125 мкм. Оптоволокно обычно применяется на длинах волн 850 и 1300 нм.

Передатчики для многомодового оптоволокна излучают импульсы света в некотором телесном угле, т. е. лучи (моды) входят в сердцевинную под разными углами. В результате лучи проходят от источника к приемнику неравные по длине пути и, следовательно, достигают его в разное время. Это приводит к тому, что ширина импульса на выходе оказывается больше, чем на входе. Расширение сигнала приводит к

ограничению пропускной способности канала связи. Также за счет более длинного пути возникает большее затухание сигнала.

Потери оптической мощности (или затухание) являются результатом поглощения света материалом световода, рассеяния в местах микро- и макроизгибов, а также отражения на концах световода. Коэффициент затухания, отражающий потери оптической мощности, обозначается  $\alpha$  и измеряется в децибелах на километр. Величину потерь оптической мощности в оптоволокне можно рассчитать из соотношения [12]:

$$PL = P_0 \cdot e^{-\alpha L}, \quad (2.1)$$

где  $PL$  — величина потерь мощности на длине  $L$ , дБ;  $P_0$  — величина введенной мощности, дБ;  $\alpha$  — коэффициент затухания, дБ/км.

Учитывая, что мощность на выходе оптоволокна меньше, чем на входе, значение потерь, выраженное в децибелах, будет иметь знак «минус», который часто опускается в тексте. Для современных типов одномодового оптоволокна величина коэффициента затухания при длине волны 1,3 мкм лежит в диапазоне 0,4—0,45 дБ/км. Для многомодового волокна величина коэффициента затухания при той же длине волны составляет 0,6—1,0 дБ/км.

С точки зрения мощности каждая ВОЛС характеризуется мощностью оптического передатчика и чувствительностью приемника. Разница между выходной мощностью передатчика и чувствительностью приемника (в децибелах) называется бюджетом мощности (power budget). Бюджет характеризует уровень потерь, которые может вносить линия между приемником и передатчиком без нарушения устойчивости соединения. Для современных систем бюджет составляет примерно 10—25 дБ. Бюджет должен покрывать потери во всех элементах линии связи с запасом в 3—6 дБ. Таким образом, зная имеющийся бюджет оптической мощности и потери в элементах линии связи, можно рассчитать ее максимально допустимую длину.

### 2.2.2. Оптические кабели

Несколько световодов, заключенных в защитную оболочку, представляют из себя оптические кабели (ОК). В настоящее время накоплен большой опыт применения в ВОЛС различных типов и конструкций ОК.

Различают ОК для наружной и внутренней прокладок.

В электроэнергетике в большинстве случаев ВОЛС прокладываются вдоль высоковольтных линий электропередач (ЛЭП). В этом случае практический интерес представляют оптические кабели для

подвески на ВЛ электропередачи. Особенно перспективно подвешивать ОК на опорах ВЛ электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения, имеющих наивысшую надежность.

В мировой практике различают семь основных видов установки ОК:

- в грозозащитном тросе;
- в фазном проводе;
- навивной на грозотрос;
- навивной на фазный провод;
- присоединенный;
- самонесущий диэлектрический;
- самонесущий металлический.

Наиболее широко используется решение с ОК, встроенным в грозозащитный трос. Это около 80 % всех ВОЛС на вновь строящихся линиях электропередач и свыше 40 % на реконструируемых.

Подробная информация по ОК приводится в [11].

### 2.2.3. Оптические разъемы

Для подключения приемопередающего оборудования к жилам оптического кабеля используются стандартизованные оптические разъемы (коннекторы).

Наибольшее распространение в промышленном применении получили следующие типы коннекторов (рис. 2.2—2.5): ST (BFOC/2.5), FC, SC, LC.

**Коннектор ST.** Название ST является упрощенным. Полное обозначение разъема — BFOC/2.5. Предназначен для использования с многомодовым оптоволоконном. Является одинарным (позволяет подсоединить одно оптоволоконно) и имеет поворотный фиксатор байонетного типа, что обеспечивает надежное крепление и защищенность от внешних воздействий.

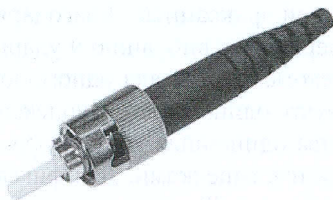


Рис. 2.2. Коннектор ST (BFOC/2.5)



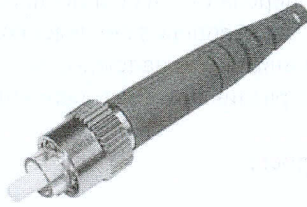


Рис. 2.3. Коннектор FC

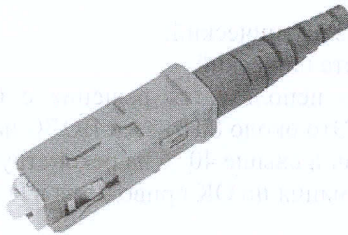


Рис. 2.4. Коннектор SC

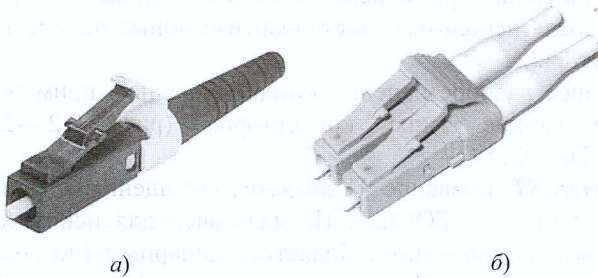


Рис. 2.5. Коннектор LC:

а — одинарный; б — дуплексный

**Коннектор FC.** Предназначен для одномодового применения. Одинарный, с резьбовой фиксацией. Благодаря особенностям конструкции хорошо выдерживает вибрацию и удары.

**Коннектор SC.** Рекомендуется для одномодовых и многомодовых применений. Существуют одиночные и дуплексные варианты. В дуплексном исполнении два одиночных коннектора объединяются общим зажимом или соединяются защелками. Для фиксации используется защелка «тяги-толкая» (push-pull): при подключении внешний кожух придвигается к розетке и зацепы розетки фиксируют коннектор.

**Коннектор LC.** Является малогабаритным вариантом коннектора SC. Может быть в одиночном и дуплексном исполнениях. Для фиксации разъема предусмотрена защелка.

#### 2.2.4. Подключение устройства ДЗЛ к оптическому кабелю

Цифровое устройство ДЗЛ должно иметь оптические входы соответствующего типа для подключения к жилам оптического кабеля. Обычно производители защит имеют несколько вариантов исполнения устройств, которые можно оговаривать при заказе терминала ДЗЛ. Согласованию подлежат:

- тип оптического передатчика/приемника, установленного в устройство защиты. Данный параметр зависит от длины защитного КС и используемого оптоволокна (одномодовый или многомодовый);
- тип коннектора.

В случае если производитель предусматривает только один тип передатчиков в устройстве защиты, применяются внешние медиаконвертеры оптических сигналов.

Ниже приводятся описания типовых случаев соединения полукомплектов ДЗЛ с помощью выделенной ВОЛС.

а) Прямое подключение полукомплектов с использованием двух жил многомодового оптического кабеля (ОК) (рис. 2.6).

Направленные в разные стороны пары «передатчик — приемник» двух полукомплектов ДЗЛ непосредственно соединяются с помощью волокон оптического кабеля. Типовая длина защищаемой линии — до 2 км (длина волн оптического излучения — 850 нм).

б) Прямое подключение полукомплектов с использованием двух жил одномодового оптического кабеля (рис. 2.7). Типовая длина защищаемой линии — до 60—80 км (длина волны — 1300 нм) или до 120—150 км (длина волны — 1550 нм).



Рис. 2.6. Прямое подключение полукомплектов с использованием двух жил многомодового ОК



Рис. 2.7. Прямое подключение полукомплектов с использованием двух жил одномодового ОК

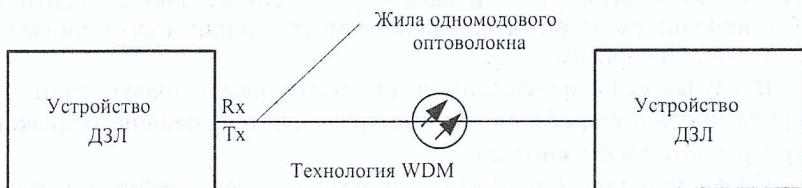


Рис. 2.8. Прямое подключение полукомплектов с использованием одной жилы ОК при применении оптических приемопередатчиков с поддержкой технологии WDM



Рис. 2.9. Подключение полукомплектов с использованием медиаконвертеров: С — оптический конвертер

в) Прямое подключение полукомплектов с использованием одной жилы оптического кабеля при применении оптических приемопередатчиков с поддержкой технологии WDM (Wavelength-division multiplexing) (рис. 2.8).

Благодаря использованию разных длин волн на передачу и прием технология WDM позволяет использовать одно одномодовое оптоволокно для организации КС. Типовая длина защищаемой линии составляет до 100 км.



С учетом того, что оборудование с поддержкой технологии WDM дороже обычного, использование данного варианта оправдано при дефиците свободных жил ОК.

г) Подключение полукомплектов с использованием медиаконвертеров (рис. 2.9).

Например, устройство ДЗЛ имеет оптический приемопередатчик, предназначенный для работы с многомодовым оптоволоконном. Для защиты длинных высоковольтных линий (длиной более 2 км) необходимо использовать пассивный преобразователь оптического сигнала — из многомодового сигнала в одномодовый. На другом конце линии аналогичный преобразователь выполняет обратное действие.

### **2.2.5. Выводы**

Организация цифрового КС между полукомплектами с помощью выделенной ВОЛС на сегодняшний день является наиболее предпочтительным вариантом. Это обуславливается двумя факторами: свойствами самого способа передачи информации в ВОЛС (см. п. 2.1), а также отсутствием необходимости в использовании сложного промежуточного оборудования, что значительно упрощает процесс наладки и проверки, повышает быстродействие и надежность функционирования.

## **2.3. Мультиплексированные цифровые сети**

### **2.3.1. Общие сведения**

Для передачи информации между устройствами РЗА могут использоваться преимущественно два типа телекоммуникационных цифровых сетей: PDH и SDH. Оба типа сетей основываются на использовании мультиплексирования цифровых потоков [12, 11].

Цифровые потоки от множества абонентов на сетевых узлах *мультиплексируются* в каналы различной емкости, соединяющие узлы между собой. На другом конце канала выполняется демультиплексирование — выделение требуемого потока из канала. Мультиплексирование и демультиплексирование, естественно, выполняются на обоих концах одновременно, поскольку связь между узлами должна быть двусторонней. Мультиплексирование осуществляется с помощью разделения во времени (технология TDM — Time Division Multiplexing) (рис. 2.10). В магистральном канале информация организована в виде непрерывной последовательности кадров (порций

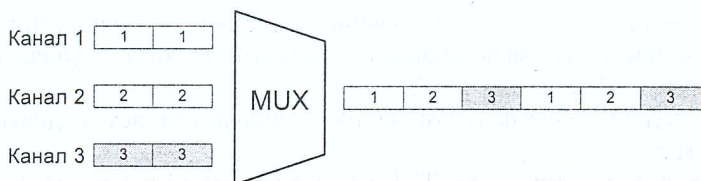


Рис. 2.10. Мультиплексирование каналов по технологии TDM

двоичных данных фиксированного формата). Каждому абонентскому каналу в каждом кадре отводится тайм-слот — ячейка, в которой передаются данные этого канала. При этом в мультиплексированной линии байты элементарных каналов последовательно чередуются. Кроме данных каналов в кадре присутствует и служебная информация, необходимая для синхронизации и поддержки системы сигнализации.

Цифровые каналы различной емкости образуют *иерархии каналов*, в которых старшие каналы включают в себя целое число младших. В большинстве стран (включая и Россию) используется международный стандарт и ряд каналов E1/E2/E3/E4; в США, Канаде и Японии — T1/T2/T3/T4. В дальнейшем будем рассматривать только европейский стандарт E1 и т.д.

За элементарный цифровой канал сети (в том числе телефонной) принимается DS0 — дуплексный со скоростью 64 кбит/с в каждом направлении, который обеспечивает передачу голосовых данных (8 бит, 8 кГц). Каналы DS0 по технологии TDM мультиплексируются в каналы DS1, которые в европейском стандарте называются E1. Канал E1 со скоростью передачи 2048 Мбит/с ( $32 \times 64$ ) состоит из 30 каналов DS0 и двух дополнительных каналов 64 кбит/с, несущих управляющую информацию.

Информация в каналах E1 организована в виде *кадров*, непрерывно следующих друг за другом. В каждом кадре представлены байты от каждого элементарного канала, а также имеются служебные поля для синхронизации. Положение байтов каждого элементарного канала в кадре DS1 строго фиксировано.

Для магистральных линий каналы DS1 мультиплексируются в каналы большей емкости, для чего была разработана иерархия цифровых каналов (табл. 2.1).

Таблица 2.1. Иерархия плезиохронных цифровых каналов PDH

Канал	Стандарт	Число каналов DS-0	Стандарт G703	Скорость передачи данных, кбит/с
DS-0	E0	1	.1	64
DS-1	E1	30	.6	2048
DS-2	E2	120	.7	8448
DS-3	E3	480	.8	34368
DS-4	E4	1920	.9	139264

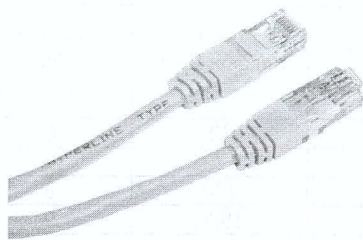
Таблица 2.2. Иерархия синхронных цифровых каналов SDH

Канал SDH	Скорость передачи данных
STM-1	155,52 Мбит/с
STM-3	466,56 Мбит/с
STM-4	622,08 Мбит/с
STM-6	933,12 Мбит/с
STM-8	1,244 Гбит/с
STM-12	1,886 Гбит/с
STM-16	2,488 Гбит/с
STM-64	9,952 Гбит/с

Рассмотренная цифровая иерархия скоростей передачи получила название плезиохронной цифровой иерархии (PDH — Plesiochronous Digital Hierarchy). Плезиохронность означает «почти синхронность»: аппаратура разных узлов, объединяемая цифровыми каналами, синхронизируется от собственных тактовых генераторов. Их частоты близки, но, естественно, имеют отклонения. Поэтому в мультиплексорах применяются специальные технологии, обеспечивающие синхронизацию, в том числе самосинхронизирующее кодирование. Сравнительно несложная система мультиплексирования PDH оборачивается сложностью выделения отдельных каналов из каналов высокого уровня. Сборка/разборка каналов на составляющие возможна только полная. Это является основным недостатком сетей, основанных на технологии PDH.

Сети на основе технологии SDH (Synchronous Digital Hierarchy) строятся по синхронному принципу, и в них используются *иерархии синхронных цифровых каналов* (табл. 2.2). В SDH каналы обозначаются как STM-n (Synchronous Transport Module). Благодаря синхронности мультиплексирование и демультиплексирование выполняются относительно просто: любой канал младшего уровня может быть выделен из любого старшего канала, не затрагивая остальных каналов.





**Рис. 2.11. Внешний вид разъема RJ-45**

Современные цифровые сети, как правило, строятся на основе совокупности аппаратуры PDH и SDH. В зависимости от необходимой пропускной способности выбирают технологию: PDH — для цифровых каналов от 64 кбит/с до 140 Мбит/с, SDH — для каналов с большей скоростью. Технологии PDH и SDH взаимодействуют друг с другом через процедуры мультиплексирования и демultipлексирования потоков E1, E3 и E4 PDH в аппаратуре SDH.

Рекомендации G.703 (Physical/electrical characteristics of hierarchical digital interfaces) определяют физические и электрические характеристики интерфейсов для каналов PDH, а также для STM-1 (G.703.12). Для каждого типа канала в G.703 имеется отдельный раздел (см. табл. 2.1).

Необходимо выделить интерфейс по стандарту G.703.1 для скорости 64 кбит/с, так как именно он наиболее часто используется для подключения устройств РЗА к мультиплексорам цифровых сетей. Определяется три варианта интерфейса с асимметричной (два коаксиальных кабеля) и симметричной (2, 3 или 4 витых пары) передачей. Варианты различаются способом кодирования и передачи синхронизации: сонаправленная (co-direction, co-dir), централизованная (central-directional) и противонаправленная (contra-directional).

В каналах E1 применяется сонаправленная синхронизация и витые пары с разъемами RJ-45 (рис. 2.11). Это 4-проводная линия: одна пара для передачи данных и синхронизации в одном направлении, другая — в обратном. Исходный двоичный поток логически и физически кодируется самосинхронизирующимся кодом.

### 2.3.2. Подключение устройства ДЗЛ к мультиплексированному каналу

Подключение устройств ДЗЛ выполняется через мультиплексоры нижнего уровня, куда информация поступает в качестве элементарного синхронного канала DS0 (64 кбит/с) и упаковывается в поток E1. Некоторые из устройств ДЗЛ для передачи информации могут использовать несколько каналов, занимая в потоке E1 несколько тайм-слотов.

Для подключения ДЗЛ к мультиплексору, как правило, используются следующие варианты интерфейсов:

- подключение по интерфейсу G.703.1;
- подключение по интерфейсу IEEE C37.94.

Подключение по G.703.1 жаргонно называют подключением «по меди», так как в этом случае используются две пары витых медных проводов. Максимальная длина связи между устройством ДЗЛ и мультиплексором, как правило, составляет 400 м. Недостатком такого варианта подключения является относительно низкая помехозащищенность, особенно в случае, если канал проходит вблизи силового оборудования подстанции.

В соответствии со стандартом IEEE C37.94 подключение выполняется с помощью ВОЛС. Стандартом предусматривается использование многомодового оптоволокну и оптических разъемов типа BFOC/2.5 (ST). Длина оптического кабеля может быть до 2 км, что обеспечивает подключение устройства ДЗЛ к мультиплексору при их расположении на значительном расстоянии. Данный вариант подключения является предпочтительным, так как обеспечивает очень высокий уровень помехозащищенности и гибкие возможности в территориальном расположении оборудования связи.

Существуют решения с нестандартным применением протокола C37.94, когда в качестве канала используют одномодовое оптоволокну, но с сохранением программного протокола. В этом случае появляется возможность защиты линий протяженностью более 2 км без применения дополнительных конвертеров. Большинство производителей защит обозначают такое исполнение аббревиатурой C37.94sm (single mode).

Краткая информация по интерфейсу IEEE c37.94 приведена в прил. 3.

### 2.3.3. Выводы

Повсеместное распространение глобальных цифровых сетей позволяет использовать их для передачи (транспорта) информации между устройствами защиты на теоретически неограниченное расстояние. При этом нет необходимости в физической прокладке специализированного выделенного канала связи, так как используются уже имеющиеся. Для этого достаточно установить на подстанции или станции мультиплексор, собирающий информацию от устройств, и связать его коротким каналом с узлом глобальной сети.

На практике жесткие требования, которые предъявляют устройства защиты (особенно ДЗЛ), накладывают существенные ограничения на использование цифровых сетей. При проектировании связи между терминалами защиты необходимо учитывать ряд сложных комплексных факторов, таких как длительность и стабильность времени передачи, надежность каналов и т.д. Значительно усложняется процесс пусконаладочных работ, особенно при использовании ДЗЛ многоконцевых линий.

## 2.4. Информация, передаваемая по защитным каналам. Структура пакета данных

В нормальном режиме работы, когда канал связи исправен, подкомплекты ДЗЛ осуществляют постоянный двусторонний обмен информацией. В большинстве устройств обмен проводится каждые 5 мс.

Состав и структура данных, передаваемых по защитному каналу, не стандартизованы. В связи с этим организация ДЗЛ возможна только с использованием в качестве подкомплектов одинаковой модели устройств одного завода-изготовителя. Тем не менее можно выделить некоторые общие черты в формировании структуры пакета информации.

Типичная структура пакета HDLC-подобного протокола изображена на рис. 2.12. HDLC (High-Level Data Link Control) — протокол высокоуровневого управления каналом передачи данных, является опубликованным ISO стандартом и базовым для построения других протоколов канального уровня.

Стартовый и стоповый флаги — это последовательность «0111 1110», с которой начинается и заканчивается каждый кадр (пакет) посылки (определяется в стандарте HDLC). По флагам проводится выделение кадра и его синхронизация.



Старт-флаг	Адрес	Данные	CRC	Стоп-флаг
01111110				01111110

Рис. 2.12. Структура передаваемого блока данных

Адрес определяет идентификационный номер устройства, передающего информацию. Поле адреса используется для проверки того, что полученное сообщение поступает от соответствующего оборудования. Для этого каждому полукомплекту ДЗЛ в системе присваивается свой уникальный номер. Затем терминал программируется на прием посылки только от конкретного номера полукомплекта. Это исключает прием неверных данных в случае сбоя в работе мультиплексора сети либо при ошибках персонала в ходе наладочных работ.

Контрольная сумма (CRC) применяется для контроля искажения данных при пересылке. Если функция контроля CRC выявляет несоответствие, то сообщение не используется.

Данные можно разделить на следующие составляющие: метки времени, значения тока, информация о статусе и передаваемых командах.

Метки времени используются для синхронизации векторов тока в полукомплектах. Подробнее способы синхронизации рассматриваются в § 2.5.

Значения тока могут передаваться в виде ортогональных составляющих первой гармоники трех фазных токов либо в виде мгновенных значений этих токов.

Информация о статусе и передаваемых командах обычно представляется в виде отдельных битов, отвечающих за определенное состояние. Это могут быть сигналы отключения, блокировки и аварийной сигнализации, а также ретрансляция пользовательских дискретных сигналов.

Содержимое поля «Данные» может меняться в зависимости от режима работы полукомплекта ДЗЛ. Рассмотрим возможные режимы работы на примере устройства «Сириус-2-ДЗЛ-01» [13]:

- рабочий;
- стартовый;
- тестовый (или наладочный).

Рабочий режим является основным состоянием устройства защиты. В этом режиме выполняются все заложенные функции и обеспечивается защита линии. Рабочий режим возможен только при наличии синхронизированной связи между полукомплектами.

В стартовый режим устройство переходит автоматически при включении полукомплекта либо при восстановлении защитного канала после длительного отсутствия связи. Данный режим предшествует рабочему и предназначен для передачи тестовой информации, подтверждающей исправность канала связи, совместимость версий устройств, а также для выполнения синхронизации полукомплектов.

Тестовый (наладочный) режим предназначен для проведения работ по наладке устройства защиты и каналов связи между полукомплектами ДЗЛ. Данный режим должен вводиться в действие по команде потребителя только в одном из полукомплектов. При этом тестируемый терминал в каждой посылке выставляет специальный бит, который переводит удаленный терминал в соответствующий режим работы. Удаленный терминал блокирует работу всех защит и возвращает получаемые по защитному каналу токи по другой фазе (выполняет транспонирование или перестановку фаз), например  $A$  в  $B$ ,  $B$  в  $C$ ,  $C$  в  $A$ . Таким образом, в режиме тестирования проверка локального терминала, а также каналов связи проводится при подаче токов только на один терминал. Например, для проверки расчета тормозного и дифференциального токов, а также тормозной характеристики по фазе  $A$ , достаточно подать ток: в фазу  $A$  (моделируем локально измеренный ток) и в фазу  $C$  (которая за счет транспонирования в удаленном терминале превращается в удаленный ток фазы  $A$ ).

## **2.5. Способы синхронизации по времени полукомплектов дифференциальной защиты линии**

### **2.5.1. Синхронизация методом «эхо-сигнала»**

Для правильного расчета дифференциального и тормозного токов в цифровой ДЗЛ необходимо, чтобы выборки тока от защит, установленных по концам защищаемой линии, были синхронизированы по времени. В общем случае моменты выборок не совпадают по концам линии из-за отсутствия синхронности запуска полукомплектов защит, а также за счет небольшого различия (дрейфа) частот выборок аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

Основным способом согласования полукомплектов ДЗЛ по времени является так называемый метод «эхо-сигнала». Существует много вариаций названия данного метода: «пингование», «пинг-понг». Каждый полукомплект имеет встроенные точные часы (счетчик), по которым проводится запуск АЦП для измерения тока. Суть способа

заключается в нахождении разности времен между этими часами на обоих концах линии с помощью эхо-сигнала и компенсации этой разности при сравнении векторов тока.

Рассмотрим, каким образом реализуется данный метод синхронизации. Пусть имеются полукомплекты ДЗЛ, установленные на стороне подстанции *A* и *B* (рис. 2.13). В моменты времени  $tA1$ ,  $tA2$  и т.д. проводится замер векторов тока в устройстве *A*. Аналогично проводятся выборки в устройстве *B*.

В момент времени  $tA1$  устройство *A* посылает по каналу связи сообщение с данными для устройства *B*. В сообщении содержится метка времени  $tA1$ , наряду с другой информацией и данными векторов тока, вычисленными в момент времени  $tA1$ . Сообщение поступает на устройство *B* с задержкой на время прохождения сигнала по каналу связи  $tp1$ . Устройство *B* регистрирует момент поступления сообщения  $tB^*$ .

Через определенное время устройство *B* также посылает данные на конец *A*. В посылаемом сообщении будет содержаться метка времени отправки  $tB3$ . Также в сообщении возвращается последняя метка времени  $tA1$ , полученная от устройства *A*, и разница между временем приема сообщения  $tB^*$  и временем отправки сообщения  $tB3$  (измерения тока) на конце *B*:  $td = tB3 - tB^*$ .

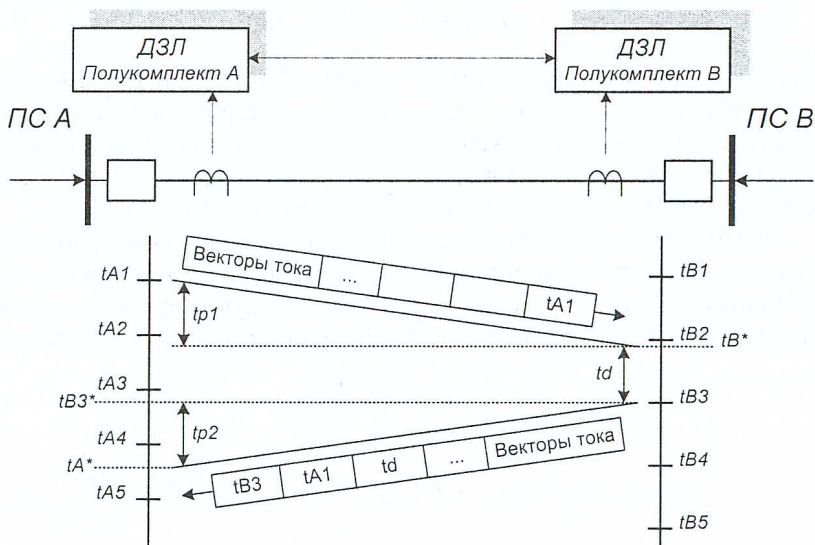


Рис. 2.13. Синхронизация методом «эхо-сигнала»



Сообщение поступает в устройство  $A$  в момент времени  $tA^*$  с задержкой на прохождение сигнала  $tp2$ . По полученному обратно эхосигналу определяется суммарная задержка на передачу сообщения в прямом и обратном направлениях:

$$(tA^* - tA1) = (td + tp1 + tp2).$$

Таким образом, в устройстве  $A$  время передачи информации по каналу связи в одном направлении вычисляется по выражению

$$tp1 = tp2 = (tA^* - tA1 - td)/2.$$

Вектор тока измеренный на стороне  $B$  в момент  $tB3$ , соответствует моменту  $tB3^*$  в системе отсчета устройства  $A$ :

$$tB3^* = tA^* - tp2.$$

На основе полученных времен выполняется согласование векторов тока двух сторон линии путем поворота вектора на угол, соответствующий разности времен их измерения.

Например, для расчета дифференциального тока в устройстве  $A$  на основе «своего» вектора, измеренного в момент  $tA3$ , и вектора, измеренного в устройстве  $B$  в момент  $tB3$  и переданного по каналу связи, необходимо повернуть вектор стороны  $B$  на угол:

$$\alpha = (tB3^* - tA3)f_{\text{тек}} 360^\circ,$$

где  $f_{\text{тек}}$  — текущая частота в сети, Гц;  $tB3^*$ ,  $tA3$  — моменты времени, с.

Необходимо учитывать, что данные выражения верны только в случае, когда времена прохождения сигналов по каналу связи в прямом и обратном направлениях совпадают:  $tp1 = tp2$ . Если эти времена отличаются, то говорят об асимметрии по времени канала связи.

Эхо-метод синхронизации предъявляет очень жесткие требования к каналу связи по величине асимметрии. Рассчитаем величину тока небаланса дифференциальной цепи, возникающую в связи с асимметрией канала связи. Из рис. 2.14 легко получить расчетные выражения:

$$\alpha = \frac{\Delta T}{2} \cdot \frac{360^\circ}{0,02};$$

$$\Delta I, \% = \Delta I / I \cdot 100 = 2 \cdot 100 \sin \frac{\alpha}{2} = 2 \cdot 100 \sin \left( \frac{\Delta T}{2 \cdot 2} \cdot \frac{360^\circ}{0,02} \right), \quad (2.2)$$

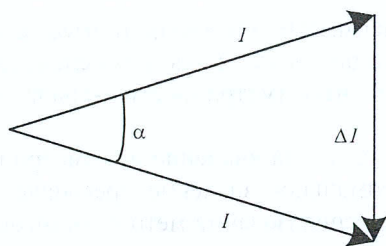


Рис. 2.14. Векторная диаграмма токов при наличии асимметрии канала связи

где  $\Delta I, \%$  — величина небаланса в процентах от величины сквозного тока  $I = I_1 = I_2$ ;  $\Delta T$  — асимметрия канала связи.

На основе выражений (2.2) получаем следующие соотношения:

$\Delta T$ , мс	$\Delta I, \%$
1	16
0,5	7,9
0,2	3
0,1	1,6

Из примера видно, что даже незначительная асимметрия канала приводит к значительной ошибке при сравнении двух векторов тока. Современные цифровые ДЗЛ допускают максимальную асимметрию в диапазоне от 0,1 до 2 мс в зависимости от чувствительности ступеней дифференциальной защиты.

Чаще всего проблема асимметрии встречается в цифровых каналах, использующих мультиплексированные сети. В этих сетях сообщение может проходить в прямом и обратном направлениях через различные узловые точки и мультиплексоры. На рис. 2.15 показан пример асимметрии, когда время передачи в одну сторону составляет 2 мс ( $B \rightarrow A$ ), а в другую — 3 мс ( $A \rightarrow C \rightarrow B$ ).

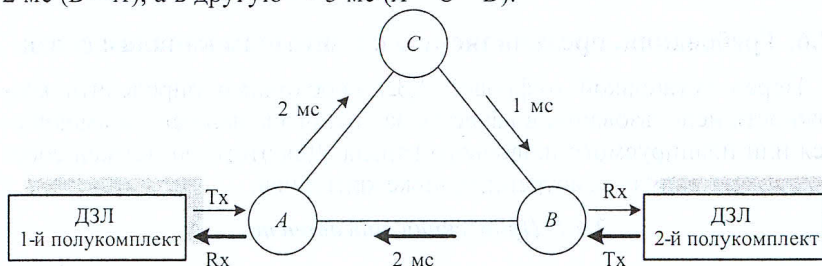


Рис. 2.15. Пример асимметричного канала связи

Если значение асимметрии известно и имеет стационарный (неизменный) характер, то она может быть скомпенсирована путем задания параметра (уставки) несимметричности канала в полукомплектах ДЗЛ.

Значительно хуже, когда значение асимметрии носит случайный характер и ее максимальное значение превышает допустимый уровень. В этом случае использование метода «пингования» не допустимо. Одним из вариантов решения вопроса является использование синхронизации по сигналам от системы GPS.

### *2.5.2. Синхронизация с помощью сигналов от GPS-системы*

Глобальная спутниковая система позиционирования GPS (Global Positioning System) позволяет определять не только местоположение, но и точное время. Приемники GPS, устанавливаемые на каждом конце защищаемой линии, выдают синхронизирующие импульсы. Данные импульсы вырабатываются на всех концах линии одновременно с максимальной погрешностью порядка 1 мкс. В современных цифровых устройствах РЗА предусматривается вход для подключения канала с синхроимпульсами.

При использовании GPS-синхронизации все полукомплекты ДЗЛ имеют точно синхронизированные часы, что позволяет выявлять любую асимметрию канала связи (в том числе нестабильную) и компенсировать ее.

Недостатком данной системы является снижение общей надежности системы из-за появления двух дополнительных звеньев «GPS-приемник — устройство ДЗЛ». Выход из строя данных связей приводит к необходимости вывода всей защиты либо существенного заглубления ступеней ДЗЛ. Также существует вероятность потери связи GPS-приемника со спутниками.

## **2.6. Требования, предъявляемые к защитным каналам связи**

Перед установкой цифровой ДЗЛ необходимо определить возможность использования в качестве защитного канала связи имеющегося или планируемого цифрового канала. Для этого он должен соответствовать ряду рассмотренных ниже критериев.

### *2.6.1. Пропускная способность*

Минимальная необходимая скорость цифрового канала 64 кбит/с. Это определяется объемом информации, которую нужно передавать, а



также соответствием стандартному каналу начального уровня DS0 (см. § 2.3), что позволяет использовать мультиплексированные сети.

Если позволяет канал связи, то некоторые цифровые ДЗЛ могут работать на скоростях вплоть до 512 кбит/с (8 тайм-слотов по 64 кбит/с), что позволяет несколько снизить время срабатывания защиты.

### **2.6.2. Надежность канала связи**

Для количественной оценки готовности используется коэффициент готовности [14]. Коэффициент готовности определяется как отношение времени, в течение которого канал находится в работоспособном состоянии, к общей длительности заданного периода, как правило, один год. Коэффициент готовности систем РЗА должен быть порядка 99,99 %. Это означает, что в течение года канал может находиться в неработоспособном состоянии не более следующего интервала времени:

$$\begin{aligned} T_{\text{нег}} &= (1 - K_{\text{гот}}) \cdot 365 \text{ дней} \cdot 24 \text{ часа} \cdot 60 \text{ мин} \cdot 60 \text{ с} = \\ &= 3153 \text{ с/год} = 52,55 \text{ мин/год}, \end{aligned}$$

где  $T_{\text{нег}}$  — суммарное допустимое время неработоспособного состояния канала связи;  $K_{\text{гот}} = 0,9999$  — коэффициент готовности.

Учитывая малое время  $T_{\text{нег}}$ , особенно с учетом перерывов работы канала, связанных с его ремонтом и профилактикой, следует обращать повышенное внимание на надежность используемого канала связи.

### **2.6.3. Максимальная задержка времени передачи сигнала в защитном канале**

От данного показателя напрямую зависит время срабатывания ДЗЛ:

$$T_{\text{сраб. сум}} = T_{\text{сраб. терм}} + dT_{\text{канала}},$$

где  $T_{\text{сраб. сум}}$  — суммарное время срабатывания защиты;  $T_{\text{сраб. терм}}$  — собственное время срабатывания защиты;  $dT_{\text{канала}}$  — задержка времени на передачу информации от одного полуконтакта к другому.

Кроме того, построение защиты рассчитано на определенную максимальную задержку в канале связи, по истечении которой передаваемая информация становится неактуальной и считается потерянной. Это ограничение связано с глубиной используемых буферов с отсче-

тами токов, а также максимальным периодом счетчиков синхронизации терминалов.

Типичное максимально допустимое время лежит в диапазоне от 5 до 20 мс.

#### 2.6.4. Максимальная допустимая асимметрия по времени защитного канала

Понятие асимметрии канала рассмотрено в § 2.5.

При использовании метода «пингования» для синхронизации полуккомплектов ДЗЛ типичная максимально допустимая асимметрия составляет порядка 0,5 мс. За счет увеличения порога срабатывания ступеней ДЗЛ можно несколько увеличить асимметрию до уровня порядка 2 мс, но такой режим является нежелательным, поскольку понижает чувствительность защиты, и предусматривается не всеми производителями защит.

#### 2.6.5. Сравнение каналов связи

Итоговая сравнительная оценка параметров каналов связи по рассмотренным критериям приведена в табл. 2.3.

Таблица 2.3. Сравнение каналов связи, применяемых для связи полуккомплектов ДЗЛ

Тип цифрового канала	Скорость канала	Надежность канала	Задержка в канале	Возможность асимметрии
Выделенная ВОЛС	Очень высокая (до 4 Гбит/с)	Очень высокая	Очень низкая (~0,1 мс)	Отсутствует
Мультиплексированные сети	Средняя — высокая (от 64 Кбит/с и выше)	Зависит от построения сети	Зависит от построения сети (~2—4 мс)	Высокая (зависит от построения сети)
Радиорелейная ЛС	Средняя (~115 Кбит/с)	Средняя	Средняя (2—4 мс)	Зависит от топологии

### Контрольные вопросы к главе 2

1. Назовите основные типы цифровых каналов, применяемых для организации защитного канала связи ДЗЛ.

2. В чем основные отличия многомодового и одномодового оптоволокна?

3. Укажите особенность оптических передатчиков с поддержкой WDM-технологии.

4. Каким образом осуществляется подключение устройств ДЗЛ к мультиплексированным каналам?

5. Назовите основные способы синхронизации по времени комплектов ДЗЛ.



## ГЛАВА ТРЕТЬЯ

# ЦИФРОВОЕ УСТРОЙСТВО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ДЛЯ ЛИНИЙ 6—220 кВ «СИРИУС-2-ДЗЛ-01». ПРИНЦИП РАБОТЫ И ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ СРАБАТЫВАНИЯ

### 3.1. Общие положения

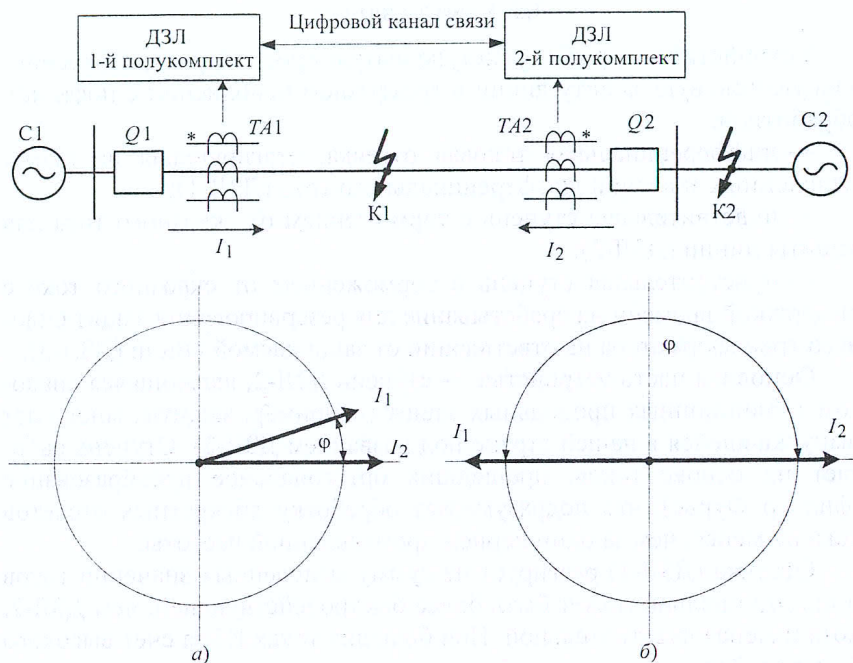
Устройство выполняет функции основной защиты воздушных, кабельных и смешанных воздушно-кабельных линий класса напряжений 6—220 кВ в сетях с эффективно заземленной или изолированной (компенсированной) нейтралью. Устройство может использоваться на двухконцевых линиях с одно- или двухсторонним питанием. Тип канала связи — цифровой по выделенной ВОЛС [13].

Защищаемая линия может иметь одно или несколько ответвлений с понижающими трансформаторами без источников питания. Для обеспечения чувствительности защиты на таких линиях может оказаться необходимым использование дополнительных (не входящих в состав устройства) измерительных органов по схемам, описание которых приводится далее в п. 3.4.4.

Дополнительно устройство выполняет функции УРОВ (устройство резервирования отказов выключателя), МТЗ и ЗОФ (защита от обрыва фаз).

Устройство реализовано без функции автоматики управления высоковольтным выключателем (АУВ) и должно использоваться совместно с уже существующей схемой управления и АПВ (автоматическое повторное включение) выключателя или с отдельным терминалом АУВ. Кроме того, целесообразно применение дополнительных устройств для обеспечения независимой системы резервных защит линии.

Защита построена по принципу пофазного сравнения значений и фаз токов, протекающих по концам защищаемой линии. Для этого на обоих концах линии устанавливаются полукомплекты, которые подключаются к измерительным ТТ (рис. 3.1). Полукомплекты связаны между собой с помощью защитного КС. Между полукомплектами по КС проводится взаимный обмен информацией о токах противоположного конца линии. По токам «своего» и «удаленного» конца линии выполняется расчет дифференциального и тормозного токов, на основании анализа которых защита принимает решение об отключении линии при наличии КЗ в защищаемой зоне.



**Рис. 3.1. Принцип работы ДЗЛ:**

*а* — КЗ на линии (точка К1); *б* — внешнее КЗ или нагрузочный режим (точка К2)

Связь между полукомплектами организуется только по выделенной ВОЛС, при этом не допускается наличие каких-либо промежуточных активных преобразователей и мультиплексоров, т.е. полукомплекты должны подсоединяться непосредственно к противоположным концам оптического кабеля.

Устройство поддерживает два независимых защитных КС, что позволяет организовать их полное дублирование и значительно повысить отказоустойчивость защиты.

В устройстве не предусмотрена компенсация емкостных токов линии, поэтому предполагается его использование на относительно коротких линиях (примерно до 20 км в случае кабельной линии и до 100 км в случае воздушной линии).

### 3.2. Состав защит

Устройство содержит трехступенчатую продольную дифференциальную токовую защиту линии в трехфазном исполнении с пофазной обработкой:

— дифференциальная токовая отсечка, реагирующая на сумму мгновенных значений дифференциального тока (ДЗЛ-1);

— чувствительная ступень с торможением от сквозного тока для защиты линии (ДЗЛ-2);

— чувствительная ступень с торможением от сквозного тока с выдержкой времени на срабатывание для резервирования защит силового трансформатора на ответвлении от защищаемой линии (ДЗЛ-3).

Основная часть устройства — ступень ДЗЛ-2, являющаяся аналогом традиционных продольных защит (например, защиты, много лет выпускавшейся в нашей стране под названием ДЗЛ-2). Ступень работает на основе токов, прошедших ортогональное преобразование (фильтр Фурье), что подразумевает обработку дискретных отсчетов тока не менее, чем за один период промышленной частоты.

Отсечка (ДЗЛ-1) реагирует на сумму мгновенных значений токов и принципиально может быть более быстродействующей, чем ДЗЛ-2, хотя и менее чувствительной. При больших токах КЗ за счет высокого быстродействия отсечка срабатывает на начальной части кривой тока до насыщения ТТ, т.е. на участке с малыми погрешностями ТТ.

Назначение ступени ДЗЛ-3 — резервирование защит на трансформаторах ответвлений. При КЗ за трансформатором ответвления продольная дифференциальная защита превращается в максимальную токовую защиту, включенную на сумму токов двух концов линии. Если ответвление единственное, то эта сумма равна току КЗ, т.е. току через трансформатор (если ответвлений несколько, то дифференциальный ток определяется током КЗ плюс токи нагрузки неповрежденных ответвлений). Если линия не имеет ответвлений, резервную ступень следует вывести из действия. Для селективного функционирования резервная ступень должна иметь выдержку времени, согласованную с защитами трансформаторов всех ответвлений.

### 3.3. Подключение цепей переменного тока

Каждый полукompлект защиты подключается к вторичным цепям ТТ, установленным на соответствующей стороне защищаемой линии. В зависимости от типа исполнения устройства возможно подключение к ТТ с номинальным вторичным током 5 или 1 А.



Имеется возможность использования защиты в тех случаях, когда на концах линии установлены ТТ с различными первичными или вторичными токами. Выравнивание коэффициентов трансформации ТТ выполняется цифровым способом внутри устройств.

Цепи переменного напряжения в данное устройство не заводятся.

### 3.4. Ступень ДЗЛ-2

#### 3.4.1. Формирование дифференциальных и тормозных токов. Тормозная характеристика

В устройстве для каждой фазы независимо рассчитываются действующие значения первой гармоники дифференциального и тормозного токов:

$$I_{\text{диф}} = |I_1 + I_2|, \quad (3.1)$$

$$I_{\text{торм}} = 0,5(|I_1| + |I_2|), \quad (3.2)$$

где  $I_1, I_2$  — векторы фазных токов двух сторон защищаемой линии в относительных единицах с учетом выравнивания их по величине и синхронизации по фазе. Положительное направление токов — от шин в линию.

При принятом способе формирования тормозного тока его величина в нагрузочном режиме равна току нагрузочного режима, а в режиме внешнего КЗ равна сквозному току.

Тормозная характеристика ступени ДЗЛ-2 приведена на рис. 3.2. Характеристика строится в относительных единицах — все токи приведены к базисному. В большинстве случаев базисный ток принимается равным максимальному рабочему току линии.

Тормозная характеристика определяется следующими уставками:

« $I_{\text{д1}}/I_{\text{б}}$ » — минимальный дифференциальный ток (отнесенный к базисному току  $I_{\text{б}}$ ) срабатывания;

« $I_{\text{т1}}/I_{\text{б}}$ » — конец первого участка характеристики по оси тормозного тока;

« $I_{\text{т2}}/I_{\text{б}}$ » — конец второго участка характеристики по оси тормозного тока;

« $K_{\text{т1}}, \%$ » — коэффициент торможения второго участка характеристики;

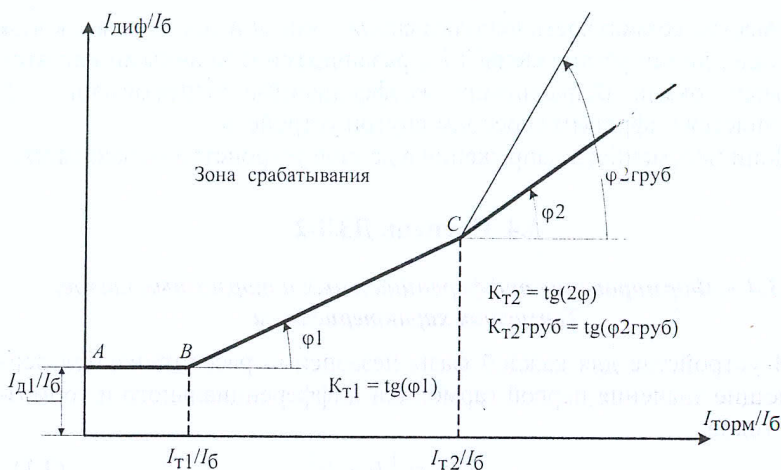


Рис. 3.2. Тормозная характеристика ступени ДЗЛ-2

« $K_{т2}$ , %» — коэффициент торможения третьего участка характеристики;

« $K_{т2}$  груб, %» — коэффициент торможения третьего участка характеристики с загрузлением при внешнем КЗ.

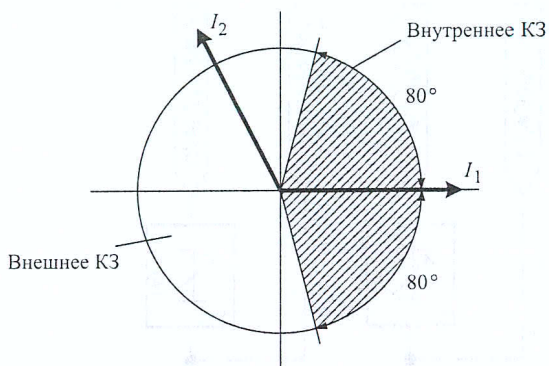
Таким образом, характеристика имеет три участка.

*Участок 1 (отрезок А—В).* На данном участке дифференциальный ток, необходимый для срабатывания, постоянный и определяется уставкой « $I_{д1}/I_б$ ». Конец первого участка и начало второго определяется уставкой « $I_{т1}/I_б$ ».

*Участок 2 (отрезок В—С).* Участок имеет регулируемый коэффициент торможения « $K_{т1}$ », который равен тангенсу угла наклона прямой  $BC$  к оси тормозного тока. Уставка коэффициента торможения задается в процентах. Конец второго участка определяется уставкой « $I_{т2}/I_б$ ».

*Участок 3 (правее точки С).* Для данного участка вводятся два значения коэффициента торможения — « $K_{т2}$ , %» и « $K_{т2}$  груб, %». В зависимости от соотношений токов двух концов защищаемой линии происходит автоматический переход с одного коэффициента на другой.

Коэффициент « $K_{т2}$  груб» должен иметь большее значение, чем « $K_{т2}$ », и предназначен для дополнительного загрузления третьего участка характеристики при внешних КЗ. Коэффициент « $K_{т2}$  груб» вводится в действие при выполнении следующих условий:



**Рис. 3.3.** Разграничение внешних и внутренних КЗ по угловым соотношениям между векторами первой гармоники фазных токов двух сторон линии (изображено соотношение векторов токов, соответствующих внешнему КЗ)

— первая гармоника токов одноименных фаз двух сторон линии превосходит значение  $|I_{T2}|$ ;

— угол между векторами первой гармоники соответствующих фазных токов двух сторон линии лежит в диапазоне от  $80^\circ$  до  $280^\circ$  (указанные векторные соотношения изображены на рис. 3.3).

При внутренних КЗ угол между соответствующими векторами токов расположен в секторе вблизи нуля, а при внешних близок к  $180^\circ$  (пример указанных режимов приведен на рис. 3.1).

Использование дифференциально-фазного принципа на третьем участке тормозной характеристики позволяет существенно повысить устойчивость защиты к излишней работе при внешнем КЗ с глубоким насыщением ТТ. Это объясняется меньшими фазными погрешностями в ТТ по сравнению с амплитудными в аналогичном режиме.

Функционально-логическая схема ДЗЛ-2 приведена на рис. 3.4. Логические цепи ДЗЛ-2 содержат две цепочки формирования сигнала на отключение: основная «ДЗЛ-2 осн.» и дополнительная «ДЗЛ-2 доп.» (с дополнительным токовым измерительным органом (ИО)). Дополнительная подступень используется только на линиях с ответвлениями и при отсутствии ответвлений должна быть выведена из действия.

#### 3.4.2. Основная подступень ДЗЛ-2

Измерительная часть включает два ИО, объединенных по схеме «И»: ИО с торможением и ИО с блокировкой от БНТ.



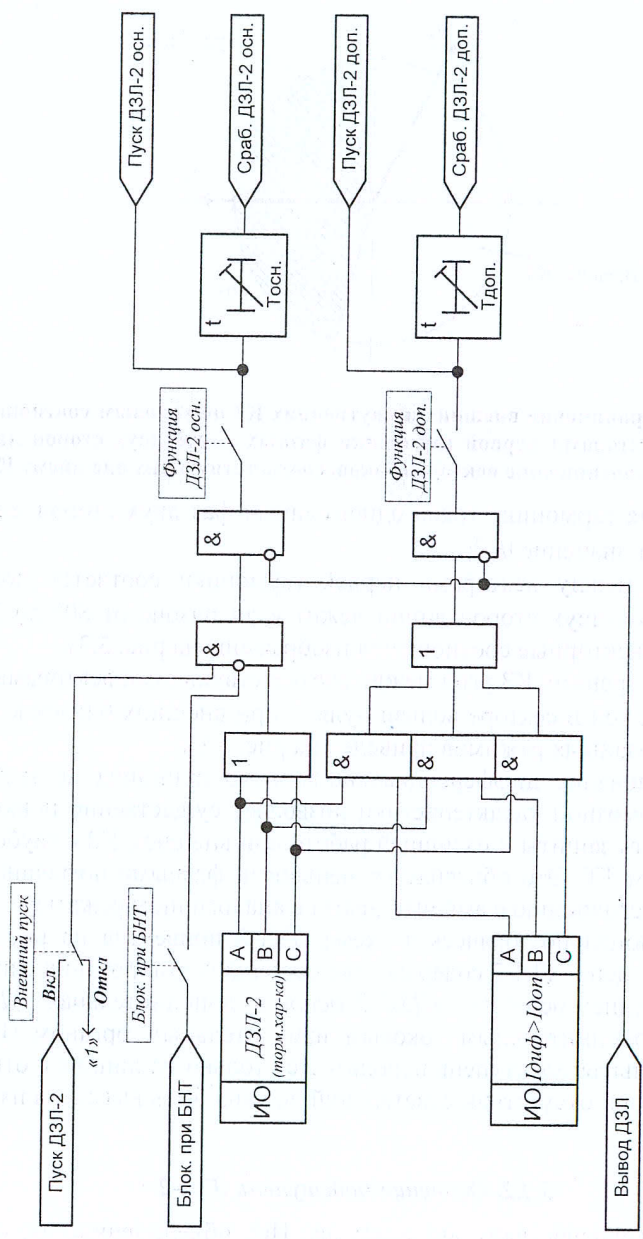


Рис. 3.4. Функционально-логическая схема ступени ДЗЛ-2

ИО с блокировкой от БНТ контролирует содержание второй гармоники. Для линий без ответвлений пуск ступени может выполняться без контроля указанного ИО, что осуществляется с помощью уставки «ДЗЛ-2 — Блокир. при БНТ».

ИО с блокировкой при БНТ имеет пофазное исполнение и основывается на контроле отношения действующего значения второй гармоники к действующему значению первой гармоники фазного тока. Срабатывание ступени блокируется, если контролируемое соотношение превышает уставку «ДЗЛ общие —  $I_{Г2}/I_{Г1}$ ».

Выдержка времени на срабатывание регулируется с помощью уставки « $T_{осн}, с$ ».

Для линий с отпайками предусмотрен пуск основной подступени с контролем наличия внешнего сигнала на дискретном входе «Пуск ДЗЛ-2». Наличие пуска задается с помощью уставки «ДЗЛ-2 — Внешний пуск».

### 3.4.3. Дополнительная подступень ДЗЛ-2

Пуск дополнительной подступени выполняется от двух ИО, выходы которых пофазно объединяются по условию «И»:

- ИО с торможением;
- ИО, контролирующий превышение дифференциальным током заданного порога « $I_{доп}/I_б$ ».

Выдержка времени на срабатывание регулируется с помощью уставки « $T_{доп}, с$ ».

### 3.4.4. Использование ДЗЛ-2 для защиты линий с ответвлениями

Для исключения неправильной работы ступени на линиях с ответвлениями необходимо, чтобы ток срабатывания был отстроен от возможных максимальных токов ответвления:

- от суммарного нагрузочного тока ответвлений;
- от тока КЗ за силовым трансформатором ответвления;
- от БНТ (броска тока намагничивания) трансформатора при постановке его под напряжение.

Отстройка от указанных режимов проводится по току срабатывания ступени « $I_{д1}/I_б$ ». С учетом обеспечения необходимой чувствительности ДЗЛ отстройка от КЗ может привести к недопустимо низкой чувствительности. В этом случае необходимо использовать дополнительные ИО, которые отстроены от КЗ на стороне низкого напряжения трансформатора ответвления. Указанные дополнительные ИО не входят в состав устройства, и используются внешние.

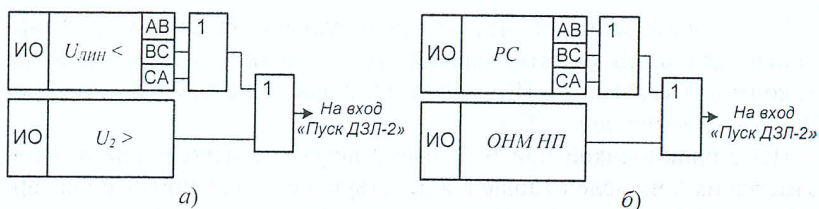


Рис. 3.5. Функциональные схемы внешних комплектов ИО, предназначенных для отстройки ДЗЛ-2 от КЗ на стороне низкого напряжения трансформатора ответвления:

*а* — комбинированный пуск по напряжению; *б* — пуск от междуфазных РС и ОНМ НП

Варианты выполнения дополнительных ИО:

— пуск по напряжению обратной последовательности и по минимальному напряжению прямой последовательности (комбинированный пуск по напряжению, рис. 3.5, *а*; рекомендуется на линиях 6—35 кВ);

— три реле междуфазного сопротивления и реле направления мощности нулевой последовательности для сетей с эффективно заземленной нейтралью (рис. 3.5, *б*; рекомендуется на линиях 110—220 кВ).

Сигнал срабатывания дополнительных ИО заводится на вход «Пуск ДЗЛ-2». При этом должна быть задана уставка «ДЗЛ-2 — Внешний пуск — ВКЛ».

Для организации внешнего пуска может использоваться схема, собранная на основе нескольких внешних реле, либо могут использоваться реле микропроцессорного устройства резервной защиты линии (например, Сириус-2-МЛ — для сетей 6—35 кВ, Сириус-3-ЛВ-02 (03) — для сетей 110—220 кВ).

Наличие ряда блокировок ДЗЛ-2 на линиях с ответвлениями приводит к некоторому снижению надежности и быстродействия. Для резервирования основной цепи отключения ДЗЛ-2 вводится в действие дополнительная подступень «ДЗЛ-2 доп.», отличительной особенностью которой является отсутствие блокировок и внешних цепей пуска. В итоге сохраняются требуемые показатели надежности.

Дополнительная подступень благодаря дополнительному токовому органу отстраивается от токов БНТ и КЗ на низкой стороне трансформатора ответвления. Это приводит к снижению чувствительности, но, как показывают расчеты, в большинстве случаев ее достаточно для срабатывания при КЗ на линии. Исключение составляют повре-



ждения через большие переходные сопротивления или в минимальных режимах работы питающих систем. В этих случаях срабатывает основная цепочка ДЗЛ-2.

### 3.5. Ступень ДЗЛ-3

Тормозная характеристика ДЗЛ-3 имеет форму и параметры, аналогичные характеристике ДЗЛ-2, но содержит только первые два участка. Тормозная характеристика ДЗЛ-3 приведена на рис. 3.6. Формирование дифференциальных и тормозных токов выполняется по выражениям (3.1) и (3.2).

### 3.6. Расчет дифференциальной защиты линии

#### 3.6.1. Расчет коэффициента цифрового выравнивания

Для учета различия коэффициентов трансформации ТТ, установленных по концам защищаемой линии, необходимо для каждого из полуккомплектов рассчитать уставку  $K_{\text{выр ТТ}}$ .

Коэффициент выравнивания выбирается по выражению:

$$K_{\text{выр ТТ}} = I_{\text{б}} / I_{\text{ном}}, \quad (3.3)$$

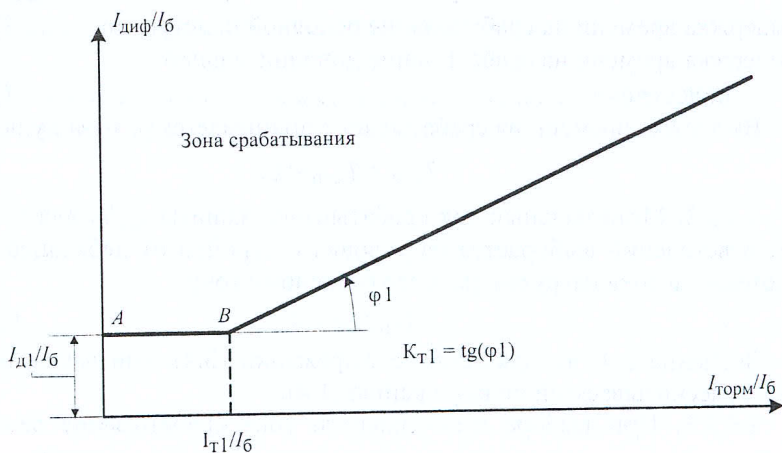


Рис. 3.6. Тормозная характеристика ступени ДЗЛ-3

где  $I_б$  — первичный базисный ток, в большинстве случаев принимаемый равным максимальному рабочему току линии. Базисный ток должен быть принят одинаковым для обоих полукомплектов;  $I_{ном}$  — первичный номинальный ток ТТ.

Поскольку номинальный ток ТТ, как правило, обычно больше максимального рабочего тока, к которому близок базисный, коэффициент выравнивания обычно меньше 1.

### 3.6.2. Выбор параметров чувствительной ступени (ДЗЛ-2)

3.6.2.1. Выбору подлежат следующие параметры:

Минимальный ток срабатывания.....	$I_{д1}/I_б$
Конец первого участка характеристики .....	$I_{т1}/I_б$
Конец второго участка характеристики .....	$I_{т2}/I_б$
Коэффициент торможения второго участка характеристики .....	$K_{т1}, \%$
Коэффициент торможения третьего участка характеристики .....	$K_{т2}, \%$
Коэффициент торможения третьего участка характеристики с загрузлением при внешнем КЗ .....	$K_{т2} \text{ груб}, \%$
Пороговый дифференциальный ток срабатывания дополнительного ИО для организации дополнительной подступени .....	$I_{доп}/I_б$
Выдержка времени на срабатывание основной подступени .....	$T_{осн}$
Выдержка времени на срабатывание дополнительной подступени .....	$T_{доп}$
Выдержка времени на срабатывание принимается равной нулю:	

$$T_{осн} = T_{доп} = 0.$$

3.6.2.2. Минимальный ток срабатывания защиты  $I_{д1}/I_б$  для линий без ответвлений выбирается из условия отстройки от небаланса при протекании тока нагрузки, равного базисному току:

$$I_{д1}/I_б \geq 0,4. \quad (3.4)$$

Значение 0,4, используемое в выражении (3.4), учитывает небаланс, рассчитываемый по выражению (1.4).

3.6.2.3. При выборе минимального тока срабатывания защиты  $I_{д1}/I_б$  на линиях с ответвлениями без генерирующих источников необходимо учитывать условие (3.4), а также ряд дополнительных:

— отстройка от КЗ на шинах НН трансформаторов ответвлений:

$$I_{д1}/I_{б} = K_{отс} I_{КЗ \text{ отв}}/I_{б}, \quad (3.5)$$

где  $K_{отс}$  — коэффициент отстройки, принимается значение 1,5;  $I_{КЗ \text{ отв}}$  — максимальное значение тока КЗ на шинах НН трансформатора ответвления;

— отстройка от суммарного тока нагрузки ответвлений:

$$I_{д1}/I_{б} = K_{отс} I_{сумм. \text{ нагр. отв}}/I_{б}, \quad (3.6)$$

где  $K_{отс}$  — принимается равным 1,5;  $I_{сумм. \text{ нагр. отв}}$  — суммарный ток нагрузки всех ответвлений;

— отстройка от броска тока намагничивания при постановке под напряжение трансформаторов ответвлений (условие проверяется, если не используется блокировка ступени по второй гармонике дифференциального тока):

$$I_{д1}/I_{б} = K_{отс} I_{броска}/I_{б}, \quad (3.7)$$

где  $K_{отс}$  — принимается равным 1,5;  $I_{броска}$  — максимальное значение броска тока намагничивания трансформатора ответвления.

В случае если на линии имеется несколько отпаяк, рекомендуется взамен отстройки от БНТ задействовать блокировку. Для линий 110 кВ величина тока при броске намагничивания определяется по расчетным выражениям, приведенным в [15, приложение VII]. Для линий меньших напряжений, а также для линий 110 кВ упрощенно можно считать, что ток броска не превосходит шестикратное значение номинального тока трансформатора.

Если расчет уставки минимального тока срабатывания показал, что отстройка от броска тока намагничивания является определяющей и при этом не обеспечена чувствительность, то необходимо ввести блокировку по второй гармонике, тем самым повысить чувствительность защиты. Без необходимости вводить блокировку не рекомендуется.

В качестве уставки принимается наибольшее значение, полученное по выражениям (3.4)—(3.7).

После того как выбрано значение уставки, необходимо провести проверку чувствительности по методике, приведенной далее в п. 3.6.2.9. Дело в том, что при отстройке по выражению (3.5) условие обеспечения по чувствительности выполняется в редких случаях, когда на ответвлении установлены маломощные силовые трансформаторы.



торы. В других случаях, когда чувствительность не обеспечивается либо полученное значение уставки превышает верхнюю границу диапазона, необходимо использовать внешний пуск ступени от дополнительных ИО, которые отстроены от КЗ на стороне низкого напряжения трансформатора ответвления. Подробное описание использования внешнего пуска приведено в [13].

При использовании внешнего пуска ДЗЛ-2 необходимо:

— завести сигнал внешнего пуска на вход терминала «Пуск ДЗЛ-2»;

— задать уставки в соответствии с табл. 3.1;

— выбрать уставку  $I_{д1}/I_6$  исходя из максимального тока срабатывания без учета условий (3.5) (отстройка от тока КЗ на стороне НН трансформатора ответвления) и (3.7) (отстройка от броска тока намагничивания трансформатора);

— уставку  $I_{доп}/I_6$  выбрать исходя из максимального значения, полученного по условиям (3.4), (3.6).

3.6.2.4. Выбор точки перехода со второго участка характеристики на третий  $I_{т2}/I_6$ :

$$I_{т2}/I_6 = 4I_{ном} / I_6. \quad (3.8)$$

Таблица 3.1. Рекомендуемые значения уставок при использовании внешнего пуска ДЗЛ-2

Наименование уставки	Значение
ДЗЛ-2 осн.	Вкл
$T_{осн}$ , с	0,00
$I_{д1}/I_6$	В соответствии с расчетом
$I_{т1}/I_6$	В соответствии с расчетом
$I_{т2}/I_6$	В соответствии с расчетом
$K_{т1}$ , %	В соответствии с расчетом
$K_{т2}$ , %	В соответствии с расчетом
$K_{т2}$ груб, %	В соответствии с расчетом
Блокир. при БНТ	Вкл
Внешний пуск	Вкл
ДЗЛ-2 доп.	Вкл
$T_{доп}$ , с	0,00
$I_{доп}/I_6$	В соответствии с расчетом

Расчетное выражение приведено с учетом того, что при кратности первичного тока больше 4, возможно существенное насыщение ТТ и требуется усиленное торможение, которое обеспечивается на третьем участке тормозной характеристики.

3.6.2.5. Коэффициент торможения на втором участке  $K_{Т1}$ .

Коэффициент торможения на втором участке, определяющий наклон характеристики, находится из условия отстройки от срабатывания под влиянием тока небаланса в дифференциальной цепи при внешнем (сквозном) КЗ по выражению:

$$K_{Т1} \geq \frac{K_{отс}(K_{пер}\varepsilon + \Delta f_{выр}) \cdot 100}{K_{сн.т}}, \quad (3.9)$$

где  $K_{отс}$  — коэффициент отстройки, принимается равным 1,2;  $K_{пер}$  — коэффициент, учитывающий повышение погрешности ТТ в переходном режиме;  $\varepsilon = 0,1$  — относительное значение полной погрешности ТТ в установившемся режиме (для ТТ класса 10Р принимается значение 0,1, для 5Р — 0,05);  $\Delta f_{выр} = 0,04$  — погрешность выравнивания в относительных единицах;  $K_{сн.т}$  — коэффициент снижения тормозного тока, определяемый для принятого способа формирования тормозного тока по выражению:

$$K_{сн.т} = 1 - 0,5(K_{пер}\varepsilon + \Delta f_{выр}). \quad (3.10)$$

Значение коэффициента  $K_{пер}$ , учитывающего увеличение погрешности ТТ в переходном режиме, согласно [16] следует принимать равным  $3,5 \div 4$ , причем большее значение соответствует коротким линиям, отходящим от мощных источников (где интенсивнее переходный процесс в первичной цепи).

3.6.2.6. Коэффициент торможения на третьем участке  $K_{Т2}$  и  $K_{Т2груб}$ .

Значение  $K_{Т2}$  рекомендуется принять в 1,5 раза больше, чем  $K_{Т1}$ :

$$K_{Т2} = 1,5K_{Т1}. \quad (3.11)$$

Полученное значение следует проверить на вхождение в диапазон уставки: (20—180) %.

Значение уставки  $K_{Т2груб}$  следует принять равным 200 %.

3.6.2.7. Когда определены ток  $I_{д1}/I_б$  и наклон тормозной характеристики  $K_{Т1}$ , точка перехода с первого на второй участок характери-

стики однозначно находится из геометрических соотношений с учетом прохождения прямой второго участка через начало координат:

$$I_{T1}/I_6 = I_{d1}/I_6 / (K_{T1}/100). \quad (3.12)$$

3.6.2.8. Если при выборе начального тока срабатывания  $I_{d1}/I_6$  из соображений повышения чувствительности не было учтено условие (3.7), то следует ввести блокировку ступени по второй гармонике дифференциального тока. Рекомендуемое значение уставки  $I_{T2}/I_{T1}$  — 15 %.

3.6.2.9. Чувствительность ДЗЛ-2 определяется как отношение минимального тока КЗ в зоне к выбранному значению  $I_{d1}/I_6$ :

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{КЗ мин}}}{(I_{d1}/I_6)I_6}. \quad (3.13)$$

Нормативное значение коэффициента чувствительности  $K_{\text{ч}} \geq 1,5$ .

### 3.6.3. Выбор параметров третьей ступени дифференциальной защиты (ДЗЛ-3)

3.6.3.1. Назначение ДЗЛ-3 — резервирование защит трансформаторов ответвлений. Соответственно она вводится в действие только в случае наличия на линии ответвлений и должна согласовываться с защитами, установленными на стороне ВН этих трансформаторов.

Выбору подлежат следующие параметры:

Выдержка времени на срабатывание.....  $T$ , с  
 Минимальный дифференциальный ток .....  $I_{d1}/I_6$   
 Конец первого участка характеристики по оси  
 тормозного тока.....  $I_{T1}/I_6$   
 Коэффициент торможения второго участка  
 характеристики.....  $K_{T1}$ , %

3.6.3.2. Минимальный ток срабатывания ступени определяется по формуле

$$I_{d1}/I_6 \geq K_{\text{отс}} (I_{\text{с.з.тр}} + I'_{\text{нагр}})/I_6, \quad (3.14)$$

где  $K_{\text{отс}}$  — коэффициент отстройки, принимается равным 1,1;  $I_{\text{с.з.тр}}$  — ток срабатывания МТЗ трансформатора данного ответвления;  $I'_{\text{нагр}}$  — суммарный ток нагрузки всех других ответвлений в условиях КЗ на



шинах НН трансформатора ответвления, с защитой которого производится согласование.

3.6.3.3. Коэффициент торможения  $K_{Т1}$  определяется по выражению (3.9).

3.6.3.4. Точка перехода с первого участка на второй  $I_{Т1}/I_{Б}$  определяется по выражению (3.12).

3.6.3.5. Чувствительность защиты проверяется при КЗ на шинах НН трансформаторов всех ответвлений:

$$K_{ч} = \frac{I_{КЗ}}{(I_{д1}/I_{Б})I_{Б}}. \quad (3.15)$$

Требуемый коэффициент чувствительности — 1,2.

3.6.3.6. Выдержка времени на срабатывание.

По времени ДЗЛ-3 согласуется с резервными защитами стороны ВН трансформаторов (МТЗ) всех ответвлений:

$$T \geq t_{с.з.тр} + \Delta t, \quad (3.16)$$

где  $t_{с.з.тр}$  — максимальное время срабатывания защит стороны ВН трансформаторов всех ответвлений;  $\Delta t$  — запас по времени, принимается равным 0,5 с.

#### *3.6.4. Ток срабатывания дифференциальной отсечки (ДЗЛ-1)*

Назначение отсечки — ускоренное отключение наиболее тяжелых КЗ. Несмотря на то что отсечка реагирует на мгновенные значения дифференциального тока, ее уставка устанавливается в действующих значениях. Расчетное условие — несрабатывание от токов небаланса при внешнем КЗ. Как принято в последнее время, при проектировании дифференциальных защит трансформаторов учитываются повышенные значения токов небаланса переходного режима, когда ток небаланса достигает значения 0,7 от тока внешнего КЗ. В таком случае уставка отсечки принимается равной:

$$I_{диф}/I_{Б} = 1,2 \cdot 0,7 \cdot I_{КЗ \text{ вн. макс}}/I_{Б} = 0,84 I_{КЗ \text{ вн. макс}}/I_{Б}, \quad (3.17)$$

где  $I_{КЗ \text{ вн. макс}}$  — максимальный сквозной ток, проходящий по линии при внешнем КЗ.

Как и в дифференциальных защитах трансформаторов, чувствительность отсечки не рассчитывается, поскольку она является допол-

нительной ступенью, предназначенной только для ускорения основной (второй) ступени.

### Контрольные вопросы к главе 3

1. Назовите область применения устройства «Сириус-2-ДЗЛ-01».
2. Для чего предназначена третья ступень ДЗЛ (ДЗЛ-3) в устройстве «Сириус-2-ДЗЛ-01»?
3. С какой целью в ступени ДЗЛ-2 применяется дополнительный дифференциально-фазный орган?
4. Каким образом выбирается коэффициент торможения на втором участке тормозной характеристики в соответствии с методикой, приведенной в данной главе?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Нормы** технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35—750 кВ: Стандарт ФСК ЭЭС СТО 56947007-29.240.10.028—2009. М., 2009.

2. **Общие** требования к системам противоаварийной и режимной автоматики, релейной защиты и автоматики, телеметрической информации, технологической связи в ЭЭС России. Приложение к приказу ОАО РАО «ЭЭС России» № 57 от 11.02.2008.

3. **Официальный сайт** ЗАО «РАДИУС Автоматика» [сайт]. URL: <http://www.rza.ru> (дата обращения: 15.12.2011).

4. **Атабеков Г.И.** Теоретические основы релейной защиты высоковольтных сетей. М.—Л.: Госэнергоиздат, 1957.

5. **Федосеев А.М.** Релейная защита электрических систем: учебник для вузов. М.: Энергия, 1976. 560 с.

6. **Руководящие** указания по наладке, проверке и эксплуатации продольной дифференциальной защиты линии типа ДЗЛ-1. М.: Госэнергоиздат, 1962.

7. **Циглер Г.** Цифровые устройства дифференциальной защиты. Принципы и область применения / под. ред. А.Ф. Дьякова. М.: Энергоиздат, 2005.

8. **Левиуш А.И., Дони Н.А., Надель Л.А., Наумов А.М.** Высоко-частотная направленная и дифференциально-фазная защита ПДЭ 2003 для ВЛ 500—750 кВ (релейная часть). М.: Научно-учебный центр ЭНАС, 1996.

9. **Галкин В.А., Григорьев Ю.А.** Телекоммуникации и сети: учеб. пособие для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003.

10. **Телекоммуникационные** системы и сети: учебное пособие. В 3 томах. Том 1 — Современные технологии / Б.И. Крук, В.Н. Попантопуло, В.П. Шувалов; под ред. В.П. Шувалова. — 3-е изд., испр. и доп. М.: Горячая линия — Телеком, 2003.

11. **Шмалько А.В.** Цифровые сети связи: основы планирования и построения. М.: Экотренз, 2001.

12. **Гук М.** Аппаратные средства локальных сетей. Энциклопедия. СПб.: Издательство «Питер», 2000.

13. **Микропроцессорное** устройство защиты «Сириус-2-ДЗЛ-01». Руководство по эксплуатации. — М.: ЗАО «РАДИУС Автоматика», 2010.



14. **ГОСТ 27.002—89.** Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.

15. **Руководящие** указания по релейной защите. Вып. 9. Дифференциально-фазная высокочастотная защита линий 110—330 кВ. М.: Энергия, 1972. 112 с.

16. **Дмитренко А.М.** Об использовании предельной кратности трансформаторов тока при проектировании и анализе поведения дифференциальных защит трансформаторов // *Электрические станции.* 2003. № 2. С. 20—25.

17. **Электротехническая** энциклопедия. В 4 т. / под ред. А.Ф. Дьякова (гл. ред.). — М.: Издательство МЭИ, 2005—2010.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### ПРИЛОЖЕНИЕ 1

#### Сводная таблица уставок дифференциальной защиты линии устройства «Сирнус-2-ДЗЛ-01»

Группа уставок	Наименование уставки	Диапазон значений	Комментарий
Общие	$I_{\text{ном}}, А$	50—5000	Первичный номинальный ток ТТ
ДЗЛ-1	Функция	<u>ОТКЛ/</u> ВКЛ	Дифференциальный ток срабатывания данной ступени
	$I_{\text{диф}}/I_{\text{б}}$	3,0—40,0	
ДЗЛ-2	ДЗЛ-2 осн.	<u>ОТКЛ/</u> ВКЛ	Ввод в действие основной подступени ДЗЛ-2
	$T_{\text{осн}}, с$	0,00— 5,00	Выдержка времени на срабатывание основной подступени ДЗЛ-2
	$I_{\text{д1}}/I_{\text{б}}$	0,3—2,0	Задаёт координату по оси « $I_{\text{диф}}$ » первой точки перегиба характеристики срабатывания ступени
	$I_{\text{т1}}/I_{\text{б}}$	0,3—1,5	Задаёт координату по оси « $I_{\text{торм}}$ » первой точки перегиба характеристики срабатывания данной ступени
	$I_{\text{т2}}/I_{\text{б}}$	2,0—4,0	Задаёт координату по оси « $I_{\text{торм}}$ » второй точки перегиба характеристики срабатывания данной ступени
	$K_{\text{т1}}, \%$	20—100	Коэффициент торможения второго участка характеристики срабатывания
	$K_{\text{т2}}, \%$	20—180	Коэффициент торможения третьего участка характеристики срабатывания
	$K_{\text{т2}} \text{груб}, \%$	20—250	Коэффициент торможения третьего участка характеристики с загрузлением при внешнем КЗ
	Блокир. при БНТ	<u>ОТКЛ/</u> ВКЛ	Вводит в действие блокировку основной подступени при выявлении БНТ
	Внешний пуск	<u>ОТКЛ/</u> ВКЛ	Контроль внешнего дискретного сигнала «Пуск ДЗЛ-2» при пуске основной подступени ДЗЛ-2
	ДЗЛ-2 доп.	<u>ОТКЛ/</u> ВКЛ	Ввод в действие дополнительной подступени ДЗЛ-2
	$T_{\text{доп}}, с$	0,00— 5,00	Выдержка времени на срабатывание дополнительной подступени ДЗЛ-2
	$I_{\text{доп}}/I_{\text{б}}$	1,0—10,0	Дифференциальный ток срабатывания дополнительного ИО для дополнительной подступени ДЗЛ-2

Группа уставок	Наименование уставки	Диапазон значений	Комментарий
ДЗЛ-3	Функция	ОТКЛ/ ВКЛ	
	$T, c$	0,10— 20,00	Выдержка времени на срабатывание ступени
	$I_{д1}/I_{б}$	0,3—2,0	Задаёт координату по оси « $I_{диф}$ » точки перегиба характеристики срабатывания данной ступени
	$I_{т1}/I_{б}$	0,3—1,5	Задаёт координату по оси « $I_{торм}$ » точки перегиба характеристики срабатывания данной ступени
	$K_{т1}, \%$	20—100	Коэффициент торможения второго участка характеристики срабатывания
ДЗЛ общие	Блокир. при БНТ	ОТКЛ/ ВКЛ	Вводит в действие блокировку ступени при выявлении БНТ
	$K_{выр.ТТ}$	0,10— 1,50	Коэффициент выравнивания, учитывающий различие коэффициентов трансформации ТТ
	$I_{г2}/I_{г1}$	0,10— 0,40	Отношение действующего значения второй гармоники к действующему значению первой гармоники дифференциального тока, при котором срабатывает блокировка от БНТ



Примеры расчета уставок дифференциальной защиты линии

П2.1. Пример расчета дифференциальной защиты ВЛ с ответвлением

П2.1.1. Исходные данные

Защита устанавливается на двух концах ВЛ 110 кВ с ответвлением. На ответвлении генерирующих источников нет. Схема линии указана на рис. Б.1.

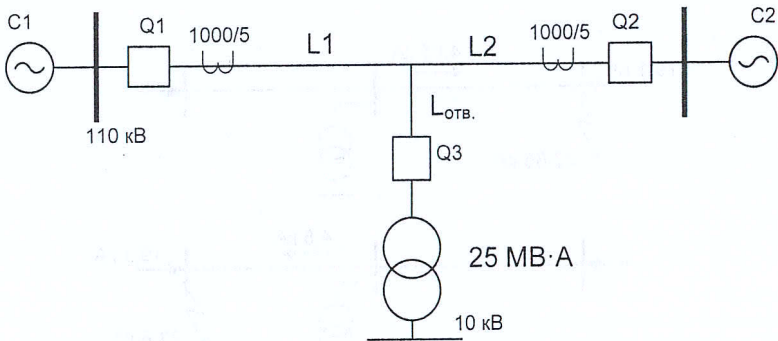


Рис. П2.1. Схема ВЛ 110 кВ с ответвлением

Параметры элементов (первичные значения):

*Система С1:*

$$R1 = 1,051 \text{ Ом} \quad X1 = 3,49 \text{ Ом} \\ R0 = 0,9 \text{ Ом} \quad X0 = 5,134 \text{ Ом}$$

*Система С2:*

$$R1 = 1,246 \text{ Ом} \quad X1 = 3,574 \text{ Ом} \\ R0 = 0,684 \text{ Ом} \quad X0 = 4,556 \text{ Ом}$$

*Линии:*

$$L1 = 14,7 \text{ км} \quad L2 = 12,5 \text{ км} \\ R1_{\text{уд}} = 0,21 \text{ Ом/км} \quad X1_{\text{уд}} = 0,414 \text{ Ом/км} \\ R0_{\text{уд}} = 0,378 \text{ Ом/км} \quad X0_{\text{уд}} = 1,163 \text{ Ом/км}$$

Максимальный нагрузочный ток линии — 580 А.

Максимальный нагрузочный ток ответвления — 132 А.

Трансформатор на ответвлении ТДН-25000/110/10:

$$U_{\text{ном ВН}} = 115 \text{ кВ}; I_{\text{ном}} = 126 \text{ А}; uk = 10,5.$$

Для упрощения расчета принимаем, что устройство регулирования напряжения под нагрузкой (РПН) на трансформаторе не используется.

Сопrotивление трансформатора:

$$X_T = 10,5 \cdot 115 \cdot 115 / (100 \cdot 25000) = 53 \text{ Ом}.$$

Токи трехфазных КЗ в узловых точках линии показаны на рис. П2.2. Токи однофазных КЗ показаны на рис. П2.3.

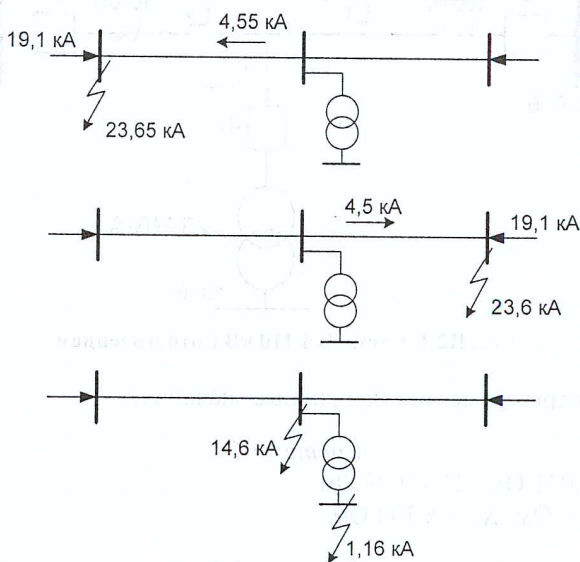


Рис. П2.2. Токи трехфазных КЗ

На основе токов, указанных на рис. П2.2 и П2.3 имеем:

— ток КЗ на шинах НН:  $I_{\text{КЗ отв}} = 1160 \text{ А}$ ;

— максимальный ток сквозного КЗ:  $I_{\text{КЗ вн. макс}} = 4550 \text{ А}$ .

Величина  $uk$  трансформатора при трехфазном включении согласно [15]:

$$12,7 + uk = 23,2.$$

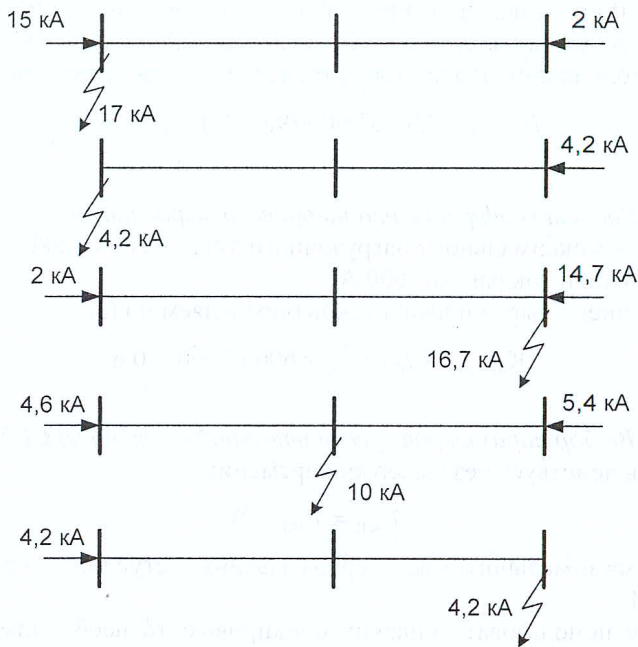


Рис. П2.3. Токи однофазных КЗ ( $3I_0$ )

Сопротивление трансформатора при трехфазном включении:

$$X_T^{(3)} = 23,2 \cdot 115 \cdot 115 / (100 \cdot 25\,000) = 117 \text{ Ом.}$$

Бросок тока намагничивания трансформатора при трехфазном включении со стороны системы С1 находим по выражению (П-70) [15]:

$$I_{\text{броска}} = 0,84 \cdot 67\,000 / (9,6 + 117) = 410 \text{ А.}$$

Величина  $uk$  трансформатора при однофазном включении согласно [15]:

$$(12,7 + uk) / 1,35 = 23,2 / 1,35 = 17,3.$$

Сопротивление трансформатора при однофазном включении:

$$X_T^{(1)} = 17,3 \cdot 115 \cdot 115 / (100 \cdot 25\,000) = 87 \text{ Ом.}$$



Бросок тока намагничивания трансформатора при однофазном включении со стороны системы С1 находим по выражению (П-70) [15] в предположении, что нейтраль трансформатора заземлена:

$$I_{\text{броска}} = 0,84 \cdot 67\,000 / (9,6 + 87) = 590 \text{ А.}$$

### П2.1.2. Расчет коэффициента цифрового выравнивания

С учетом максимального нагрузочного тока, равного 580 А, принимаем базисный ток равным 600 А.

Коэффициент выравнивания токов определяем по (3.3):

$$K_{\text{выр.ТТ}} = I_{\text{б}} / I_{\text{ном}} = 600 / 1000 = 0,6.$$

### П2.1.3. Выбор параметров чувствительной ступени (ДЗЛ-2)

Ступень действует без выдержки времени:

$$T_{\text{осн}} = T_{\text{доп}} = 0.$$

Выбор минимального тока срабатывания ступени приведен в табл. П2.1.

Если не использовать никаких блокировок, то необходимо принять значение уставки  $I_{\text{д1}}/I_{\text{б}} = 2,9$ . Это значение выходит за диапазон возможных значений уставки (до 2,0), поэтому необходимо использовать внешний пуск ДЗЛ-2. Для этого задаем конфигурацию в соответствии с табл. 3.1.

Таблица П2.1. Выбор минимального тока срабатывания ступни ДЗЛ-2

Расчетное условие	Расчетное выражение	Первичные значения тока приведенные к $I_{\text{б}}$
(3.4) — отстройка от небалансов	$I_{\text{д1}}/I_{\text{б}} = 0,4$	0,4
(3.5) — отстройка от КЗ на шинах НН	$I_{\text{д1}}/I_{\text{б}} = K_{\text{отс}} \cdot I_{\text{КЗ отв}}/I_{\text{б}}$	$1,5 \cdot 1160/600 = 2,9$
(3.6) — отстройка от суммарного тока нагрузки ответвлений	$I_{\text{д1}}/I_{\text{б}} = K_{\text{отс}} \cdot I_{\text{сумм нагр отв}}/I_{\text{б}}$	$1,5 \cdot 132/600 = 0,33$
(3.7) — отстройка от броска тока намагничивания трансформатора	$I_{\text{д1}}/I_{\text{б}} = K_{\text{отс}} \cdot I_{\text{броска}}/I_{\text{б}}$	$1,5 \cdot 590/600 = 1,48 \text{ А}$

$I_{д1}/I_6$  по условиям (3.4) и (3.6) принимаем равным 0,4.

$I_{доп}/I_6$  по условиям (3.4)—(3.7) принимаем равным 2,9.

Полученные значения уставок сведены в табл. П2.2.

Выбор точки перехода со второго участка характеристики на третий осуществляется по выражению (3.8):

$$I_{т2}/I_6 = 4I_{ном}/I_6 = 4 \cdot 1000/600 = 6,6.$$

Принимаем максимально возможное из диапазона значение:

$$I_{т2}/I_6 = 4,0.$$

Коэффициент снижения тормозного тока определяется по выражению (3.10):

$$K_{сн.т} = 1 - 0,5(K_{пер} \cdot \varepsilon + \Delta f_{выр}) = 1 - 0,5 \cdot (3,5 \cdot 0,1 + 0,04) = 0,805.$$

Коэффициент торможения на втором участке определяется по выражению (3.9):

$$K_{т1} = \frac{K_{отс}(K_{пер} \cdot \varepsilon + \Delta f_{выр}) \cdot 100}{K_{сн.т.}} = \frac{1,2 \cdot (3,5 \cdot 0,1 + 0,04) \cdot 100}{0,805} = 58\%.$$

Значение коэффициента торможения  $K_{т2}$  на третьем участке выбирается по выражению (3.11):

$$K_{т2} = 1,5K_{т1} = 1,5 \cdot 58 = 87\%.$$

Значение уставки  $K_{т2}$  груб. в соответствии с рекомендациями следует принять равным 200 %.

Точка перехода с первого участка на второй определяется по выражению (3.12):

$$I_{т1}/I_6 = I_{д1}/I_6 / (K_{т1}/100) = 0,4 / 0,58 = 0,69.$$

Уставку блокировки по второй гармонике в соответствии с рекомендациями принимаем:  $I_{т2}/I_{г1} = 0,15$ .

Сводные значения уставок приведены в табл. П2.2.

Таблица П2.2. Рекомендуемые значения уставок

Наименование уставки	Значение
ДЗЛ-2 осн.	Вкл
Тосн., с	0,00
$I_{д1}/I_б$	0,4
$I_{т1}/I_б$	0,69
$I_{т2}/I_б$	4,0
$K_{т1}$ , %	58
$K_{т2}$ , %	87
$K_{т2}$ груб., %	200
Блокир. при БНТ	Вкл
Внешний пуск	Вкл
ДЗЛ-2 доп.	Вкл
$T_{доп}$ , с	0,00
$I_{доп}/I_б$	2,9

#### П2.1.4. Проверка чувствительности второй ступени (ДЗЛ-2)

Выполняется по выражению (3.13).

Чувствительность основной ступени ДЗЛ-2 с внешним пуском в режиме однофазного замыкания на шинах системы С2 при одностороннем питании:

$$K_{ч} = \frac{I_{КЗ \text{ мин}}}{(I_{д1} / I_б) \cdot I_б} = \frac{4200}{0,4 \cdot 600} = 17,5.$$

Чувствительность дополнительного измерительного органа в том же режиме:

$$K_{ч} = \frac{I_{КЗ \text{ мин}}}{(I_{д1} / I_б) \cdot I_б} = \frac{4200}{2,9 \cdot 600} = 2,4.$$

Как показал расчет, чувствительность основной ступени ДЗЛ-2 выполняется с большим запасом. А дополнительная резервирующая ступень ДЗЛ-2доп также обеспечит чувствительность при КЗ без большого переходного сопротивления.

#### П2.1.5. Выбор параметров третьей ступени (ДЗЛ-3)

Предположим, что на трансформаторе ответвления на стороне 110 кВ имеется резервная защита — МТЗ с уставками 180 А и 2 с.



Минимальный ток срабатывания ступени определяется по выражению (3.14):

$$I_{д1}/I_{б} = K_{отс} (I_{сз тр} + I'_{нагр})/I_{б} = 1,1 \cdot 180/600 = 0,33.$$

Коэффициент торможения приравниваем таковому у второй ступени:

$$K_{т1} = 58 \%$$

Точка перехода с первого участка на второй определяется по выражению (3.12):

$$I_{т1}/I_{б} = I_{д1}/I_{б} / (K_{т1}/100) = 0,33 / 0,58 = 0,57.$$

Проверка чувствительности ступени ДЗЛ-3 при однофазном КЗ на шинах НН трансформатора ответвления:

$$K_{ч} = \frac{I_{КЗ мин}}{(I_{д1} / I_{б}) I_{б}} = \frac{0,87 \cdot 1160}{0,33 \cdot 600} = 5,1.$$

Чувствительность обеспечивается с запасом.

Уставка по времени выбирается по выражению (3.16):

$$T = t_{с.з тр.} + \Delta t = 2,0 + 0,5 = 2,5 \text{ с.}$$

Блокировку ступени при БНТ можно отключить, так как ступень имеет большую выдержку по времени на срабатывание.

### *П2.1.6. Выбор параметров дифференциальной отсечки (ДЗЛ-1)*

Ток срабатывания дифференциальной отсечки определяется по выражению (3.17):

$$I_{диф}/I_{б} = 0,84 I_{КЗ вн. макс}/I_{б} = 0,84 \cdot 4550/600 = 6,4.$$

## **П2.2. Пример расчета дифференциальной защиты кабельной линии**

### *П2.2.1. Исходные данные*

Защита устанавливается на кабельной линии 10 кВ без ответвлений длиной 2 км по схеме, изображенной на рис. П2.4.

Нагрузкой РТП1 является крупный синхронный электродвигатель М1 STD 6300-2УХЛ4 ( $\eta = 0,975$ ). Двигатель М1 вводится в работу устройством плавного пуска. Пусковой ток электродвигателя М1 составляет 1,1 кА. Расчет параметров срабатывания ДЗЛ выполняется из

условия аварийного режима — при питании шин РТП1 по одной линии. Ток трехфазного КЗ на шинах РТП1 задан и составляет 16 кА.

Номинальный ток электродвигателя М1:

$$I_{\text{ном. дв}} = \frac{P_{\text{ном. дв}}}{\sqrt{3}U_{\text{ном. дв}}\eta} = \frac{6300}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 0,975} = 356 \text{ А} \approx 360 \text{ А}.$$

Номинальный ток остальных потребителей, подключенных к шинам РТП1, составляет  $I_{\text{пот}} = 60 \text{ А}$ .

Суммарный номинальный ток потребителей, потребляемый от шин РТП1, составляет:

$$I_{\text{сумм}} = I_{\text{ном. дв}} + I_{\text{пот}} = 60 + 360 = 420 \text{ А}.$$

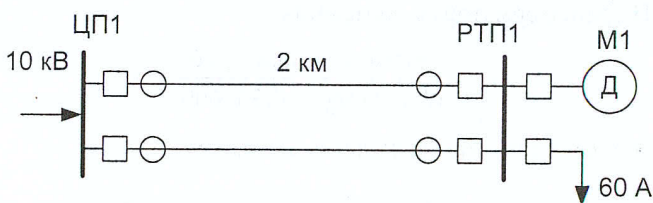


Рис. П2.4. Поясняющая схема линий 10 кВ

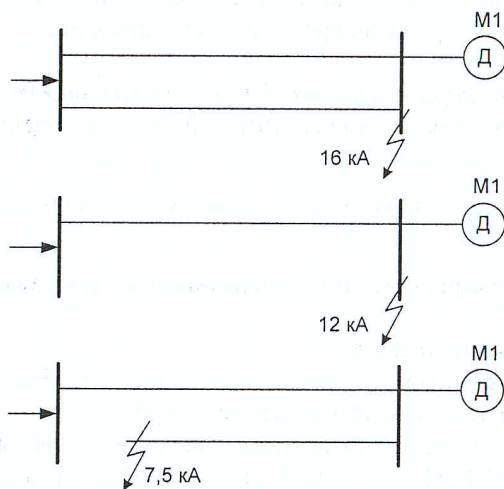


Рис. П2.5. Токи трехфазного КЗ

Результаты расчета токов КЗ для некоторых режимов приведены на рис. П2.5.

Согласно рис. П2.5:

$$I_{\text{КЗ}} \text{ внеш. макс} = 12 \text{ кА}; I_{\text{раб. макс}} = 420 \text{ А.}$$

### П2.2.2. Расчет коэффициента цифрового выравнивания

Принимаем за базисный ток номинальный первичный ток ТТ:  $I_B = 600 \text{ А}$ .

Коэффициент выравнивания токов определяем по (3.3):

$$K_{\text{выр.тт}} = I_B / I_{\text{ном}} = 600 / 600 = 1.$$

### П2.2.3. Выбор параметров чувствительной ступени (ДЗЛ-2)

Ступень действует без выдержки времени:

$$T_{\text{осн}} = T_{\text{доп}} = 0.$$

Так как на линии отсутствуют ответвления, то минимальный ток срабатывания определяется по выражению (3.4):  $I_{\text{д1}}/I_B = 0,4$ .

Выбор точки перехода со второго участка характеристики на третий осуществляется по выражению (3.8):

$$I_{\text{т2}}/I_B = 4I_{\text{ном}}/I_B = 4 \cdot 600/600 = 4,0.$$

Коэффициент снижения тормозного тока определяется по выражению (3.10):

$$K_{\text{сн.т}} = 1 - 0,5(K_{\text{пер}}\varepsilon + \Delta f_{\text{выр}}) = 1 - 0,5(4,0 \cdot 0,1 + 0,04) = 0,78.$$

Коэффициент торможения на втором участке определяется по выражению (3.9):

$$K_{\text{т1}} = \frac{K_{\text{отс}}(K_{\text{пер}}\varepsilon + \Delta f_{\text{выр}})100}{K_{\text{сн.т}}} = \frac{1,2 \cdot (4,0 \cdot 0,1 + 0,04) \cdot 100}{0,78} = 68 \%.$$

Значение коэффициента торможения  $K_{\text{т2}}$  на третьем участке выбирается по выражению (3.11):

$$K_{\text{т2}} = 1,5 \cdot K_{\text{т1}} = 1,5 \cdot 68 = 102 \%.$$

Значение уставки  $K_{\text{т2}}$  груб. в соответствии с рекомендациями следует принять равным 200 %.



Точка перехода с первого участка на второй определяется по выражению (3.12):

$$I_{T1}/I_6 = I_{д1}/I_6 / (K_{T1}/100) = 0,4 / 0,68 = 0,59.$$

Сводные значения уставок приведены в табл. П2.3.

Таблица П2.3. Рекомендуемые значения уставок

Наименование уставки	Значение
ДЗЛ-2 осн.	Вкл
$T_{осн}, c$	0,00
$I_{д1}/I_6$	0,4
$I_{T1}/I_6$	0,59
$I_{T2}/I_6$	4,0
$K_{T1}, \%$	68
$K_{T2}, \%$	102
$K_{T2} \text{груб.}, \%$	200
Блокир. при БНТ	Откл
Внешний пуск	Откл
ДЗЛ-2 доп.	Откл
$T_{доп}, c$	0,00
$I_{доп}/I_6$	2,0 (любое значение, так как ступень выведена из действия уставки)

#### П2.2.4. Проверка чувствительности второй ступени (ДЗЛ-2)

Чувствительность ступени в режиме каскадного отключения двухфазного КЗ определяем по выражению (3.13):

$$K_{ч} = \frac{I_{КЗ \text{ мин}}}{(I_{д1}/I_6) \cdot I_6} = \frac{0,87 \cdot 7500}{(0,4) \cdot 600} = 27.$$

Чувствительность ступени ДЗЛ-2 выполняется с большим запасом.

#### П2.2.5. Выбор параметров третьей ступени (ДЗЛ-3)

Ввиду отсутствия на линии ответвлений третью ступень можно вывести из действия.

#### П2.2.6. Выбор параметров дифференциальной отсечки (ДЗЛ-1)

Ток срабатывания дифференциальной отсечки определяется по выражению (3.17):

$$I_{диф}/I_6 = 0,84 I_{КЗ \text{ вн. макс}}/I_6 = 0,84 \cdot 12\,000/600 = 16,8.$$

### Интерфейс связи по стандарту IEEE C37.94

Данный стандарт определяет интерфейс для подключения устройств защиты к цифровым мультиплексорам с использованием канала  $N \times 64$  кбит/с, основанного на оптоволоконном канале. Значение  $N$ , в соответствии со стандартом, может быть равно 1, 2, ..., 12.

Стандарт определяет как физические параметры оптического канала, так и программный протокол.

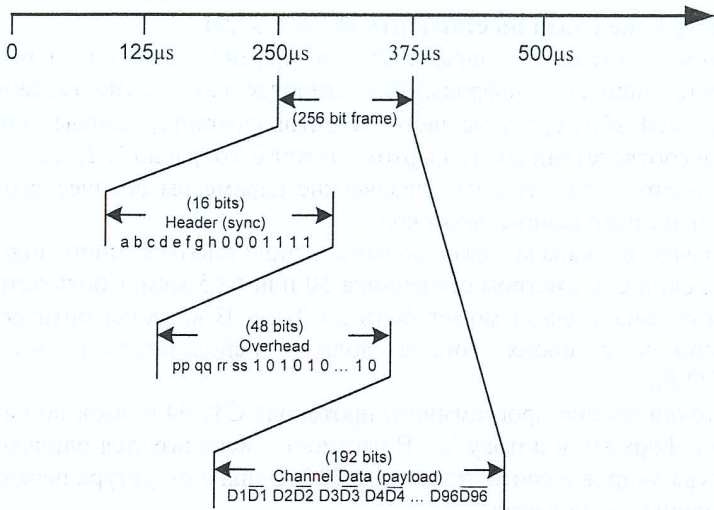
В качестве канала связи должно использоваться многомодовое оптоволокно с диаметром сердечника 50 или 62,5 мкм. Соответственно длина канала связи может быть до 2 км. В качестве оптических коннекторов с обоих концов должен использоваться тип ST (ВФОС/2.5).

С точки зрения программного протокола C37.94 близок по назначению и формату к потоку E1. В частности, используется одинаковая структура кадров в соответствии с G.704. Однако структура передаваемых данных отличается.

На рис. ПЗ.1 показана структура кадров (frame; так называемых, «тайм-слотов»). В зависимости от применяемой скорости  $N \times 64$  кбит/с используется от 1 до 12 кадров («тайм-слотов»). Структура передаваемых данных адаптирована к особенностям передачи данных по оптическому каналу и содержит самосинхронизируемый код. В частности, биты данных чередуются с их инверсными значениями ( $D1$  и  $\overline{D1}$ ). Как следствие, из 256 бит, передаваемых в одном кадре, пользовательские данные составляют  $192 / 2 = 96$  бит.

Использование интерфейса C37.94 по сравнению, например, с G.703.1 имеет существенные преимущества. В первую очередь, это связано с использованием оптического канала, который обеспечивает отсутствие влияния электромагнитных помех. Также обеспечивается существенная длина возможного канала связи, что позволяет располагать устройства защиты и мультиплексоры на значительном расстоянии друг от друга.

Типовым случаем применения интерфейса C37.94 является соединение устройства ДЗЛ с мультиплексором, находящихся на одной подстанции или станции.



**Рис. ПЗ.1. Структура кадров по стандарту IEEE C37.94**



*Учебное издание*

**АНТОНОВ** Дмитрий Борисович

**ЦИФРОВЫЕ ПРОДОЛЬНЫЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ЗАЩИТЫ  
ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ. ПРИНЦИП РАБОТЫ И ВЫБОР  
ПАРАМЕТРОВ СРАБАТЫВАНИЯ**

Учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Электроэнергетика и электротехника»

Редактор Г.Ф. Раджабова

---

Темплан издательства МЭИ, 2011, учеб.

Подписано в печать 02.10.12

Печать офсетная                      Формат 60×84/16

Физ. печ. л. 5,25

Тираж 100 экз. (доп. тираж)    Изд. № 31

Заказ 122

---

Издательство МЭИ, 111250, г. Москва, Красноказарменная ул., д. 14, стр. 1

Отпечатано в типографии ПЦ МЭИ, 111116, г. Москва, Красноказарменная ул., д. 13, стр. 4