

Функция продольной дифференциальной защиты линии

Рекомендации по выбору уставок

ЭКРА.650323.110 Д7
(Редакция от 24.11.2025)

Авторские права на данную документацию принадлежат НПП «ЭКРА» (г. Чебоксары).
Снятие копий или перепечатка разрешается только по согласованию с разработчиком.

Содержание

Содержание	3
1 Область применения.....	4
2 Термины и определения	4
3 Сокращения	6
4 Общие положения	7
5 Схемы подключения устройств релейной защиты к вторичным цепям ТТ, ТН, каналам связи.....	7
6 Продольная дифференциальная защита линии	8
6.1 Описание функции «Продольная дифференциальная защита линии»	8
6.1.1 Принцип действия дифференциальной защиты.....	8
6.1.2 Работа на ВЛ с ответвлениями.....	11
6.1.3 Режимы работы ДЗЛ.....	13
6.1.4 Характеристики срабатывания ДЗЛ.....	19
6.2 Расчет и выбор параметров настройки (уставок) и алгоритмов функционирования функции «Продольная дифференциальная защита линии»	25
6.2.1 Выбор базисного тока ДЗЛ	25
6.2.2 Выбор базисных (базовых) величин для устройств III архитектуры построения цифровой подстанции	27
6.2.3 Выбор начального тока срабатывания дифференциальной защиты	28
6.2.4 Выбор уставок дифференциальной токовой отсечки	31
6.2.5 Определение параметров характеристики срабатывания ДЗЛ	33
6.2.6 Особенности расчета дифференциальной защиты трехконцевой линии	41
6.2.7 Расчет сопротивления нагрузки ТТ	43
6.2.8 Выбор уставок органа контроля цепей тока	46
6.2.9 Выбор уставок по времени	46
6.2.10 Совместная работа полукомплектов ДЗЛ различных серий	47
6.3 Пример расчета уставок ДЗЛ на ЛЭП 220 кВ с двусторонним питанием.....	48
Приложение А (рекомендуемое). Схема электрическая принципиальная.....	58
Приложение Б (рекомендуемое). Удельные параметры ВЛ	59
Приложение В (рекомендуемое). Сопротивления трансформаторов	60
Список литературы.....	61

1 Область применения

Настоящие рекомендации освещают вопросы выбора уставок функции продольной дифференциальной защиты линии, входящей в состав функций устройств релейной защиты, реализованных в микропроцессорных терминалах БЭ 2704, БЭ 2502, которые могут использоваться в шкафах устройств релейной защиты серий ШЭ2607, ШЭ2710 и ШЭТ производства ООО «НПП «ЭКРА».

2 Термины и определения

Релейная защита (РЗ) – совокупность устройств, предназначенных для автоматического выявления коротких замыканий и других ненормальных режимов работы линии электропередачи и оборудования, которые могут привести к их повреждению и/или нарушению устойчивости энергосистемы, и действующих на отключение коммутационных аппаратов в целях отключения этих линий электропередачи и оборудования от энергосистемы и/или на формирование предупредительных сигналов.

Устройство релейной защиты (УРЗ) – техническое устройство (аппарат, терминал, шкаф, панель) и его цепи, реализующее заданные функции релейной защиты и обслуживаемое (оперативно и технически) как единое целое.

Комплекс РЗА – совокупность взаимодействующих между собой устройств РЗА, предназначенных для выполнения взаимосвязанных функций защиты и автоматики оборудования или ЛЭП.

Система РЗА – совокупность комплексов РЗА присоединений электроэнергетической сети.

Параметры настройки устройства релейной защиты – изменяемые величины в устройстве релейной защиты, определяющие состав и логику работы отдельных функций (блокировок), или допустимый диапазон и шаг изменения величин, обеспечивающие функционирование УРЗ в соответствии с заданным алгоритмом.

Уставка – значение параметра настройки устройства релейной защиты, определяющее условия его функционирования.

Органы (пусковые, блокирующие, отключающие) релейной защиты и автоматики – структурно-функциональные элементы релейной защиты и автоматики. Органы релейной защиты и автоматики бывают реализованы аппаратно, программно или программно-аппаратно.

Селективность – свойство защиты (функции, устройства, комплекса РЗА, системы РЗА) выделять и отключать только поврежденное присоединение электроэнергетической системы.

Чувствительность – свойство устройства релейной защиты отличать ненормальный режим от нормального. Характеризуется отношением минимального значения входной воздействующей электрической величины при повреждении присоединения или его

ненормальном режиме к уставке для устройств релейной защиты, реагирующих на возрастающие в условиях повреждения или ненормального режима величины. Для устройств релейной защиты, реагирующих на уменьшающиеся в условиях повреждения или ненормального режима величины – отношением уставки к максимальному значению входной воздействующей электрической величины при повреждении присоединения или его ненормальном режиме.

Трансформатор тока – измерительный трансформатор, в котором при нормальных условиях применения вторичный ток практически пропорционален первичному току и сдвинут относительно него по фазе на угол, близкий к нулю.

Класс точности – обобщенная характеристика трансформатора тока, определяемая установленными пределами допускаемых погрешностей при заданных условиях работы.

Вольтамперная характеристика (ВАХ) – выраженная графически или табличным способом зависимость между действующими значениями тока и напряжения на вторичной обмотке при приложении к последней синусоидального напряжения, при разомкнутой первичной обмотке.

Дифференциальная защита линии (ДЗЛ) – основная защита линии с абсолютной селективностью, состоящая из двух и более связанных каналов связи и устанавливаемых по концам линии электропередачи устройств (полукомплектов), предназначенная для отключения линии электропередачи при коротких замыканиях и принцип действия которой основан на непрерывном пофазном сравнении величин и фазовых углов токов между полукомплектами.

Канал связи (КС) – комплекс технических средств и среды распространения, обеспечивающих передачу информации между источником и получателем в виде сигналов электросвязи в определенной полосе частот или с определенной скоростью передачи. Канал связи может быть организован с использованием волоконно-оптических линий связи, высокочастотной связи по линиям электропередачи, кабельным или радиорелейным линиям связи. Для устройств ДЗЛ используется канал на основе ВОЛС.

3 Сокращения

АПВ	автоматическое повторное включение
БТНТ	бросок тока намагничивания трансформатора
ВЛ	воздушная линия электропередачи
ВН	высокое напряжение
ДЗ	дистанционная защита
ДЗЗ	дистанционная защита от замыканий на землю
ДЗЛ	дифференциальная защита линии
ДТО	дифференциальная токовая отсечка
ЗНФР	защита от неполнофазного режима
ИО	измерительный орган
КЗ	короткое замыкание
КС	канал связи
КСЗ	комплект ступенчатых защит
ЛЭП	линия электропередачи
МТЗ	максимальная токовая защита
МЭК	международная электротехническая комиссия
НН	низкое напряжение
НП	нулевая последовательность
ОВТ	плоскость отношений векторов токов
ОД-КЗ	система отделитель-короткозамыкатель
ОП	обратная последовательность
ПАС	преобразователь аналоговых сигналов
ПО	пусковой орган
ПП	прямая последовательность
ПС	подстанция
ПУЭ	правила устройства электроустановок
РВУ	рекомендации по расчету уставок
РЗ	резервные защиты
РНМНП	реле направления мощности нулевой последовательности
РНОП	реле напряжения обратной последовательности
РС	реле сопротивления
ТЗП	токовая защита от перегрузки
ТНЗНП	токовая направленная защита нулевой последовательности
ТН	измерительный трансформатор напряжения
ТТ	измерительный трансформатор тока
УРЗ	устройство релейной защиты
УРОВ	устройство резервирования отказа выключателя

ЭДС	электродвижущая сила
GPS	Global Positioning System

4 Общие положения

Устройство дифференциальной защиты линии, может быть выполнено в микропроцессорных терминалах БЭ 2704, БЭ 2502, которые могут использоваться в шкафах устройств релейной защиты серий ШЭ2607, ШЭ2710 и ШЭТ и предназначено для защиты двухконцевых и трёхконцевых линий электропередачи напряжением 6 – 750 кВ.

УРЗ содержит:

- основную дифференциальную защиту линии (ДЗЛ),
- систему дистанционного приёма и передачи команд,
- комплект ступенчатых защит (КСЗ):
- пять ступеней ДЗ от междуфазных коротких замыканий (ДЗ),
- ступень ДЗ от коротких замыканий на землю (ДЗЗ),
- шесть ступеней токовой защиты нулевой последовательности (ТНЗНП),
- токовую отсечку,
- МТЗ,
- ТЗП,
- ЗНФР,
- УРОВ,
- устройство однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ);

Примечание – в зависимости от исполнения функциональный набор может незначительно отличаться.

5 Схемы подключения устройств релейной защиты к вторичным цепям ТТ, ТН, каналам связи

УРЗ предназначено для использования в типовых схемах в соответствии с [1]. На рисунке 1 изображена блок-схема подключения устройств релейной защиты к вторичным цепям ТТ, ТН, каналам связи. В приложении А приведена схема электрическая принципиальная цепей переменного тока и напряжения шкафа.

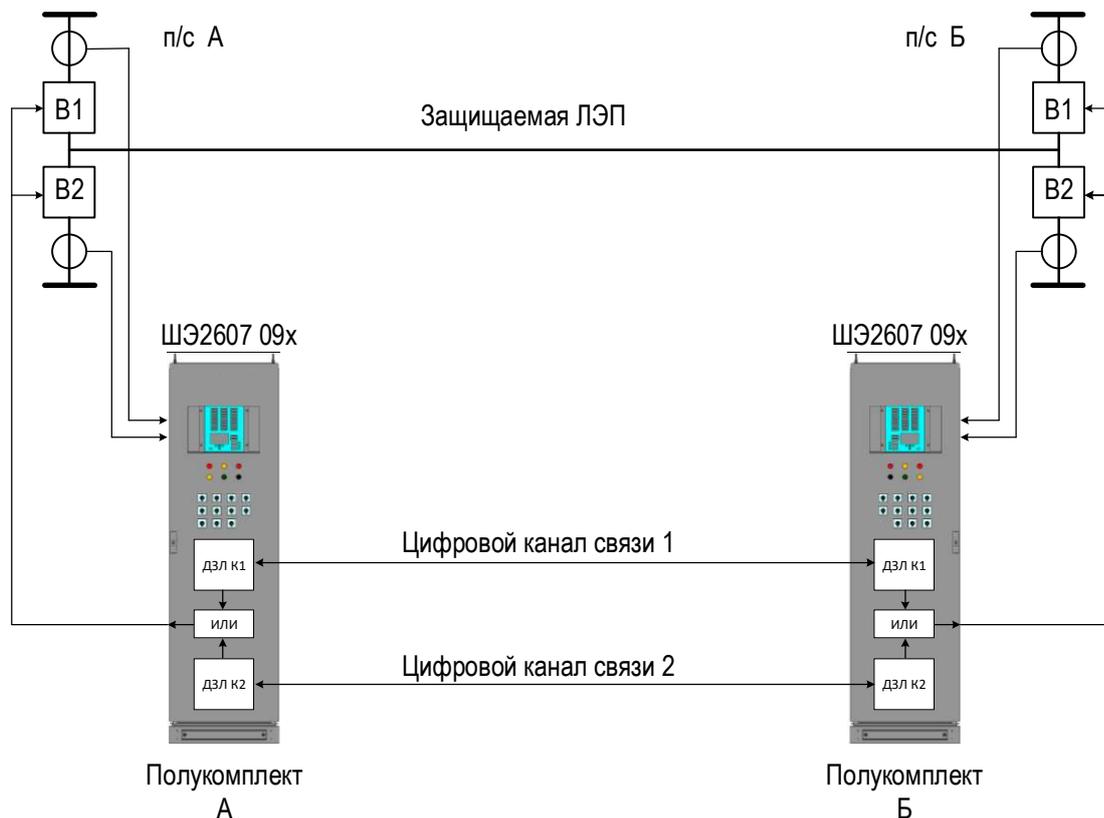


Рис. 1 – Блок-схема взаимодействия полукомплектов ДЗЛ

Для обеспечения несрабатывания ДЗЛ при синусоидальных первичных токах ТТ должны проверяться на 10 % погрешность при максимальном значении тока внешнего короткого замыкания (вне зоны действия защиты).

С целью проверки правильности функционирования ДЗЛ, использующей информацию от ТТ класса Р, необходимо произвести расчёты первичных и вторичных токов ТТ при КЗ в характерных точках. Методика выбора и проверки ТТ приведена в [2].

6 Продольная дифференциальная защита линии

6.1 Описание функции «Продольная дифференциальная защита линии»

6.1.1 Принцип действия дифференциальной защиты

Принцип действия дифференциальной защиты [3] двухконцевой линии основан на пофазном сравнении векторной суммы токов в начале и в конце защищаемого объекта (дифференциальный ток) с определенной пороговой величиной $I_{Д0}$. Векторные значения токов передаются между полукомплектами защиты по цифровым каналам связи (рисунок 2 а).

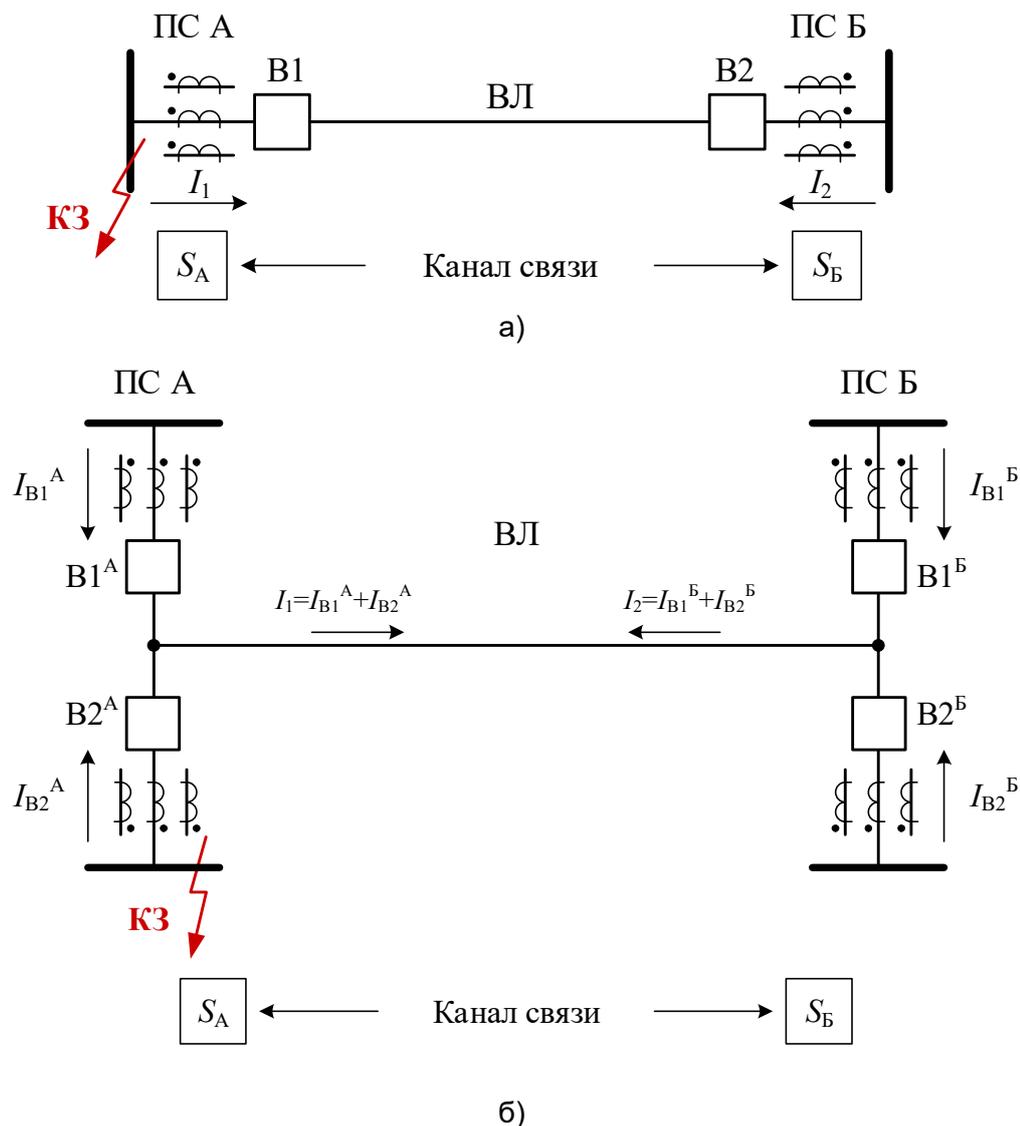


Рис. 2 – ДЗЛ 6-220 кВ, схемы подключения

а – схема с одним выключателем на присоединении;

б – схема включения на токи двух выключателей на одном присоединении

Дифференциальный ток определяется по формуле (рисунок 2 а):

$$I_{д(\Phi)} = |i_{\Phi}^A + i_{\Phi}^B|, \tag{1}$$

где Φ – фаза А, В или С.

В случае применения схемы с двумя выключателями расчет дифференциального тока производится следующим образом (рисунок 2 б):

$$I_{д(\Phi)} = |i_{B1\Phi}^A + i_{B2\Phi}^A + i_{B1\Phi}^B + i_{B2\Phi}^B|. \tag{2}$$

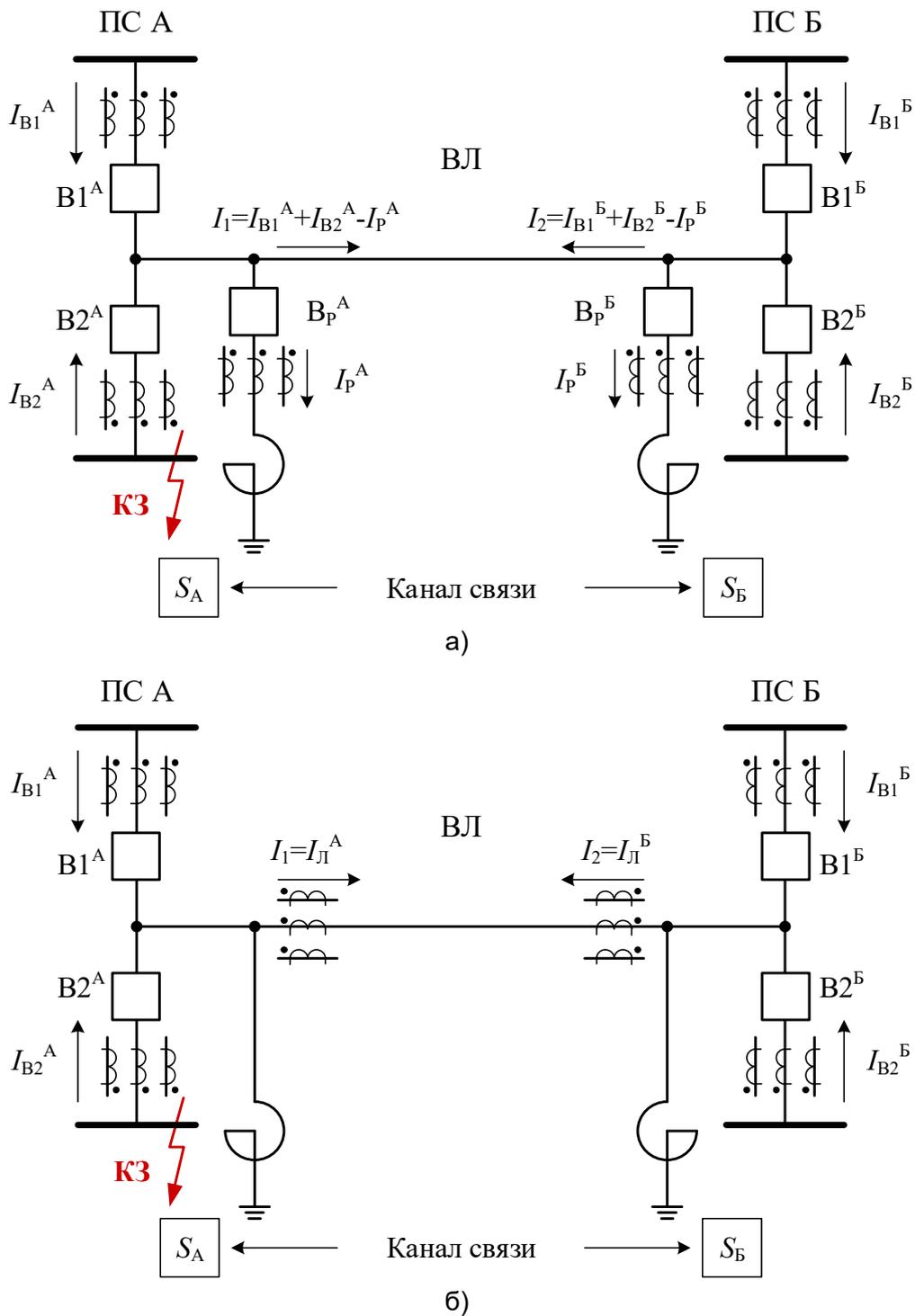


Рис. 3 – ДЗЛ 330-750 кВ, схемы подключения

а – схема включения на токи двух выключателей присоединения и ток реактора;

б – схема включения на токи двух выключателей присоединения и ток линии

Для защит линий с напряжением 330 – 750 кВ формула расчета дифференциального тока зависит от настроек устройства, **050255 Цепи тока**:

- при значении **0 - I_в и I_p**

$$I_{д(\phi)} = |i_{B1\phi}^A + i_{B2\phi}^A - i_{P\phi}^A + i_{B1\phi}^B + i_{B2\phi}^B - i_{P\phi}^B|, \quad (3)$$

где индексы В1, В2, Р – обозначают принадлежность токов к цепям выключателя В1, В2 или к цепям шунтирующего реактора (рисунок 3 а).

- при значении 1 - **I_в** и **I_л**

$$I_{д(ф)} = |i_{лф}^A + i_{лф}^B|, \quad (4)$$

где индекс Л – обозначает принадлежность токов к цепям ТТ установленного на линии (рисунок 3 б).

Примечание – более подробное описание схем подключения аналоговых цепей к УРЗ приводится в РЭ на соответствующее устройство.

Величины всех токов в ДЗЛ определяются в относительных единицах (о.е.)

$$I^* = \frac{I}{I_б}, \quad (5)$$

где $I_б$ – базисный ток дифференциальной защиты.

Использование параметра «базисный ток» позволяет производить сравнение токов по концам линии во вторичных величинах независимо от коэффициентов трансформации ТТ и их номинальных токов.

Величина базисного тока задается соответствующей уставкой в первичных величинах и должна быть одинакова для обоих полукомплектов ДЗЛ. Величина уставки базисного тока во вторичных величинах, при разных коэффициентах трансформации ТТ по концам линии для полукомплектов ДЗЛ должна различаться.

При внешних повреждениях по отношению к защищаемому объекту сумма токов (в первичных или относительных величинах) близка к нулю, а при повреждениях внутри защищаемого объекта величина дифференциального тока равна току в месте повреждения.

Для отстройки от небалансов в дифференциальном токе при внешних повреждениях, зависящих от величины тока, вызванных, в основном, различием условий работы и характеристик трансформаторов тока, применено торможение. Торможение – это увеличение пороговой величины срабатывания дифференциального органа в зависимости от тормозной величины.

Для анализа действия дифференциальных защит различных энергетических объектов в аварийных и нагрузочных режимах удобно пользоваться характеристиками срабатывания в комплексной плоскости отношений векторов токов \dot{I}_2/\dot{I}_1 (рисунок 6). Указанная плоскость служит для визуализации нормальных режимов работы линии и режимов в условиях аварийных повреждений в энергосистеме.

6.1.2 Работа на ВЛ с ответвлениями

Повреждения на ответвлениях находятся в зоне действия ДЗЛ. УРЗ должно отличать повреждения на защищаемой линии от повреждений на ответвлении. Логическая схема

работы ДЗЛ приведена на рисунке 4. На линиях с ответвлениями без питания на концах защита работает в режиме «Работа на ВЛ с ответвлениями» (программная накладка ХВ1, рисунок 4). В данном режиме используются две дополнительные группы пусковых органов, к ним относятся:

- реле максимального напряжения обратной последовательности – **ПО U₂**, реле минимального напряжения прямой последовательности – **ПО U₁ мин**;
- реле сопротивления ответвления – **ИО Z_{отв}**, реле направления мощности нулевой последовательности разрешающее – **ИО M₀ разр.**

Данные пусковые органы разрешают действие ДЗЛ при КЗ на линии или на ответвлениях.

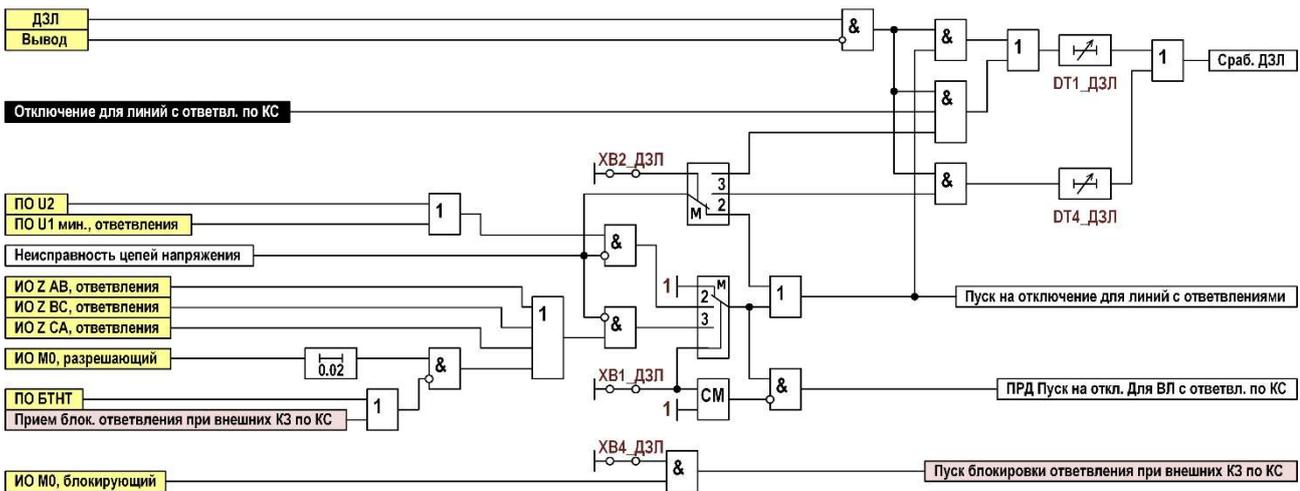


Рис. 4 – Логическая схема ДЗЛ

Для отстройки от КЗ на стороне низкого напряжения трансформатора ответвления может применяться дополнительный комплект измерительных органов, состоящий из трех реле междуфазного сопротивления и реле направления мощности нулевой последовательности, отстроенного от броска тока намагничивания трансформаторов, пункт меню терминала **ДЗЛ / Логика работы / Работа с ответвлениями | по РС** или в EKRASMS – **Регулируемые параметры / ДЗЛ / Логика работы / ХВ1_ДЗЛ Работа на ВЛ с ответвлениями | по РС**.

При малой длине защищаемой линии и небольшой мощности трансформаторов ответвления отстройка от КЗ на стороне низкого напряжения трансформатора может осуществляться использованием пуска ДЗЛ по напряжению обратной последовательности и по минимальному напряжению прямой последовательности, пункт меню терминала **ДЗЛ / Логика работы / Работа с ответвлениями | по U** или в EKRASMS – **Регулируемые параметры / ДЗЛ / Логика работы / ХВ1_ДЗЛ Работа на ВЛ с ответвлениями | по U**.

При наличии на линии ответвления с трансформаторами уставка срабатывания дифференциальной защиты должна быть отстроена от тока, протекающего в ответвлении в нагрузочном режиме.

Для режима работы ДЗЛ на линии с ответвлениями необходимо дополнительно выбрать группу измерительных органов, обеспечивающих отстройку от КЗ на стороне низкого напряжения трансформаторов, установленных на ответвлении:

- **ИО Zотв** от междуфазных КЗ и **ИО M0 разр** для отстройки от внешних КЗ с землей при заземленной нейтрали трансформаторов ответвлений.

- **ПО U₂** и реле минимального напряжения прямой последовательности **ПО U₁ мин** (для трехфазных КЗ).

Реле сопротивления ответвления предназначено для разрешения работы ДЗЛ при трехфазном, междуфазном или междуфазном КЗ на землю, находящемся в пределах защищаемой линии либо на линии ответвления до шин ВН трансформатора. Замер сопротивления при КЗ на шинах ВН и НН трансформатора отличается на сопротивление трансформатора – $Z_{тр}$. При КЗ на стороне НН трансформатора РС срабатывать не должно, тем самым блокируя действие дифференциальной защиты линии.

Дополнительно в устройстве предусмотрена блокировка защиты при внешних КЗ в схеме с заземленной обмоткой ВН трансформатора ответвления. При внешних КЗ, через нейтраль трансформатора ответвления может протекать ток НП, который защита будет воспринимать как дифференциальный и, как следствие, возможно ложное срабатывание защиты. В такой ситуации в устройстве на противоположном конце ВЛ срабатывает **ИО M0 бл**, по срабатыванию которого производится передача команды **ВЧТО №4 КС** по каналу связи. На противоположном конце прием комплектом ДЗЛ команды **ВЧТО №4 КС** блокирует действие ДЗЛ (рисунок 4).

6.1.3 Режимы работы ДЗЛ

6.1.3.1 Нагрузочный режим и режим внешнего повреждения

В нормальном режиме по линии протекает ток нагрузки (рисунок 5 а). В комплексной плоскости ОВТ, без учета дополнительных искажающих факторов, нагрузочный режим (рисунок 5 а) и внешние повреждения (рисунок 5 б) представлены одной точкой: $(-1 + j0)$ - рисунок 6. В этих режимах токи обоих полукомплектов устройств равны по модулю и отличаются по углу на 180° . Дифференциальный ток в этих режимах должен быть равен нулю.

Наличие ответвлений на линии вызывает появление в каждом полукомплекте ДЗЛ дифференциального тока, равного току нагрузочного режима ответвлений. Отстройка от указанного дифференциального тока в нормальном режиме осуществляется соответствующим выбором начального тока срабатывания ДЗЛ $I_{д0}$.

Кабельные линии и протяженные воздушные линии характеризуются наличием емкостного тока, являющимся для защиты дифференциальным током. Для исключения дополнительного заглубления ДЗЛ при отстройке от емкостного тока применяется выравнивание токов по концам линии с помощью специального устройства компенсации емкостного тока.

6.1.3.2 Повреждение в зоне действия ДЗЛ

При повреждениях на линии дифференциальный ток, вычисляемый в каждом полукомплекте ДЗЛ, равен току повреждения $I_{к3}$ в месте КЗ (рисунок 5 в).

В случае одностороннего питания при внутренних КЗ через переходное сопротивление возможно протекание токов по концам линии с направлением, соответствующем внешнему повреждению (рисунок 5 г). Однако, в этом случае, соотношение между модулями токов по концам линии значительно отличается от единицы и этот режим может распознаваться выбором соответствующей характеристики блокирования ДЗЛ.

В устройстве ДЗЛ производится пофазное сравнение токов по концам защищаемой линии. При внутренних повреждениях на линии с двухсторонним питанием имеет место фазовый сдвиг $\varphi_{нагр}$ между сравниваемыми фазными токами, определяемый углом электропередачи (разностью фаз эквивалентных ЭДС по концам линии $\pm\delta$) и различием соотношений X/R эквивалентных сопротивлений по обе стороны относительно места КЗ (рисунок 7).

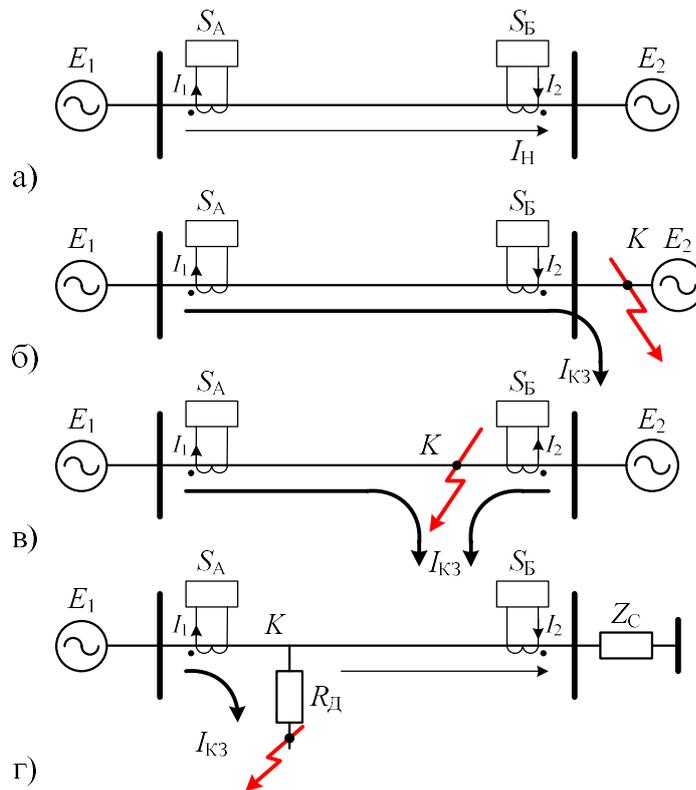


Рис. 5 – Рабочие и аварийные режимы работы:

- а – нагрузочный режим работы ДЗЛ;
- б – режим внешнего повреждения;
- в – режим повреждения на линии;
- г – режим повреждения на линии с односторонним питанием

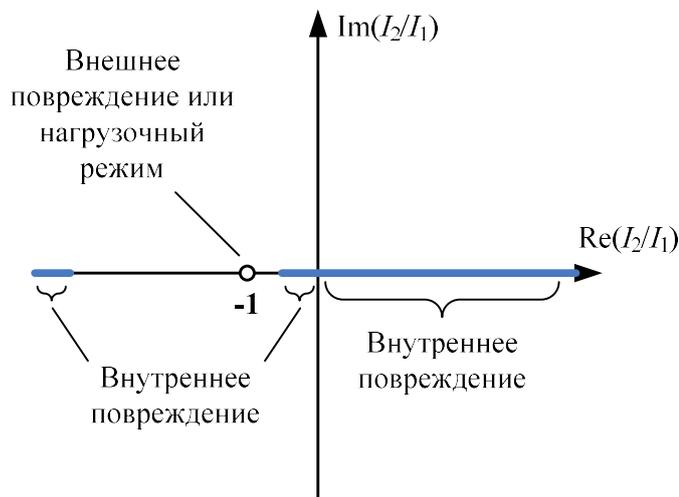


Рис. 6 – Характерные точки на плоскости ОВТ

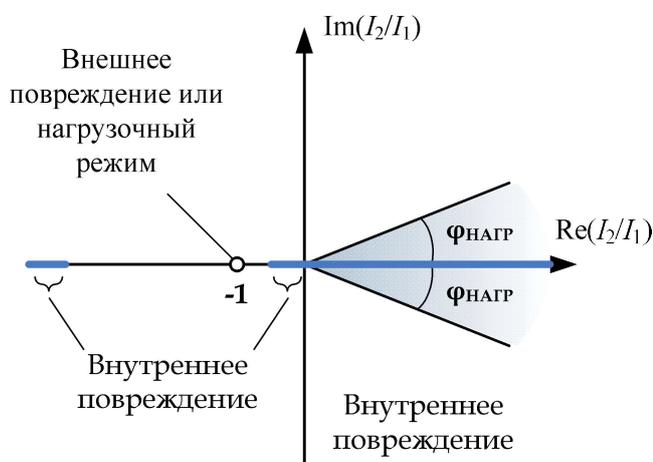


Рис. 7 – Влияние угла нагрузки

6.1.3.3 Асимметрия цифрового канала связи

Асимметрия цифрового канала связи между полуконструкциями ДЗЛ по концам защищаемой линии также приводит к изменению взаимного угла между измеряемыми токами по концам линии. Под асимметрией КС подразумевается половина разности времени задержки передачи цифрового сигнала между полуконструкциями $\Delta t_{КС}$ в прямом и обратном направлении. Дополнительный сдвиг фаз между измеряемыми токами $\varphi_{КС}$, (°) пропорционален времени $\Delta t_{КС}$, (мкс):

$$\varphi_{КС} = \Delta t_{КС} \frac{360^\circ}{20 \text{ мс}} = \Delta t_{КС} \cdot 18 \cdot 10^{-3} \text{ (}^\circ\text{)}. \quad (6)$$

При использовании в качестве физической реализации выделенного канала связи (выделенных жил оптического кабеля) дополнительный фазовый сдвиг $\varphi_{КС}$ можно не учитывать, поскольку при этом величина $\Delta t_{КС}$ составляет единицы микросекунд.

В случае организации канала связи с использованием мультиплексов имеют место некоторые ограничения. Отклонение величины асимметрии от значения, измеренного при наладке и являющегося одним из источников небаланса в дифференциальном токе, не может

быть определено и скомпенсировано автоматически. Поэтому вводится ограничение на величину допустимого изменения асимметрии – не более 500 мкс, что учитывается при выборе уставок срабатывания ДЗЛ.

Таким образом, одним из требований предъявляемым к мультиплексированному КС, является непостоянство асимметрии в пределах 500 мкс при величине постоянной асимметрии не более 2500 мкс.

При внешних повреждениях и в нагрузочных режимах, за счет разности времени $\Delta t_{КС}$ передачи цифрового сигнала между полукомплектами в прямом и обратном направлении, характеристическая точка режима ДЗЛ в комплексной плоскости отклоняется по дуге окружности от точки минус 1 на угол $\varphi_{КС}$, как показано на рисунке 8.

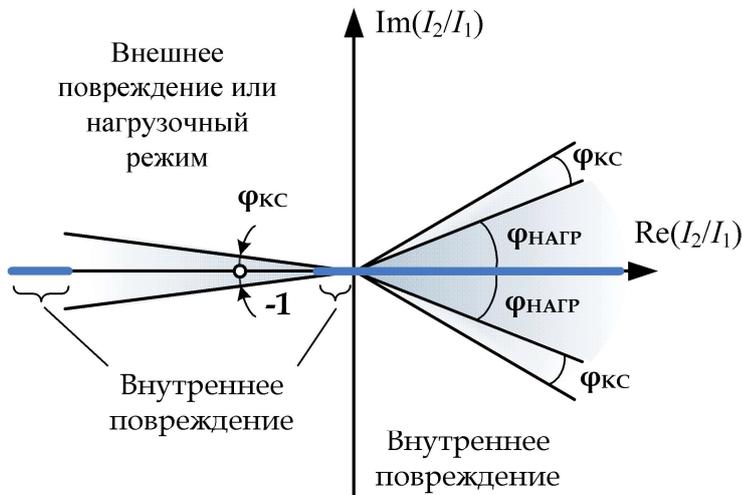


Рис. 8 – Влияние асимметричности канала связи

6.1.3.4 Насыщение измерительных трансформаторов тока

Насыщение магнитопроводов трансформаторов тока характеризуется отклонением тока вторичной величины от первичной с учетом коэффициента трансформации. Следовательно, отношение векторов вторичного тока, измеряемых по концам защищаемой линии при внешних повреждениях с большими токами КЗ, отклоняется от точки минус 1.

Наибольшее влияние нелинейности измерительных трансформаторов тока имеет место для случая внешнего КЗ, когда с одной стороны воздушной линии электропередачи ток трансформируется без искажений, а с другой стороны линии имеет место насыщение ТТ. В этом случае в процессе насыщения ТТ меняется соотношение I_2/I_1 и характеристическая точка режима работы ДЗЛ в комплексной плоскости отклоняется от точки минус 1. Причем это отклонение определяется степенью насыщения ТТ и может быть значительным.

Степень насыщения ТТ при повреждении в энергосистеме зависит от нескольких факторов: кратности тока КЗ, наличия апериодической составляющей в токе КЗ и ее постоянной времени затухания, от величины нагрузки во вторичной цепи ТТ, характеристик магнитопровода и остаточной намагниченности.

На рисунке 9 показаны осциллограммы вторичных токов ТТ (верхнее поле), кривые изменения во времени отношения модулей векторов токов (среднее поле) и кривые изменения во времени разности фаз векторов токов (нижнее поле). Постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ равна 50 мс.

При внешнем КЗ вторичные токи направлены противоположно. Для наглядности на рисунках 9 и 10 осциллограммы токов (верхнее поле) развернуты на 180°.

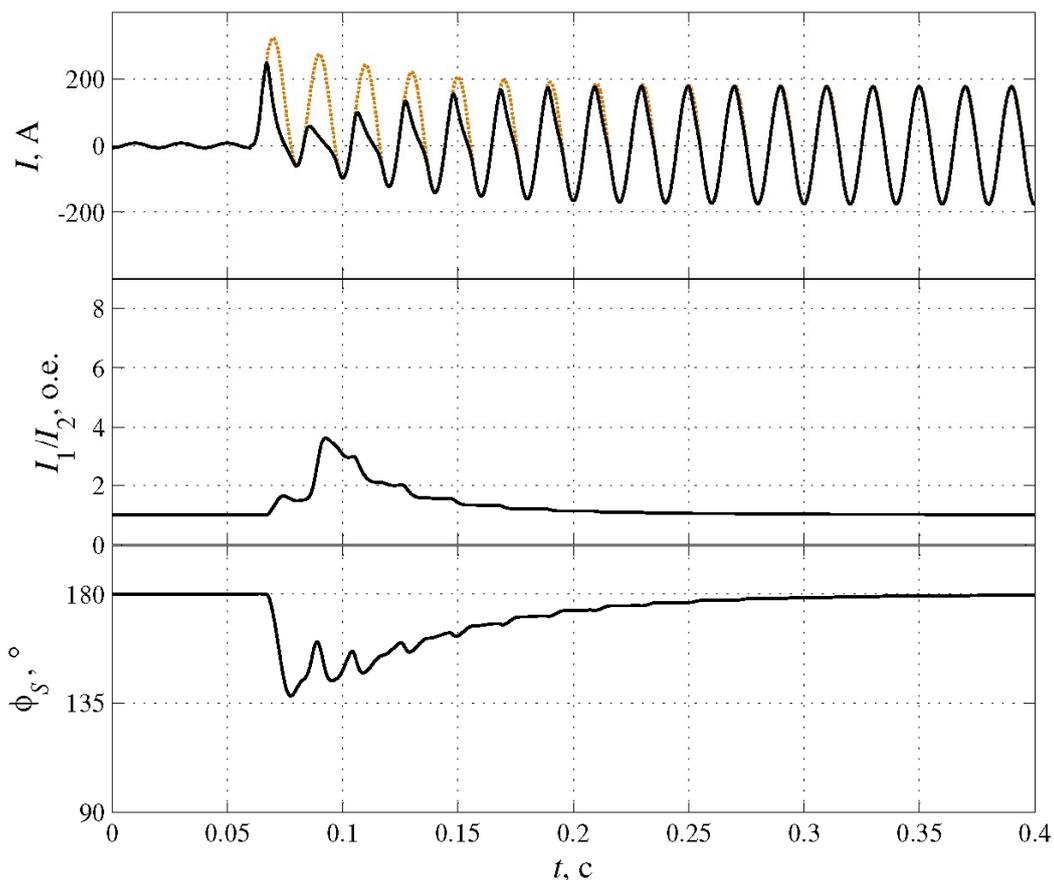


Рис. 9 – Насыщение ТТ: $\tau = 50$ мс, $\varepsilon = 10\%$

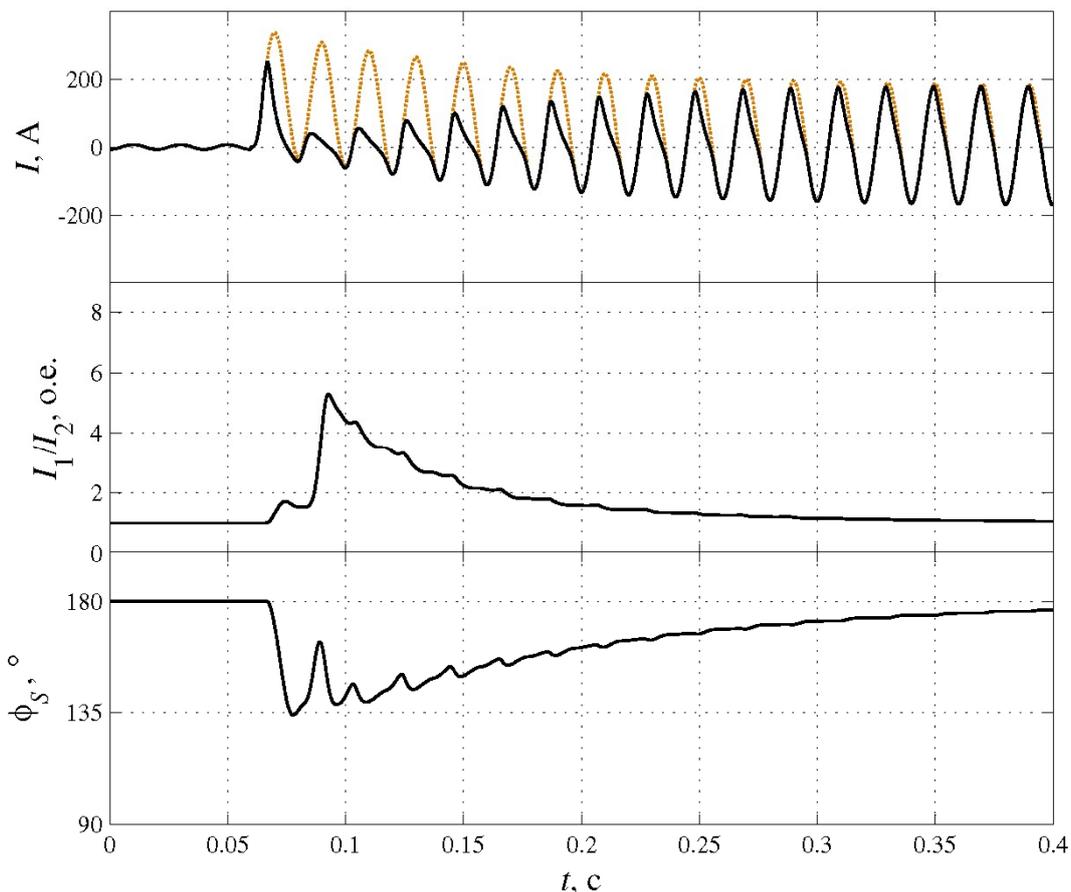


Рис. 10 – Насыщение ТТ: $\tau = 100$ мс, $\varepsilon = 10$ %

Погрешность ТТ (по действующему значению токов) для установившегося тока КЗ в данном примере составляет 10 %.

Чем больше погрешность ТТ в установившемся режиме КЗ, тем больше возможное отклонение модуля отношения векторов токов от единицы и величины фазового сдвига между токами от 180° в переходных режимах работы ТТ. Переходный режим работы ТТ рассматривается при наличии аperiodической составляющей в токе КЗ и остаточной намагниченности магнитопровода. Так, для случая, приведенного на рисунке 9, максимальная величина отношений модулей токов составляет 3,6 о. е., максимальное отклонение сдвига фаз $-\Delta\phi_s = 41^\circ$.

Максимальные величины отношений токов и фазовых сдвигов зависят от постоянной времени аperiodической составляющей тока КЗ. На рисунке 10 приведены аналогичные кривые для постоянной времени аperiodической составляющей тока КЗ равной 100 мс. В этом случае максимальная величина отношений токов составляет 5,3 о. е., а максимальное отклонение сдвига фаз $-\Delta\phi_s = 46^\circ$. Максимумы величины отношения токов и фазового сдвига возникают в разные моменты времени (рисунок 9 и 10).

Так как в расчетах по выбору параметров ДЗЛ участвуют данные величины, то указанная разновременность возникновения максимумов обеспечивает небольшой запас при расчете параметров срабатывания.

Таким образом, имеем еще одну составляющую $\Delta\varphi_s$ общего угла, на который может отклоняться вектор отношений токов по концам линии (рисунок 11).

Для обеспечения отсутствия излишних отключений линии электропередачи при внешних повреждениях с определенными токами КЗ и насыщением ТТ, необходимо иметь характеристику зоны блокирования ДЗЛ при внешних повреждениях такого вида, чтобы все характеристические точки режима ДЗЛ на комплексной плоскости были внутри этой зоны. Если выполнить указанное условие невозможно, то необходимо ввести определенную задержку на срабатывание ДЗЛ. Величина модуля отношения токов и сдвиг фаз в переходном процессе КЗ со временем уменьшаются, причем, чем меньше постоянная времени затухания апериодической составляющей в первичном токе, тем быстрее происходит выход из режима насыщения и переход к установившейся величине вторичного тока КЗ.

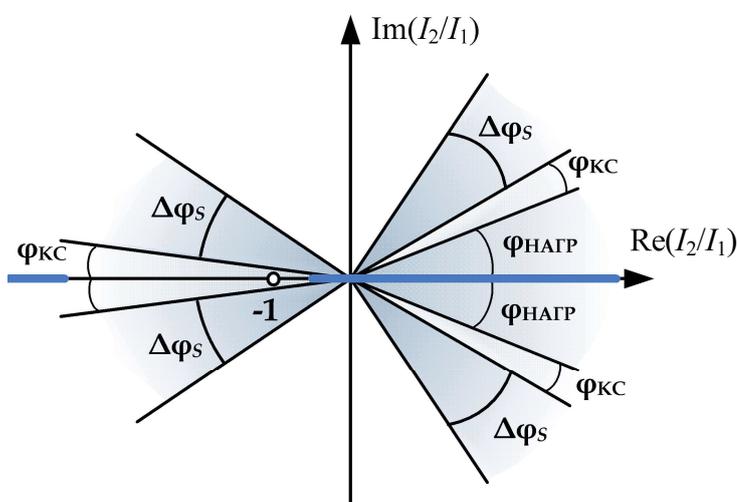


Рис. 11 – Влияние насыщения ТТ

Следует помнить, что излишнее действие ДЗЛ при внешних повреждениях и коммутациях может приносить больший ущерб, чем некоторое замедление отключения при повреждениях на линии.

Примечание - при реализации дифференциальной защиты следует стремиться к выбору ТТ имеющих одинаковые характеристики и конструкцию.

6.1.4 Характеристики срабатывания ДЗЛ

Характеристика срабатывания защиты в координатах дифференциальной и тормозной величин приведена на рисунке 12. Характеристика срабатывания имеет четыре участка.

Дифференциальный ток I_d соответствует модулю первой гармоники тока, протекающего в месте повреждения при КЗ в зоне действия ДЗЛ. Действие дифференциального элемента на отключение разрешается только при превышении величины дифференциального тока порогового значения, определяемого уставкой I_{d0} . Это соответствует горизонтальному участку характеристики срабатывания ДЗЛ.

Величина порога срабатывания дифференциальной защиты $I_{Д0}$ регулируется и находится в пределах от 0,2 до 2,0 о.е.

Первый наклонный участок характеристики, исходящий из начала координат, проходит под углом к оси абсцисс, соответствующем коэффициенту $k_{Т1}$. (определяется уставкой $k_{Т1}$). Точка пересечения горизонтального участка и первого наклонного участка определяется по выражению:

$$I_{S1} = \frac{I_{Д0}}{k_{Т1}}. \quad (7)$$

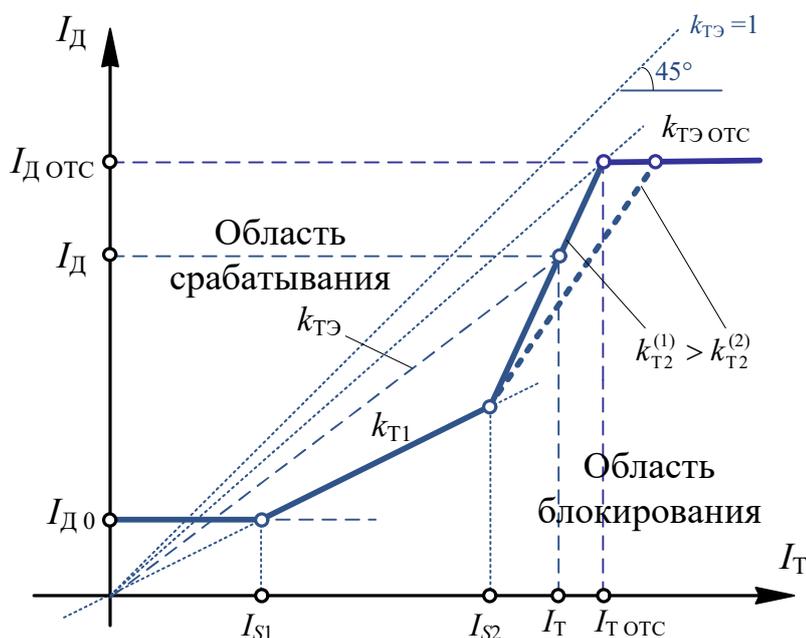


Рис. 12 – Характеристика срабатывания ДЗЛ

Второй наклонный участок характеристики определяется двумя уставками:

I_{S2} – ток начала торможения 2-го участка характеристики,

$k_{Т2}$ - коэффициент торможения 2-го участка характеристики.

Для каждой точки на втором участке характеристики можно рассчитать эквивалентный коэффициент торможения $k_{ТЭ}$, величина которого зависит от нескольких параметров и может быть рассчитана по формуле:

$$k_{ТЭ} = k_{Т1} \frac{I_{S2}}{I_T} + k_{Т2} \left(\frac{I_T - I_{S2}}{I_T} \right). \quad (8)$$

Величина коэффициента $k_{ТЭ}$, зависящая от тормозного тока I_T , в устройстве ограничена величиной 0,9 ($k_{ТЭ} \leq 0,9$), что обеспечивает срабатывание ДЗЛ при неуспешном опробовании ВЛ (включение на КЗ) при любых значениях токов КЗ (рисунок 12).

Эквивалентный коэффициент торможения показывает общую степень торможения при данном тормозном токе и относится ко всей характеристике срабатывания, включая первый наклонный участок. На первом наклонном участке $k_{ТЭ} = k_{Т1}$.

Коэффициент $k_{Т1}$ регулируется в пределах от 0,1 до 0,9. Коэффициент $k_{Т2}$ регулируется в пределах от 0,3 до 3,0. Уставка I_{S2} регулируется в пределах от 0,4 о.е. до 20,0 о.е.

Действие ДЗЛ на отключение при значении тормозного тока $I_T > I_{S1}$ происходит при превышении величины дифференциального тока пороговой величины $I_d > k_{ТЭ} \cdot I_T$.

При превышении дифференциальным током величины $I_{д\text{отс}}$, независимо от величины тормозного тока, происходит срабатывание ПО дифференциальной токовой отсечки (ДТО) с действием на отключение с регулируемой задержкой в пределах от 0,0 до 2,0 с. Уставка срабатывания ПО ДТО $I_{д\text{отс}}$ регулируется в пределах от 2,0 о.е. до 40,0 о.е.

Величина тормозного тока I_T (рисунок 12) зависит от выбранного типа торможения. Для схемы подстанций с одним выключателем с каждой стороны линии дифференциальная защита имеет возможность работы с тремя типами характеристик (в плоскости ОВТ), показанных на рисунке 13, отличающихся способом формирования тормозного тока:

- от суммы модулей векторов токов (рисунок 13 а):

$$I_{Т(Ф)} = |I_{\Phi}^A| + |I_{\Phi}^B|; \tag{9}$$

- от модуля разности векторов токов (рисунок 13 б)

$$I_{Т(Ф)} = |I_{\Phi}^A - I_{\Phi}^B|; \tag{10}$$

- с использованием специальной «секторной» характеристики (рисунок 13 в).

Примечание – на обоих полукомплексах ДЗЛ, защищающих линию, должен выбираться одинаковый тип характеристики торможения.

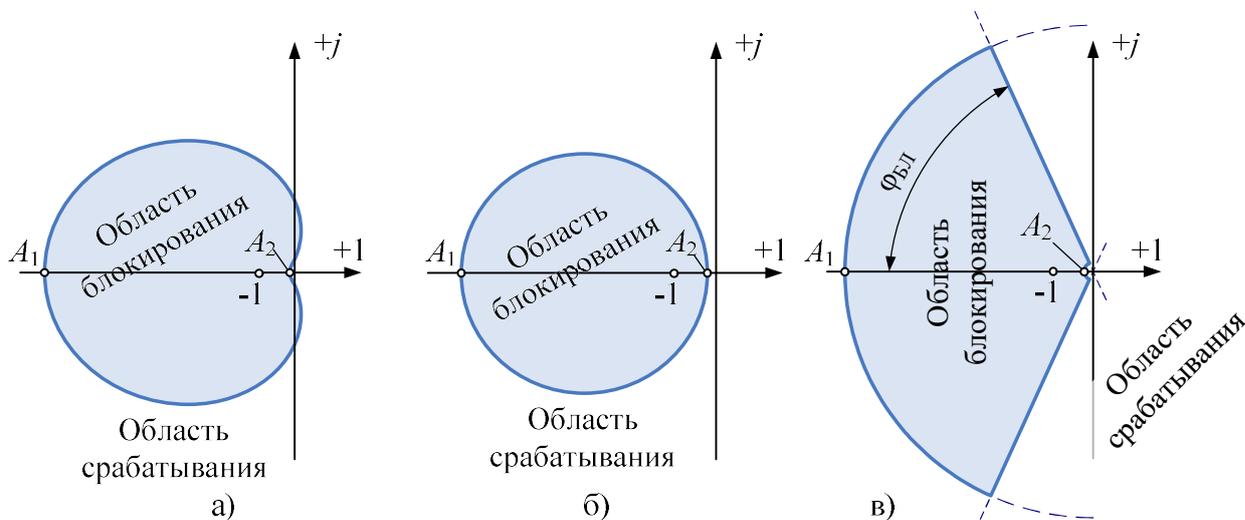


Рис. 13 – Характеристики блокирования ДЗЛ в комплексной плоскости:

а – «кардиоида», б – «окружность», в – «сектор»

Для первого типа торможения (сумма модулей векторов токов) величина торможения не зависит от угла сдвига фаз между токами и одинакова для внутренних и внешних КЗ (рисунок 13 а, схемы на рисунке 2 б, на рисунке 3). При этом характеристика ДЗЛ представляет собой область на комплексной плоскости, ограниченную «кардиоидой».

Во втором случае (модуль разности векторов токов) имеется зависимость тормозной величины от сдвига фаз токов по концам линии. Торможение максимально при внешних повреждениях и минимально при внутренних КЗ. Характеристика ДЗЛ в комплексной плоскости для этого случая имеет вид окружности (рисунок 13 б, схема на рисунке 2 а).

Для третьего типа характеристики («сектор») зона блокирования определяется отношением I_2/I_1 векторов токов по концам линии. В этом случае, ввиду физического отсутствия тормозной величины, невозможно представление характеристики на плоскости дифференциальных и тормозных величин.

Особенностью характеристики блокирования вида «сектор» ДЗЛ (рисунке 13 в, схема на рисунке 2 а) является независимость границ модуля отношения токов и угла блокирования. Границы A_1 и A_2 по допустимой величине модуля отношений токов определяются заданным коэффициентом торможения $k_{т1}$, а по величине угла задается уставкой $\varphi_{бл}$.

При большой разнице значений токов внутреннего повреждения по концам линии, например для линии с односторонним питанием, тормозная величина практически не зависит от угла между токами плеч, что соответствует эквивалентности первого и второго принципа формирования тормозной величины для указанного режима.

Для всех трех типов характеристик блокирования ДЗЛ координаты точек A_1 и A_2 одинаковы и определяются при конкретной величине тормозного тока соответствующим коэффициентом торможения $k_{тэ}$:

$$A_1 = -\frac{1 + k_{тэ}}{1 - k_{тэ}}, \quad A_2 = \frac{1}{A_1}. \quad (11)$$

В случае применения схемы с двумя выключателями используется только характеристика типа «кардиоида» и расчет тормозного тока производится следующим образом (рисунок 2 б):

$$I_{т(\phi)} = |i_{B1 \phi}^A| + |i_{B2 \phi}^A| + |i_{B1 \phi}^B| + |i_{B2 \phi}^B|, \quad (12)$$

где $B1, B2$ – обозначают принадлежность токов к цепям выключателя $B1, B2$.

Для защит линий напряжением 330 – 750 кВ, также используется только характеристика типа «кардиоида» и расчёт тормозного тока производится следующими способами, зависящими от настроек устройства, **050255 Цепи тока**:

- при значении **0 - Iв и Iр**

$$I_{т(\phi)} = |i_{B1 \phi}^A| + |i_{B2 \phi}^A| + |i_{P \phi}^A| + |i_{B1 \phi}^B| + |i_{B2 \phi}^B| + |i_{P \phi}^B|, \quad (13)$$

где индексы В1, В2, Р – обозначают принадлежность токов к цепям выключателя В1, В2 или к цепям шунтирующего реактора (рисунок 3 а).

- при значении **1 - I_в и I_л**

$$I_{T(\Phi)} = |j_{L\Phi}^A| + |j_{L\Phi}^B|. \quad (14)$$

где индекс Л – обозначает принадлежность токов к цепям ТТ установленного на линии (рисунок 3 б).

Примечание – в зависимости от версии программного обеспечения выбор типа торможения может быть ограничен. Это зависит от реализованных в данной версии вариантов схем подключения аналоговых цепей тока.

Срабатывание дифференциальной защиты при использовании первых двух характеристик происходит при условии:

$$I_d > \max(I_{d0}, k_{TЭ} \cdot I_T). \quad (15)$$

Для третьего типа характеристики условием срабатывания ДЗЛ на отключение является выполнение условия $I_d > I_{d0}$, а так же условие непопадания характеристической точки в область блокирования типа «сектор». Поэтому для характеристики типа «сектор» необходимо задать только значение пороговой величины I_{d0} , коэффициент торможения k_{T1} и уставку по углу блокировки $\varphi_{бл}$.

Нахождение характеристической точки внутри области, ограниченной «кардиоидой», «окружностью» или «сектором», соответствует блокированию защиты. Нахождение характеристической точки действия ДЗЛ вне указанной области соответствует действию ДЗЛ на отключение.

Правильное действие ДЗЛ имеет место, если при внешних повреждениях в энергосистеме характеристическая точка находится в зоне блокирования во время КЗ и сопутствующих отключений, включая переходные режимы с насыщением ТТ. При любых КЗ на линии характеристическая точка должна находиться вне зоны блокирования.

Для первых двух характеристик блокирования ДЗЛ существует понятие угла блокировки $\varphi_{бл}$ аналогично углу блокировки фазной характеристики дифференциально-фазной защиты. Принципиальное отличие в том, что угол $\varphi_{бл}$ зависит от соотношения векторов токов по концам линии (рисунок 14).

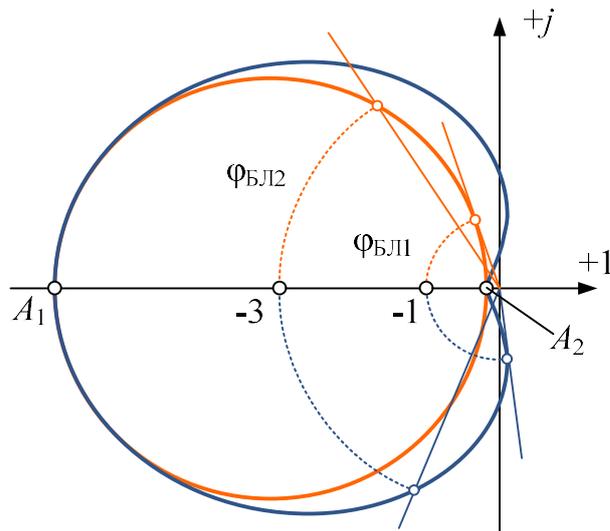


Рис. 14 – Угол блокировки при $k_{ТЭ} = 0,75$

Так, например, для характеристики «окружность» при коэффициенте торможения равном 0,75 и отношении $|i_2/i_1| = 1$ угол блокировки будет равен 74° . Если увеличить отношение до значения $|i_2/i_1| = 3$, то угол блокировки составит уже 62° . Для «кардиоиды», при тех же условиях, величины углов блокирования равны 97° и 80° соответственно.

На рисунке 15 показана взаимосвязь между модулем отношения токов по концам линии и предельным углом между векторами токов, при котором происходит блокирование ДЗЛ. Кривые приведены для всех трех характеристик блокирования ДЗЛ и для разных значений коэффициента торможения. Пользуясь этими зависимостями, можно для конкретных условий по насыщению ТТ подобрать тип характеристики блокирования и коэффициент торможения.

Характеристика типа «сектор» подобна зоне блокирования дифференциально – фазной защиты. Поэтому по степени влияния насыщения ТТ на поведение защиты при внешних КЗ ДЗЛ с характеристикой «сектор» близка к ДФЗ. Наличие ограничений на отношение модулей тока по концам линии позволяет ДЗЛ работать на линиях с односторонним питанием, что невозможно для ДФЗ.

При использовании зоны блокирования в виде «окружности» условия блокирования хуже, но область действия на отключение шире. Применение такой характеристики рекомендовано при малой вероятности насыщения ТТ.

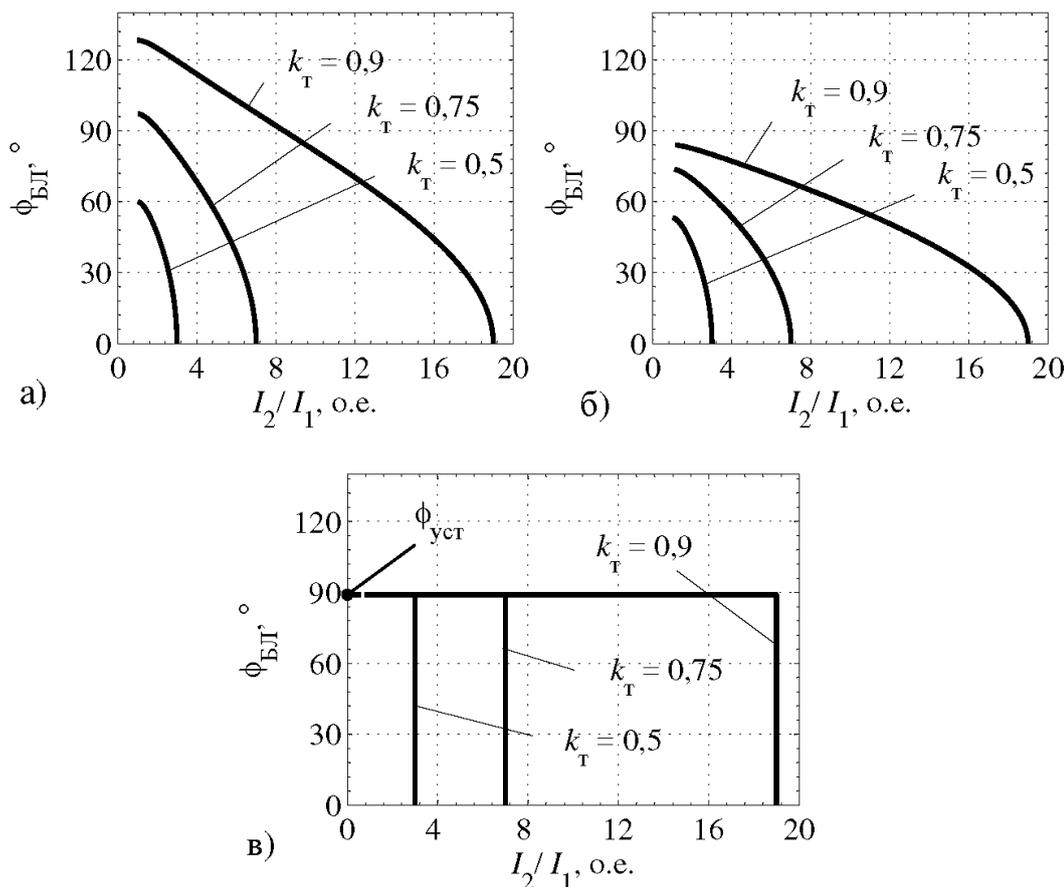


Рис. 15 – Взаимосвязь между максимумом отношения токов по концам защищаемой линии и предельным углом между ними, при котором происходит блокирование ДЗЛ:

- а – для характеристики «кардиоида»;
- б – для характеристики «окружность»;
- в – для характеристики «сектор»

6.2 Расчет и выбор параметров настройки (уставок) и алгоритмов функционирования функции «Продольная дифференциальная защита линии»

При выборе уставок ДЗЛ необходимо определить следующие параметры:

- величину базисного тока ДЗЛ $I_{\text{б ДЗЛ}}$;
- начальный ток срабатывания дифференциальной защиты $I_{\text{д 0}}$;
- ток срабатывания дифференциальной токовой отсечки $I_{\text{д отс}}$;
- коэффициенты торможения k_{T1} , k_{T2} и точку начала торможения I_2 для 2-го участка.

Уставки для обоих полукомплектов защиты, относящиеся к функции ДЗЛ, должны быть выбраны одинаковыми (в первичных величинах).

6.2.1 Выбор базисного тока ДЗЛ

Задание величины базисного тока ДЗЛ необходимо для правильного суммирования токов во вторичных величинах при разных коэффициентах трансформации ТТ по концам

линии. Базисный ток ДЗЛ задается в первичных величинах и может быть выбран равным первичному номинальному току ТТ. Вторичный базисный ток ДЗЛ в устройствах рассчитывается автоматически, исходя из заданных уставок «первичная» и «вторичная» величина датчика аналогового входа в каждом терминале.

Для схемы подключения ДЗЛ с двумя выключателями допускаются разные первичные и вторичные токи ТТ для каждого выключателя.

В этом случае в ДЗЛ используются только параметры «первичная» и «вторичная» величина аналогового входа ТТ выключателя В1. Для правильного суммирования токов ТТ выключателей В1 и В2 при вычислениях тока линии, дифференциальных и тормозных токов в устройстве автоматически рассчитывается весовой коэффициент, приводящий вторичный ток ТТ В2 к масштабу, соответствующему току ТТ В1.

Для ДЗЛ напряжением 330-750 кВ (ШЭ2710 591) имеются токовые входы для подключения токов шунтирующего реактора. Для этой токовой цепи также допускаются первичные и вторичные токи ТТ реакторов, отличающиеся от первичных и вторичных токов ТТ В1. Приведение вторичных токов ТТ реактора к масштабу токов ТТ В1 производится автоматически исходя из заданных уставок «первичная» и «вторичная» величина датчиков аналоговых входов цепей ТТ реактора и выключателя В1.

Если на линии установлены ТТ с различным первичным номинальным током, то при выборе базисного тока ДЗЛ рекомендуется использовать среднеарифметическое значение номинальных токов ТТ плеч:

$$I_{б\text{ ДЗЛ}} = \frac{I_{ТТ\text{ ПС А}} + I_{ТТ\text{ ПС Б}}}{2}, \quad (16)$$

где $I_{б\text{ ДЗЛ}}$ – базисный ток ДЗЛ,

$I_{ТТ\text{ ПС А}}$ и $I_{ТТ\text{ ПС Б}}$ – номинальный первичный ток ТТ цепи В1 на ПС А и ПС Б (рисунок 2).

Примечание – возможно задание любого базисного тока из диапазона значений от $I_{ТТ\text{ ПС А}}$ до $I_{ТТ\text{ ПС Б}}$.

В первичных величинах базисный ток должен задаваться одинаковым для обоих полуконцептов. Для трехконцевой ДЗЛ базисный ток должен задаваться одинаковым, соответственно для всех трех устройств комплекта.

Первичные номинальные токи ТТ по концам линии не должны отличаться более чем в 2,5 раза. Первичные номинальные токи ТТ двух выключателей линии в пределах одной ПС также не должны отличаться более чем в 2,5 раза. В противном случае может потребоваться установка дополнительных выравнивающих трансформаторов тока. Указанное требование касается только величин первичных токов ТТ. Вторичные токи ТТ по концам линии или двух выключателей линии могут иметь разную номинальную величину (1 или 5 А).

Примечание – Установка промежуточных трансформаторов должна быть принята как крайняя временная мера. При проектировании дифференциальной защиты необходимо закладывать ТТ одного типа с одинаковыми номинальными токами.

Пример

Подстанция А. Трансформатор тока цепи выключателя В1 имеет коэффициент трансформации 1000/1, трансформатор тока цепи выключателя В2 - 800/5 (рисунок 2 б).

Подстанция Б. Трансформатор тока цепи выключателя В1 имеет коэффициент трансформации 1200/1, трансформатор тока цепи выключателя В2 имеет коэффициент трансформации 1000/1.

Соотношение первичных токов ТТ В1 по концам линии $1200/1000 = 1,2 < 2,5$

Соотношение первичных токов ТТ В1 и В2 на конце линии А $1000/800 = 1,25 < 2,5$.

Соотношение первичных токов ТТ В1 и В2 на конце линии Б $1200/1000 = 1,2 < 2,5$.

Рассчитываем базисный ток ДЗЛ:

$$I_{б\text{ ДЗЛ}} = \frac{I_{\text{ТТ ПС А}} + I_{\text{ТТ ПС Б}}}{2} = \frac{1000 + 1200}{2} = 1100 \text{ А.}$$

Выбираем значение $I_{б\text{ ДЗЛ}} = 1100 \text{ А}$.

6.2.2 Выбор базисных (базовых) величин для устройств III архитектуры построения цифровой подстанции

При расчете уставок УРЗ, предназначенных для построения защиты архитектуры III типа следует учитывать, что в их составе отсутствуют узлы преобразования аналоговых сигналов, т.е. отсутствуют такие параметры как коэффициенты трансформации ТН и ТТ. В этом случае роль преобразователей аналоговых сигналов выполняют специальные измерительные устройства (преобразователи аналоговых сигналов - ПАС или цифровые трансформаторы). Информация от измерительных устройств тока и напряжения передается в цифровом виде в первичных величинах согласно протоколу передачи мгновенных значений Sampled Values по стандарту МЭК 61850-9-2 LE. В устройствах защиты, использующих цифровую информацию о первичных токах, напряжениях и сопротивлениях, уставки измерительных органов так же задаются в первичных величинах. Однако, для удобства пользования, имеется возможность задания параметров срабатывания в относительных единицах (о.е.) по отношению к определенным базисным значениям токов и напряжений. Это является некоторым аналогом коэффициентов трансформации традиционных измерительных трансформаторов тока и напряжения. Пересчет уставок в относительные величины производится по формулам:

$$I_{\text{отн}} = \frac{I_{\text{перв}}}{I_{б}}, \text{ о. е.}, \quad (17)$$

$$U_{\text{отн}} = \frac{U_{\text{перв}}}{U_{б}}, \text{ о. е.}, \quad (18)$$

$$Z_{\text{отн}} = \frac{Z_{\text{перв}}}{(U_{б}/I_{б})}, \text{ о. е.}, \quad (19)$$

где $I_{\text{перв}}, U_{\text{перв}}, Z_{\text{перв}}$ – значение токов, напряжений, сопротивлений в первичных величинах, $I_{б}, U_{б}$, – базисное значение токов (А), напряжений (В).

Для цепей тока рекомендуется выбирать $I_{\text{б}} = 1000$ А. При этом значении базисного тока наблюдаемая величина токовых сигналов и уставок по току в о.е. соответствуют величине тока в килоамперах (кА).

Для цепей напряжения рекомендуется выбирать $U_{\text{б}}$ из ряда (5000, 3300, 2200, 1540, 1100, 350, 100, 60, 30) В, в зависимости от класса первичного напряжения (500, 330, 220, 154, 110, 35, 10, 6, 3) кВ. В этом случае номинальное междуфазное напряжение в о.е. соответствует значению 100 о.е., что привычно и удобно при работе с уставками и сигналами, например, при оценке небалансов по симметричным компонентам.

Необходимо учитывать, что диапазоны значений уставок в устройстве заданы в о.е.

Базисный ток, описываемый в данном разделе, является цифровым аналогом физического коэффициента трансформации ТТ. Он не имеет отношения к базисному току ДЗЛ, описанному в разделе 6.1.1

6.2.3 Выбор начального тока срабатывания дифференциальной защиты

Уставку по начальному току срабатывания ДЗЛ $I_{\text{д0}}$ выбирают по нескольким критериям:

- должна быть обеспечена отстройка от небалансов в дифференциальном токе в режиме протекания по линии максимально возможных токов нагрузки;
- должна быть обеспечена надежная работа (с коэффициентом чувствительности не менее 2) при повреждениях на линии с минимально возможными токами КЗ;
- в нагрузочном режиме желательна отстройка от обрыва и одностороннего отключения токовых цепей.

В режиме протекания по линии токов нагрузки в обоих полукомплектах ДЗЛ модули принимаемых с противоположного конца фазных токов должны быть приблизительно равны модулям «своих» фазных токов (в о.е.), а углы отличаться на 180° .

Дополнительными источниками небалансов могут быть ток нагрузки ответвлений, некомпенсированный емкостный ток и несимметричность каналов связи в случае использования для их организации мультиплексоров.

Ток нагрузки ответвлений на линии является дифференциальным током и не может быть скомпенсирован.

Емкостный ток компенсируется включением режима компенсации с корректно заданными параметрами линии по проводимости b_1 , b_0 и полной длине $L_{\text{л}}$. Следует учитывать, что при неисправностях в цепях напряжения ТН происходит автоматическое отключение компенсации емкостного тока в том полукомплекте, где выявлена неисправность. Поэтому при расчете составляющей небаланса, вызванной емкостной проводимостью линии, используется половина емкостного тока, учитывающая неисправность цепей напряжения.

В общем случае в нагрузочном режиме работы ВЛ небаланс в дифференциальном токе с учетом всех составляющих определяется следующим выражением:

$$I_{нб} = \frac{1}{I_b} \cdot \left[(2 \cdot \varepsilon + 2 \cdot \varepsilon_{изм} + \delta_{КС}) \cdot I_{раб\ макс} + \sum I_{отв} + \frac{I_{емк}}{2} \right], \quad (20)$$

где ε – погрешность ТТ: $\varepsilon = 0,01$ – для ТТ класса 5Р, $\varepsilon = 0,03$ – для ТТ класса 10Р,

$I_{раб\ макс}$ – максимальное значение тока в нагрузочном режиме,

$\varepsilon_{изм}$ – небаланс, определяемый погрешностями измерений тока в каждом терминале двух полукомплектов ДЗЛ, $\varepsilon_{изм} = 0,01$,

$\sum I_{отв}$ – суммарный ток нагрузки всех ответвлений, А (в первичных величинах),

$I_{емк}$ – расчетный емкостный ток линии, А (в первичных величинах),

$\delta_{КС}$ – небаланс, вызванный асимметрией мультиплексированного канала связи.

Примечание - $I_{раб\ макс}$ - наибольшее действующее значение переменного тока, который может протекать по оборудованию, не вызывая его повреждения.

Погрешность ε для ТТ класса 5Р и 10Р нормируется при токе равном номинальному. Если величина тока $I_{раб\ макс} > 2I_{ном\ ТТ}$, то погрешность ТТ ε необходимо увеличить в 1,5 раза. В том случае, когда величина тока $I_{раб\ макс} < I_{ном\ ТТ}$, в расчете необходимо принять $I_{раб\ макс} = I_{ном\ ТТ}$.

Емкостный ток линии в симметричном режиме рассчитывается по формуле:

$$I_{емк} = b_1 \cdot L_l \cdot U_{\phi}, \quad (21)$$

где b_1 – удельная поперечная проводимость линии по прямой последовательности, Сим/км,

L_l – длина линии, км,

U_{ϕ} – номинальное фазное напряжение, В.

При включенном режиме компенсации емкостного тока линии составляющая небаланса $I_{емк}$ близка к нулю. При неисправности в цепях напряжения ДЗЛ на одном конце линии эта составляющая небаланса в дифференциальном токе равна $I_{емк}/2$.

Если компенсация емкостного тока в защите не предусматривается, то в формуле (20) слагаемое с емкостным током не нужно делить на 2.

Если значения удельных параметров ВЛ 110 – 220 кВ не заданы, то их можно выбрать по таблице Б.1.

Величина небаланса $\delta_{КС}$ в дифференциальном токе, вызванного асимметрией мультиплексированного канала связи $\Delta t_{КС}$, оценивается по формуле:

$$\delta_{КС} = 2 \cdot \sin\left(\frac{\varphi_{КС}}{2}\right), \quad (22)$$

где $\varphi_{КС}$ – дополнительный сдвиг фаз между измеряемыми токами по концам линии, вызванный асимметрией канала связи, °.

Под асимметрией мультиплексированного канала связи $\Delta t_{КС}$ подразумевается половина разности времени передачи цифровых данных в прямом $t_{(+)}$ и обратном $t_{(-)}$ направлениях:

$$\Delta t_{\text{КС}} = \frac{t_{(+)} - t_{(-)}}{2}. \quad (23)$$

Дополнительный сдвиг фаз между токами плеч ДЗЛ, согласно (6), равен:

$$\varphi_{\text{КС}} = \Delta t_{\text{КС}} \cdot 18 \cdot 10^{-3},$$

где $\Delta t_{\text{КС}}$ - время асимметрии канала связи, мкс.

Небаланс, вызванный несимметричностью времени передачи в канале связи может быть скомпенсирован установкой параметра «время несимметрии КС» в настройках канала связи ведущего терминала после измерения реального времени асимметрии канала связи с использованием сигналов GPS в процессе наладки. Допускается непостоянство асимметрии в пределах 500 мкс при величине постоянной асимметрии не более 2500 мкс. При таком значении непостоянства асимметрии максимально возможный дополнительный сдвиг фаз токов по концам линии не превышает 9° , что соответствует небалансу дифференциального тока $\delta_{\text{КС}} \leq 0,157$ о. е.

При использовании выделенных оптических КС время асимметрии близко к нулю и поэтому принимается $\delta_{\text{КС}} = 0$.

Первым условием выбора уставки по начальному току срабатывания ДЗЛ при отсутствии торможения является отстройка от небалансов в нагрузочном режиме работы линии:

$$I_{\text{Д0}} = \frac{k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{Нб}}}{k_{\text{в}}}, \quad (24)$$

где $k_{\text{отс}}$ – коэффициент отстройки, выбирается из диапазона от 1,5 до 2,0,

$I_{\text{Нб}}$ – ток небаланса,

$k_{\text{в}}$ – коэффициент возврата, принимается равным 0,95.

Уставка по току $I_{\text{Д0}}$ может задаваться в широких пределах, но при этом необходимо в соответствии с пунктом 3.2.21 ПУЭ [5] обеспечить коэффициент чувствительности не менее 2 при повреждении на линии с минимально возможными фазными токами.

Чувствительность ДЗЛ проверяется в минимальном расчетном режиме работы сети, в качестве которого рассматривается режим включения защищаемой линии под напряжение (опробование) с одной из ее питающих сторон, при возникновении повреждения в конце линии.

Коэффициент чувствительности при значениях тормозного тока $I_{\text{т}} < I_{\text{с}}$ рассчитывается по формуле:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{КЗ мин}}}{I_{\text{Д0}} \cdot I_{\text{б ДЗЛ}}}, \quad (25)$$

где $I_{\text{КЗ мин}}$ – минимальный ток в месте КЗ в зоне действия защиты в первичных величинах.

Примечание - $I_{\text{КЗ мин}}$ – ток, протекающий непосредственно в месте КЗ, т.е. это минимальный дифференциальный ток в защите при КЗ в расчетном режиме.

Если коэффициент $k_{\text{ч}} > 2$, то необходимо ограничить значение $k_{\text{ч}}$ до 2,0. В этом случае уставка рассчитывается исходя из минимально возможного фазного тока КЗ при повреждениях в зоне действия ДЗЛ и $k_{\text{ч}} = 2$:

$$I_{\text{д0}} = \frac{I_{\text{КЗ мин}}}{2 \cdot I_{\text{б ДЗЛ}}}. \quad (26)$$

Если при этом выполняется условие:

$$I_{\text{д0}} \geq \frac{1,2 \cdot I_{\text{раб макс}}}{I_{\text{б ДЗЛ}}}, \quad (27)$$

то защита не будет излишне срабатывать в нагрузочном режиме при обрыве цепей тока в одном из полуккомплектов.

Действие ДЗЛ на отключение при значениях тормозного тока $I_{\text{T}} > I_{\text{S1}}$ происходит при превышении величины дифференциального тока $I_{\text{д}}$ пороговой величины $k_{\text{тэ}} \cdot I_{\text{T}}$. Поэтому коэффициент чувствительности ДЗЛ при работе на наклонных частях характеристики срабатывания (рисунок 12) до величины тормозного тока $I_{\text{T}} = I_{\text{T отс}}$ определяется отношением:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{д}}}{k_{\text{тэ}} \cdot I_{\text{T}}}. \quad (28)$$

При КЗ в зоне для характеристики блокирования ДЗЛ типа «кардиоида» при условии совпадения фаз токов по концам линии $I_{\text{д}} = I_{\text{T}}$ и $k_{\text{ч}} = 1/k_{\text{тэ}}$. Для характеристики блокирования ДЗЛ типа «окружность» $I_{\text{д}} \geq I_{\text{T}}$ и $k_{\text{ч}} \geq 1/k_{\text{тэ}}$.

6.2.4 Выбор уставок дифференциальной токовой отсечки

В ДЗЛ предусмотрена дифференциальная токовая отсечка ДТО на основе трех ПО, сравнивающих величины дифференциальных фазных токов $I_{\text{д}}$ с порогом $I_{\text{д отс}}$. Фазные ПО объединены по схеме «ИЛИ». Срабатывание ПО происходит при превышении модулем дифференциального тока заданного порога $I_{\text{д}} \geq I_{\text{д отс}}$.

Порог срабатывания ДТО регулируется в пределах от 2,0 до 40,0 о.е. ДТО действует на отключение с выдержкой времени, регулируемой в диапазоне от 0,0 до 2,0 с.

Ток срабатывания ДТО определяется по выражению:

$$I_{\text{д отс}} = \frac{k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{нб КЗ внеш макс}}}{I_{\text{б ДЗЛ}}}, \quad (29)$$

где $k_{\text{отс}}$ – коэффициент отстройки, выбирается из диапазона от 1,5 до 2,0,

$I_{\text{нб КЗ внеш макс}}$ – ток небаланса при внешнем повреждении с максимальным током КЗ.

В устройстве ДЗЛ дифференциальные и тормозные величины вычисляются на основе векторов токов, полученных в результате цифровой фильтрации с выделением основной

гармоники сигналов. При насыщении ТТ происходит относительное уменьшение модуля вектора вторичной величины сигнала I_2 по отношению к первичному току I_1 (с учетом коэффициента трансформации идеального ТТ – $n_{\text{НОМ}}$). Одновременно возникает фазовый сдвиг φ_s вектора вторичной величины сигнала относительно вектора первичного тока. Коэффициент искажения формы тока k_s по первой гармонике сигнала показывает во сколько раз модуль вектора вторичного тока при наличии насыщения ТТ меньше модуля неискаженного вектора тока (при отсутствии насыщения):

$$k_s = \frac{I_1}{n_{\text{НОМ}} \cdot I_2}. \quad (30)$$

На рисунке 9 максимальный коэффициент искажений равен 3,6, а на рисунке 10 – 5,3.

Значение тока небаланса в выражении (29) можно определить исходя из коэффициента искажения формы тока k_s при насыщении ТТ одного из полукомплектов ДЗЛ и из конкретного фазового сдвига между первичным и вторичным током ТТ – $\Delta\varphi_s$:

$$I_{\text{Нб КЗ внеш макс}} = I_{\text{КЗ внеш макс}} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{k_s} \cdot \left(\frac{1}{k_s} - 2 \cdot \cos(\Delta\varphi_s) \right)}, \quad (31)$$

где $I_{\text{КЗ внеш макс}}$ – максимальный ток, протекающий через ТТ при внешнем КЗ.

Коэффициент k_s и фазовый сдвиг $\Delta\varphi_s$ для ДТО определяется в зависимости от постоянной времени первичной сети, максимального тока внешнего КЗ и фактической вторичной нагрузки (в относительных единицах) по рисункам 16 а - 18 а.

Кратность тока $I_{\text{КЗ}}^*$ определяется по выражению:

$$I_{\text{КЗ}}^* = \frac{I_{\text{КЗ внеш макс}}}{I_{\text{НОМ ТТ}}}, \quad (32)$$

где $I_{\text{НОМ ТТ}}$ – номинальный ток рассматриваемого ТТ.

Уставка по току срабатывания ДТО не должна быть меньше двух номиналов ТТ.

При наличии на линии ответвления также необходимо проверить условие отстройки ДТО от броска тока намагничивания (БТН) силовых трансформаторов, установленных на ответвлениях. :

$$I_{\text{д отс}} = \frac{k_{\text{отс}} \cdot k_{\text{БТН}} \cdot I_{\text{НОМ}}}{I_{\text{б ДЗЛ}}}, \quad (33)$$

где $k_{\text{отс}}$ – коэффициент отстройки, принимается равным от 1,5 до 2,0;

$k_{\text{БТН}} = I_{\text{БТН}}/I_{\text{НОМ}}$ – кратность броска тока намагничивания;

$I_{\text{НОМ}}$ – номинальный ток силовых трансформаторов ответвлений.

где $I_{БТН}$ – максимальное значение броска тока намагничивания, которое рассчитывается согласно методике, приводимой в [4] (Приложение Е).

6.2.5 Определение параметров характеристики срабатывания ДЗЛ

В соответствии с пунктом 3.2.21 ПУЭ [5], необходимо обеспечить коэффициент чувствительности дифференциальной защиты $k_{\text{ч}} \geq 2$ при наличии тормозной величины. Указанное требование выполняется, если выбрать величину коэффициента торможения в выражении (15) $k_{\text{ТЭ}} \leq 0,5$.

Предлагается на участке $[I_{S1}, I_{S2}]$ тормозной характеристики принять фиксированное значение коэффициента торможения равным $k_{\text{ТЭ}} = k_{\text{Т1}} = 0,5$, обеспечивая тем самым выполнение требований ПУЭ.

Далее, следует определить величину тока I_{S2} , при которой значение выбранного коэффициента $k_{\text{ТЭ}}$ недостаточно для надежной отстройки от небалансов, вызванных насыщением ТТ с определенной нагрузкой во вторичной цепи.

В режиме внешнего повреждения при насыщении ТТ на одном конце линии в зависимости от степени насыщения ТТ (или от величины коэффициента искажения вторичного тока k_s) значение тормозной величины во вторичных величинах тока уменьшается по сравнению с тормозной величиной в первичных величинах. Одновременно при насыщении одного ТТ появляется отклонение сдвига фаз токов по концам линии от 180° . Относительное уменьшение модуля одного из токов и указанный дополнительный фазовый сдвиг приводят к уменьшению реальной тормозной величины и увеличению дифференциального тока (небаланса).

Выбор величины уставки I_{S2} сводится к определению максимального тока внешнего КЗ, при котором обеспечивается превышение тормозной величиной тока небаланса в дифференциальном токе не менее чем в 1,2 раза при значении коэффициента торможения $k_{\text{ТЭ}} = k_{\text{Т1}} = 0,5$.

Примечание - если при расчете гипотетическая точка начала второго наклонного участка располагается выше границы характеристики срабатывания ДТО (что определяется точкой с координатами $(I_{\text{Т отс}}; I_{\text{Д отс}})$ рисунок 12), то характеристика срабатывания будет иметь один наклонный участок. Второй наклонный участок остается за пределами характеристики срабатывания ДТО. Значение уставки I_{S2} следует оставлять по умолчанию. Коэффициенты торможения обоих наклонных участков выбираются одинаковыми $k_{\text{Т2}} = k_{\text{Т1}}$.

Следует отметить, что закон изменения тормозной величины зависит от используемого принципа торможения, что и отражено в номограммах на рисунке 20. На рисунке 20 величины, отложенные по осям абсцисс и ординат: $k_{s\text{д}}$ – коэффициент искажения дифференциального тока, $k_{s\text{т}}$ – коэффициент искажения тормозного тока.

Задав значение тока КЗ I_{K3i}^* (в относительных единицах от номинального тока ТТ), постоянную времени затухания апериодической составляющей, вторичную нагрузку ТТ, по кривым на рисунках 16 - 18 определить величину коэффициента искажения вторичного тока k_s и максимальное отклонение угла $\Delta\phi_s$ между векторами первичного и вторичного тока ТТ.

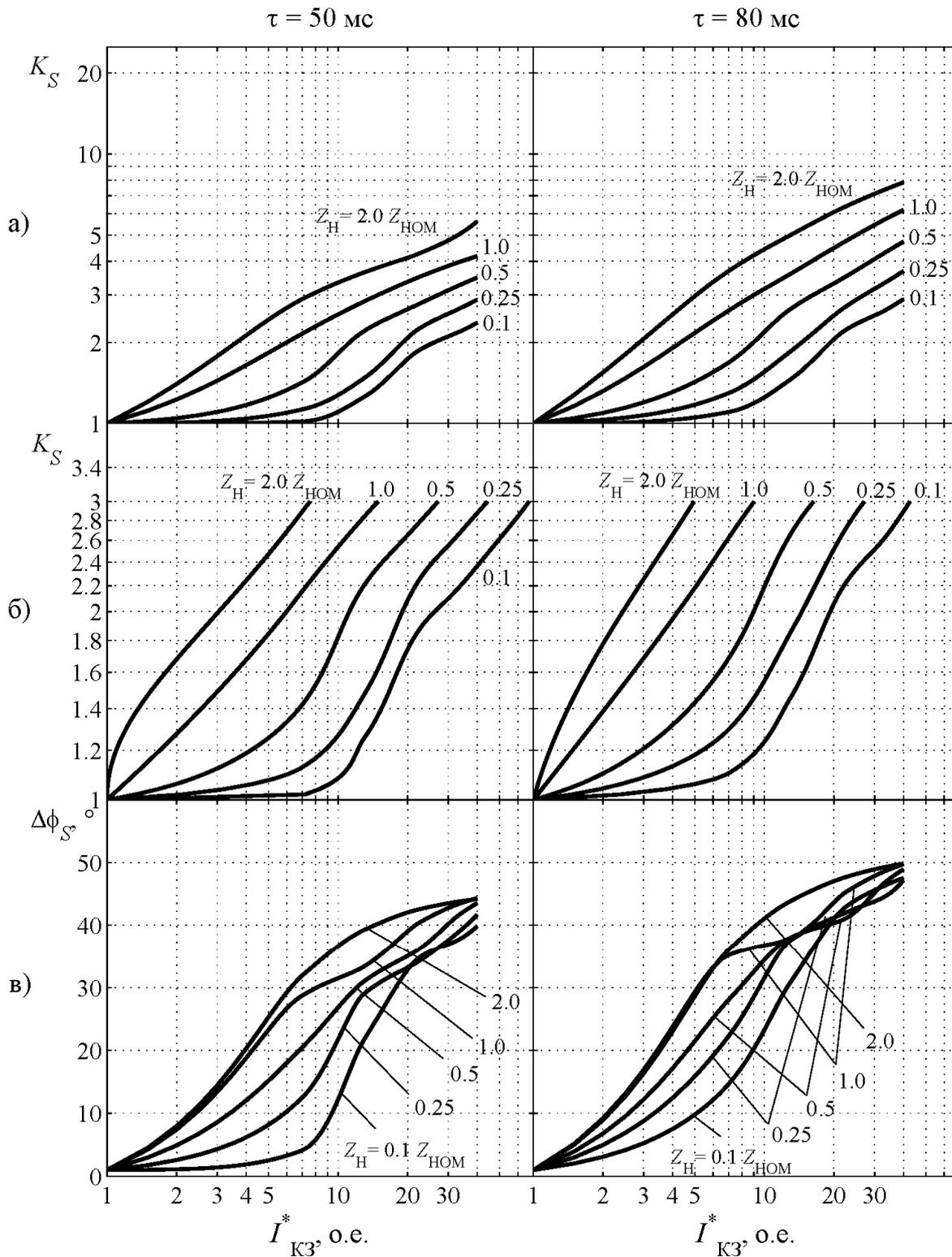


Рис. 16 – Зависимость коэффициента искажения k_s - а), б) и отклонения угла $\Delta\phi_s$ – в) между векторами первичного и вторичного тока ТТ от тока КЗ для разных значений постоянной времени ($\tau = 50$ мс и 80 мс) и вторичной нагрузки ТТ при $\cos(\varphi) = 0,8$

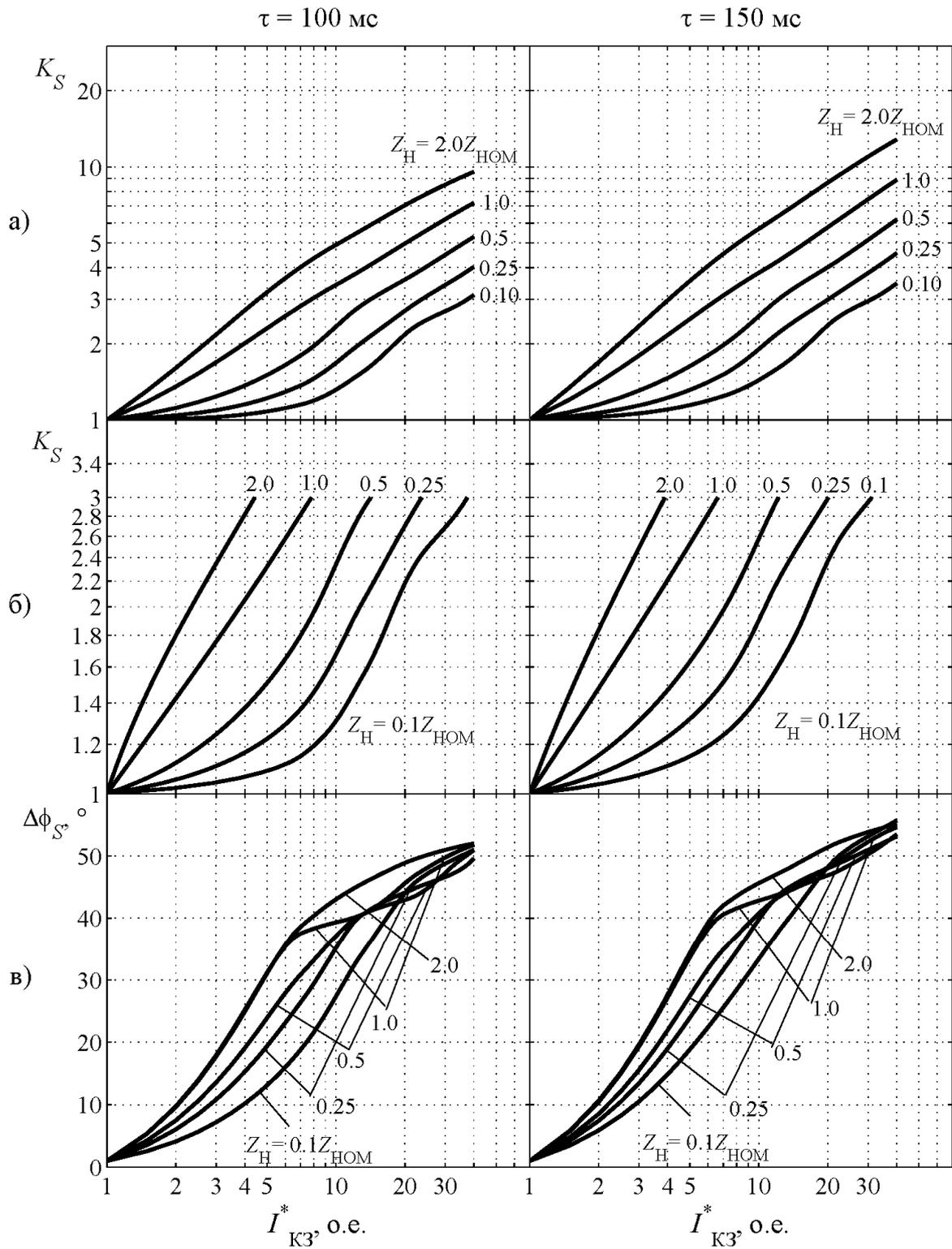


Рис. 17 – Зависимость коэффициента искажения k_s - а), б) и отклонения угла $\Delta\phi_s$ – в) между векторами первичного и вторичного тока ТТ от тока КЗ для разных значений постоянной времени ($\tau = 100$ мс и 150 мс) и вторичной нагрузки ТТ при $\cos(\varphi) = 0,8$

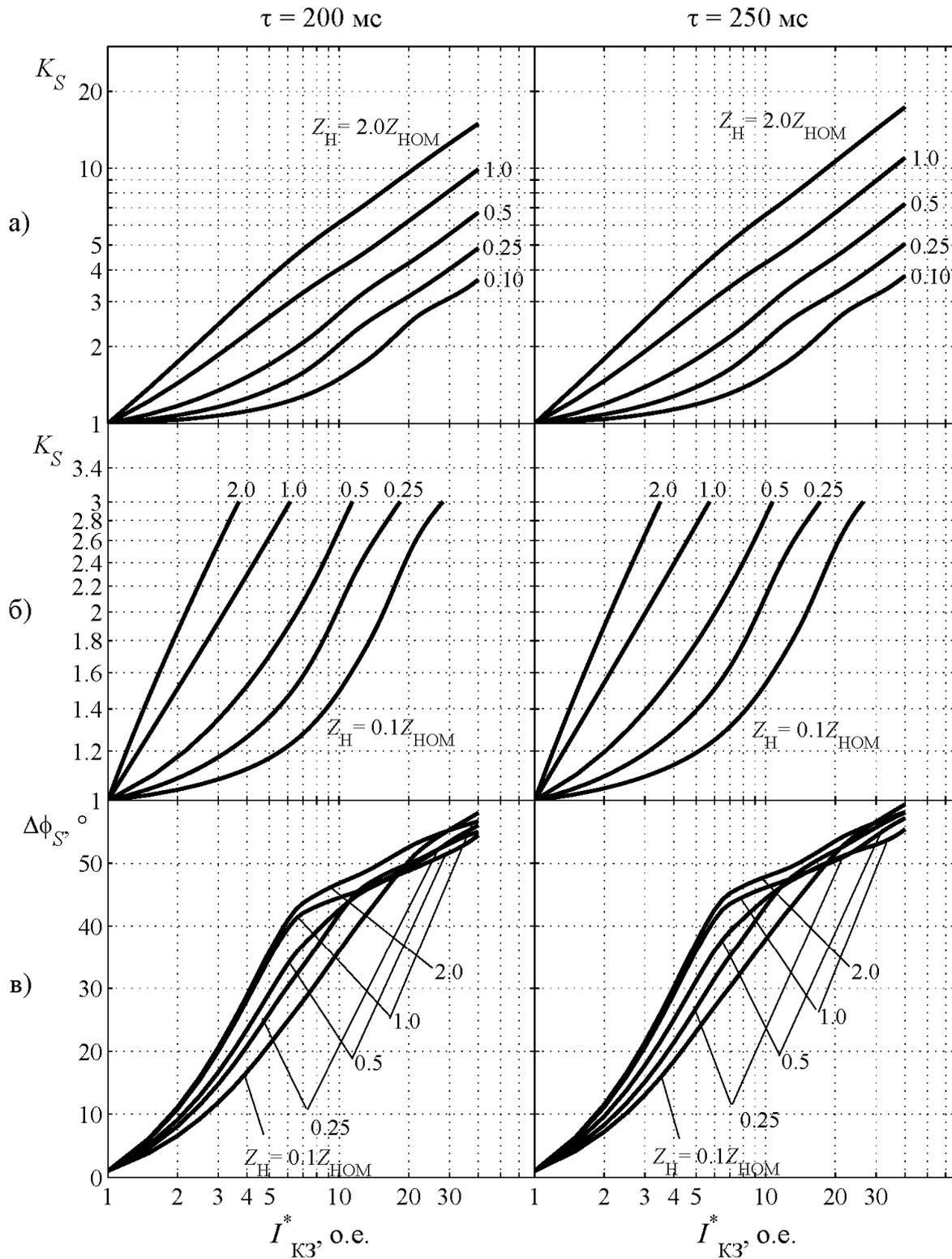


Рис. 18 – Зависимость коэффициента искажения k_s - а), б) и отклонения угла $\Delta\phi_s$ – в) между векторами первичного и вторичного тока ТТ от тока КЗ для разных значений постоянной времени ($\tau = 200$ мс и 250 мс) и вторичной нагрузки ТТ при $\cos(\varphi) = 0,8$

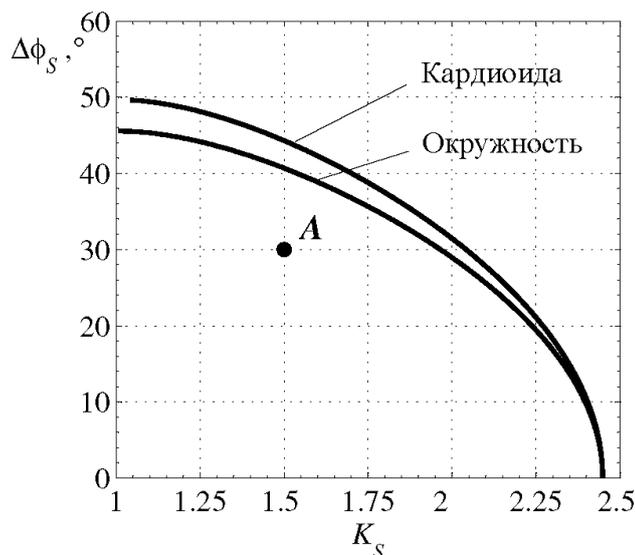


Рис. 19 – Зависимость предельного максимального отклонения угла $\Delta\phi$ между векторами первичного и вторичного тока ТТ в зависимости от коэффициента искажения k_s при значении коэффициента торможения $k_{T1} = 0,5/1,2 = 0,417$.

По сетке номограмм (рисунок 20) следует определить, находится ли полученное значение k_s и максимальное отклонение угла $\Delta\phi_s$ ниже линии, соответствующей коэффициенту торможения $k_{T1} = 0,5/1,2 = 0,417$. При этом дополнительно необходимо проверить, не превышает ли значение угла $\Delta\phi$ его предельного значения по рисунку 19. Точка с координатами $A(k_s; \Delta\phi_s)$, определенная по рисункам 16 - 18, должна лежать ниже кривой, изображенной на рисунке 19.

Если указанное условие не выполняется, то повторить расчет несколько раз, каждый раз увеличивая (уменьшая) значения тока КЗ. Определить значение тока КЗ, при котором получаемые значения k_s и максимального отклонение угла $\Delta\phi$ между векторами первичного и вторичного тока ТТ находятся наиболее близко к линии $k_T = 0,417$ (рисунок 20). Полученное значение тока КЗ I_{K3i}^* необходимо использовать для определения величины уставки I_{S2} .

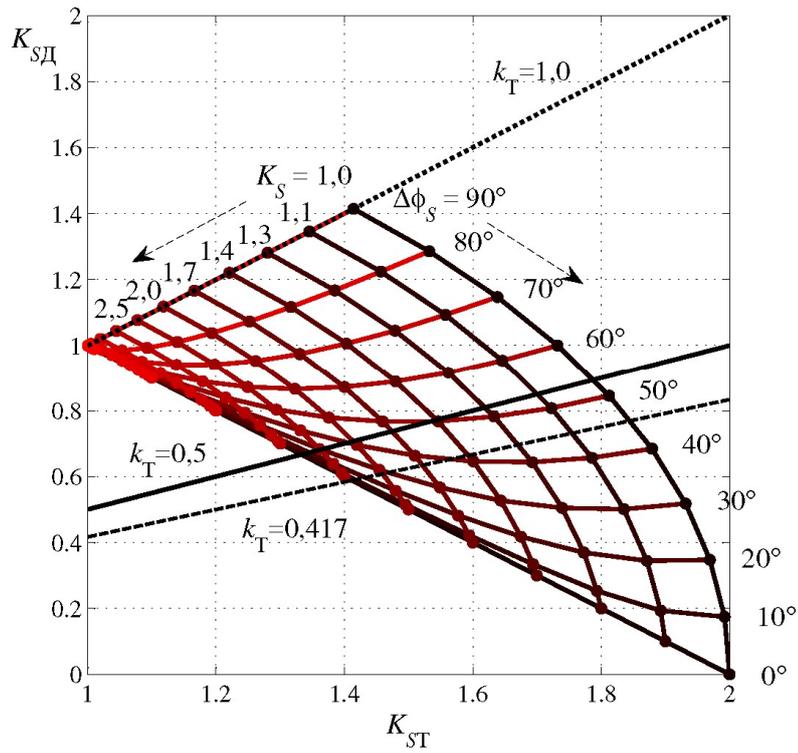
Далее по номограммам рисунка 20 определяется коэффициент искажения тормозного тока k_{ST} и рассчитывается значение уставки I_{S2} :

$$I_{S2} = \frac{k_{ST} \cdot I_{K3i}^* \cdot I_{ном\ ТТ}}{I_{б\ ДЗЛ}}, \quad (34)$$

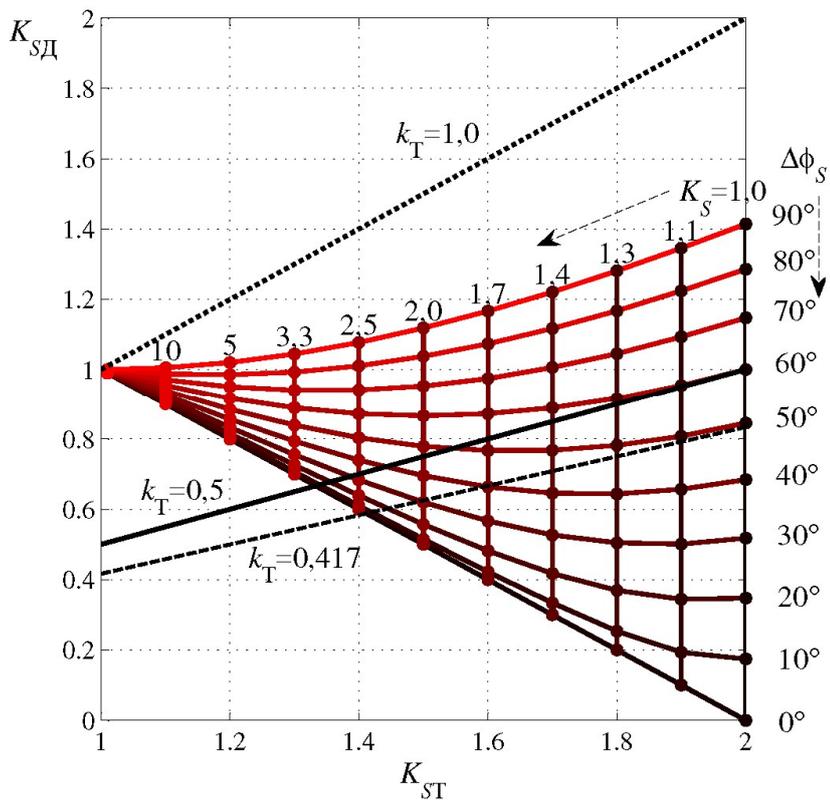
где k_{ST} – коэффициент искажения тормозного тока,

I_{K3i}^* – кратность тока внешнего КЗ, в относительных единицах, для которого определено значение k_s по рисункам 16 - 18,

$I_{ном\ ТТ}$ – номинальный ток рассматриваемого ТТ.



а)



б)

Рис. 20 – Номограммы искажения дифференциальной и тормозной величин

а) торможение от разности векторов токов

б) торможение от суммы модулей токов

Для характеристики типа «кардиоида» коэффициент искажения тормозного тока k_{sT} может быть определен по формуле:

$$k_{sT} = 1 + \frac{1}{k_s}. \quad (35)$$

Для характеристики типа «окружность» коэффициент искажения тормозного тока имеет более сложную зависимость и может быть определен по формуле:

$$k_{sT} = \sqrt{1 + \frac{1}{k_s} \cdot \left(\frac{1}{k_s} + 2 \cdot \cos(\Delta\varphi_s) \right)}. \quad (36)$$

Величина коэффициента торможения k_{T2} выбирается исходя из условия, что при токе внешнего КЗ, соответствующего тормозному току $I_{T\text{отс}}$ (рисунок 12), значение эквивалентного коэффициента торможения $k_{T3\text{отс}}$ должно обеспечивать отстройку от излишних срабатываний ДЗЛ при насыщении ТТ. В тоже время, от величины коэффициента $k_{T3\text{отс}}$ зависит коэффициент чувствительности при данном токе внутреннего КЗ.

Ограничение диапазона возможных значений $k_{T3\text{отс}} = (0,65 \dots 0,9)$ обеспечивает срабатывание ДЗЛ при неуспешном опробовании ВЛ (включение на КЗ) при любых значениях токов КЗ (рисунок 12) с гарантированным коэффициентом чувствительности от 2,0 до (1,11 ... 1,54) при значении тормозной величины больше чем I_{S2} .

Минимальное значение коэффициента $k_{T3\text{отс}}$ для отстройки от внешних КЗ определяется по кривым на рисунке 21, исходя из значений k_s и $\Delta\varphi_s$, определенных для ДТО по небалансу при максимальном токе внешнего КЗ $I_{\text{нб КЗ внеш макс}}$. Коэффициент k_s искажения и фазовый сдвиг $\Delta\varphi_s$ для ДТО определяется в зависимости от постоянной времени первичной сети и максимального тока внешнего КЗ (в относительных единицах) по рисункам 16 а - 18 а.

Для данных значений k_s и $\Delta\varphi_s$ определяем значение $k_{T3\text{отс}}$, для чего на рисунке 21 выбираем ближайшую зависимость, охватывающую точку с координатами $(k_s, \Delta\varphi_s)$.

Коэффициент торможения k_{T2} выбирается из диапазона от 0,3 до 3,0 о.е. и может быть рассчитан по формуле:

$$k_{T2} = \frac{k_{T3\text{отс}} - k_{T1} \frac{I_{S2}}{I_{T\text{отс}}}}{1 - \frac{I_{S2}}{I_{T\text{отс}}}}, \quad (37)$$

где $I_{T\text{отс}}$ – предельный тормозной ток, определяемый по формуле:

$$I_{T\text{отс}} = \frac{I_{\text{дотс}}}{k_{T3\text{отс}}}. \quad (38)$$

В случае, если защита находится в хороших условиях с точки зрения режимов КЗ (небольшие кратности токов КЗ, малые апериодические и т.п.), коэффициент торможения допускается принимать из диапазона $k_{T1} = (0,3 - 0,5)$.

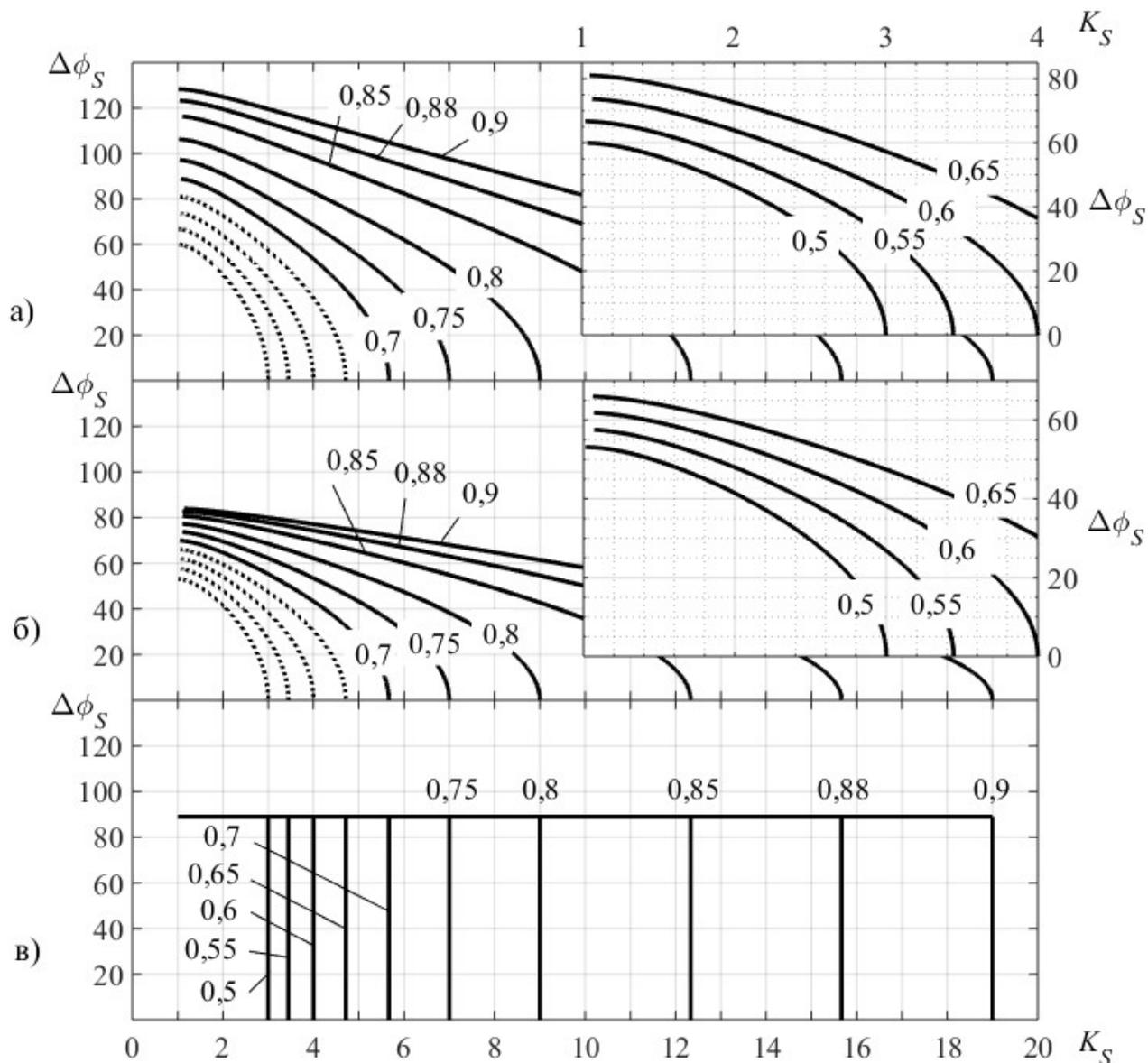


Рис. 21 – Взаимосвязь между максимумом отношения токов по концам защищаемой линии и предельным углом между ними, при котором происходит блокирование ДЗЛ, для характеристики:

а – «кардиоида», б – «окружность», в – «сектор»

Возможно производить проверку и уточнение расчета параметров характеристики срабатывания ДЗЛ при помощи программного симулятора (Симулятор ДЗЛ. Руководство пользователя. ЭКРА.00088-01 90 01). Программный расчет позволяет в ряде случаев повысить чувствительность на 20-30 %.

6.2.6 Особенности расчета дифференциальной защиты трехконцевой линии

Выбор базисного тока ДЗЛ

Для трехконцевой линии (рисунок 22) базисный ток рекомендуется выбирать как среднее арифметическое значение между номинальными первичными токами ТТ $I_{ТТ\text{ ном А}}$, $I_{ТТ\text{ ном Б}}$ и $I_{ТТ\text{ ном В}}$:

$$I_{б\text{ ДЗЛ}} = (I_{ТТ\text{ ном А}} + I_{ТТ\text{ ном Б}} + I_{ТТ\text{ ном В}})/3. \quad (39)$$

Также возможно задание базисного тока из диапазона значений от минимального из номинальных токов ТТ до максимального из номинальных токов ТТ, установленных на подстанциях А, Б и В.

В первичных величинах базисный ток должен задаваться одинаковым для всех комплектов.

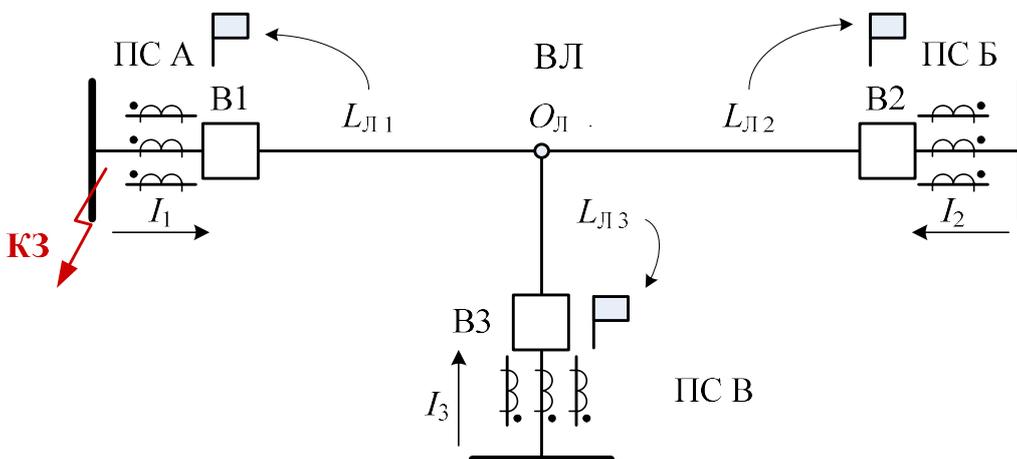


Рис. 22 – Схема подключения ДЗЛ к ТТ

Первичные номинальные токи ТТ по всем трем концам линии также не должны отличаться более чем в 2,5 раза.

Расчет начального тока срабатывания ДЗЛ

Уставку по начальному току срабатывания ДЗЛ $I_{д0}$ для трехконцевой линии выбирают по критериям аналогичным для двухконцевой линии:

- должна быть обеспечена отстройка от небалансов в дифференциальном токе в режиме протекания по линии максимально возможных токов нагрузки;
- должна быть обеспечена надежная работа (с коэффициентом чувствительности не менее 2) при повреждениях на линии с минимально возможными фазными токами КЗ;
- в нагрузочном режиме желательна отстройка от обрыва и одностороннего отключения токовых цепей.

Источниками небалансов в дифференциальном токе являются: погрешности трансформаторов тока, ток нагрузки пассивных ответвлений, емкостный ток линии и фазовый

сдвиг токов, определяемый несимметричностью каналов связи в случае использования для их организации мультиплексов.

Ток нагрузки ответвлений на линии является дифференциальным током и не может быть скомпенсирован.

Составляющая небаланса в дифференциальном токе, определяемая емкостным током трехконцевой линии в нагрузочном режиме и при внешних КЗ, в устройстве исключается включением режима компенсации емкостного тока и заданием параметров линии по удельной проводимости b_1 , b_0 и длине $L_{л}$ участка линии от места установки защиты до точки разветвления $O_{л}$ (рисунок 22). Режим компенсации емкостного тока устанавливается с помощью программной накладки «Компенсация емкостного тока», которая в устройствах ДЗЛ серии 400 имеет идентификатор 101261.

При неисправностях в цепях напряжения измерительных ТН происходит автоматическое отключение компенсации емкостного тока в том комплекте, где выявлена неисправность. В этом случае, при неисправности цепей напряжения на ПС, максимально удаленной от точки разветвления, величина небаланса увеличивается на величину емкостного тока участка линии с максимальной длиной.

Фазный емкостный ток участка линии с максимальной длиной до точки разветвления, в симметричном режиме, рассчитывается по формуле:

$$I_{\text{емк макс}} = b_1 \cdot L_{л \text{ макс}} \cdot U_{\phi}, \quad (40)$$

где b_1 , Сим/км – удельная поперечная проводимость линии по ПП в первичных величинах, $L_{л \text{ макс}}$, км – длина наибольшего по протяженности участка линии – $\max(L_{л1}, L_{л2}, L_{л3})$, в соответствии с рисунком 22.

U_{ϕ} , В – номинальное фазное напряжение в первичных величинах.

Если режим компенсации емкостного тока в ДЗЛ не используется, то соответствующая составляющая небаланса, при одинаковой удельной проводимости всех трех участков, определяется суммой емкостных токов всех участков линии:

$$I_{\text{емк макс}} = b_1 \cdot (L_{л1} + L_{л2} + L_{л3}) \cdot U_{\phi}. \quad (41)$$

В общем случае для трехконцевой линии в нагрузочном режиме ее работы небаланс в дифференциальном токе с учетом всех составляющих определяется следующим выражением:

$$I_{\text{нб}} = \frac{1}{I_{б \text{ ДЗЛ}}} \cdot \left[(3 \cdot \varepsilon + 3 \cdot \varepsilon_{\text{изм}} + 2 \cdot \delta_{\text{КС}}) \cdot I_{\text{раб макс}} + I_{\text{емк макс}} + \sum I_{\text{отв}} \right], \quad (42)$$

в остальном обозначения в формуле (42) такие же, как в формуле (20).

Первым условием выбора уставки по начальному току срабатывания ДЗЛ при отсутствии торможения является отстройка от небалансов в нагрузочном режиме работы линии:

$$I_{д0} = \frac{k_{отс} \cdot I_{нб}}{k_{в}}, \quad (43)$$

где $k_{отс}$ – коэффициент отстройки, выбирается из диапазона от 1,5 до 2,0,
 $I_{нб}$ – ток небаланса, рассчитанный по формуле (42)
 $k_{в}$ – коэффициент возврата, принимается равным 0,95.

Уставка по току $I_{д0}$ может задаваться в широких пределах, но при этом необходимо в соответствии с пунктом 3.2.21 ПУЭ [5] обеспечить коэффициент чувствительности не менее двух при повреждении на линии с минимально возможными фазными токами.

Коэффициент чувствительности ДЗЛ проверяется по формуле:

$$k_{ч} = \frac{I_{КЗ\ мин}}{I_{д0} \cdot I_{б\ ДЗЛ}}, \quad (44)$$

где $I_{КЗ\ мин}$ – минимальный ток в месте КЗ в зоне действия защиты в первичных величинах.
 Если коэффициент $k_{ч} > 2$, то необходимо ограничить значение $k_{ч} = 2$. В этом случае уставка рассчитывается по (26). Также, если при этом выполняется условие (27), защита не будет излишне срабатывать при обрыве цепей тока в одном из комплектов.

Расчет параметров характеристики срабатывания ДЗЛ

Расчет параметров характеристики срабатывания для трехконцевой линии (рисунок 22) аналогичен расчету параметров ДЗЛ для двухконцевой линии.

Особенность заключается в рассмотрении нескольких расчетных схем, когда один из выключателей выключен. Следует выбрать наиболее опасный режим с точки зрения работы ТТ и произвести расчеты для этого режима, как это делается для двухконцевой линии.

Например, в расчетном режиме максимальный ток внешнего КЗ протекает через выключатель В1. Далее следует рассмотреть два режима:

- В1, В2 – включены, В3 – выключен,
- В1, В3 – включены, В2 – выключен.

В обоих случаях весь ток внешнего КЗ протекает через один выключатель В2 (В3), а не разветвляется между ними, как в полной схеме. Поэтому один из этих расчетных режимов будет наиболее тяжелым.

6.2.7 Расчет сопротивления нагрузки ТТ

Нагрузкой для ТТ являются: сопротивление соединительного контрольного кабеля и сопротивления аналоговых входов устройств, подключенных к ТТ. Схема подключения УРЗ к ТТ приведена на рисунке 23. На рисунке соединительный кабель показан в виде эквивалентного сопротивления $R_{пр}$.

Действительная нагрузка на трансформаторы чаще всего отличается от принятой в проекте. Это объясняется неточностью проектных данных о длинах кабелей, неопределенностью расчетного значения переходных сопротивлений в контактах, приблизительной оценкой значения сопротивления реле и проводов на панелях и т.д.

В паспортных данных на каждый тип трансформатора тока указана номинальная мощность, соответствующая максимальной нагрузке вторичной цепи ТТ, при которой обеспечивается класс точности ТТ при заданной предельной кратности тока КЗ. Если нагрузка вторичных цепей выше максимально допустимой, то предельная кратность работы ТТ уменьшается.

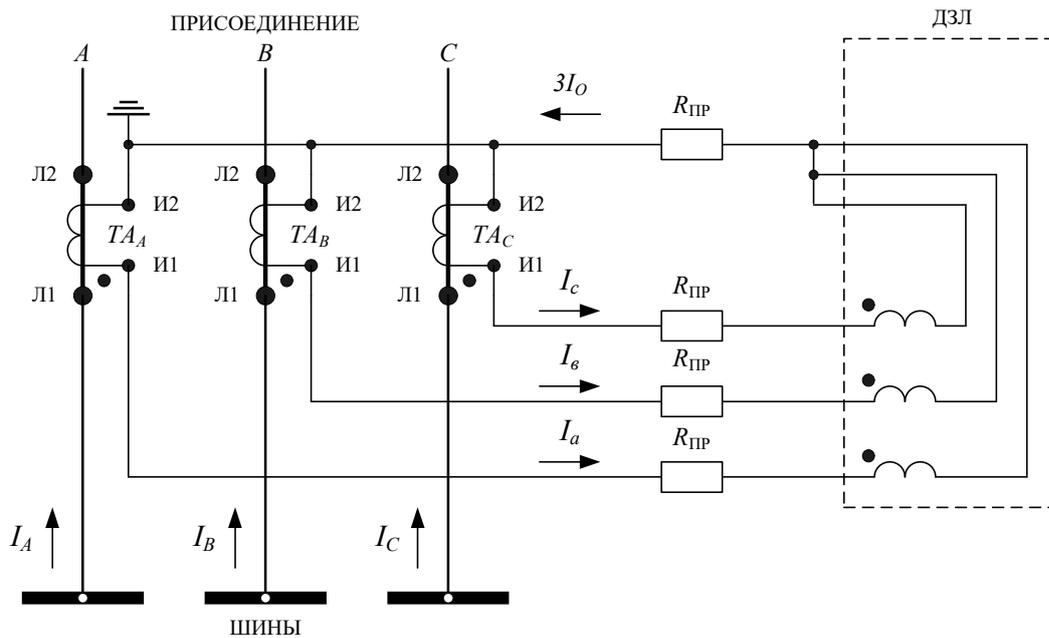


Рисунок 23 – Схема подключения ДЗЛ к ТТ

Для определения нагрузки вторичных цепей ТТ производится ее экспериментальное измерение или расчет. Обычно производят расчет нагрузки. Если расчеты показывают нагрузку на ТТ близкую к максимальной, необходимо подтверждение параметров вторичных цепей ТТ экспериментальным измерением на объекте.

Методика измерения сопротивления нагрузки вторичных цепей измерительного ТТ приведена в РД 153-34.0-35.301-2002 [8].

Величина вторичной нагрузки ТТ зависит от схемы соединения вторичных цепей ТТ, схемы включения нагрузки и от вида короткого замыкания. Для наиболее распространенной схемы звезда (рисунок 23) при трехфазном коротком замыкании ток в нулевом проводе ТТ равен нулю и величина вторичной нагрузки каждой фазы определяется сопротивлением соединительного контрольного кабеля, суммарным сопротивлением подключенных устройств РЗ и суммарным сопротивлением контактных соединений:

$$R_{\text{н}} = R_{\text{пр}} + \sum_i R_{i \text{ урз}} + \sum_j R_{j \text{ к}}. \quad (45)$$

где: $R_{\text{пр}}$ – сопротивление соединительного контрольного кабеля,
 $\sum_i R_{i \text{ урз}}$ – суммарное сопротивление аналоговых входов устройств,
 $\sum_j R_{j \text{ к}}$ – суммарное сопротивление всех контактных соединений петли.

Сопротивление кабеля определяется по формуле:

$$R_{\text{пр}} = \rho \frac{l}{s}, \quad (46)$$

где ρ – удельное сопротивление материала, $\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$. Для меди $\rho = 0,017$,

l – длина кабеля, м,

s – поперечное сечение жилы, мм^2 .

При двухфазном коротком замыкании ток последовательно обтекает две фазы, ток в нулевом проводе ТТ равен нулю, величина вторичной нагрузки каждой фазы также определяется по (45).

При однофазном коротком замыкании вторичный ток поврежденной фазы замыкается по фазному и нулевому проводу и величина вторичной нагрузки определяется:

$$R_{\text{н}} = 2R_{\text{пр}} + \sum_i R_{i \text{ урз}} + \sum_j R_{j \text{ к}}. \quad (47)$$

Сопротивление соединительного контрольного кабеля определяется исходя из его длины, материала и поперечного сечения жил.

Сопротивление аналогового входа устройств ШЭ2607 09х составляет 0,1 Ом. Однако предпочтительнее будет непосредственное измерение входного сопротивления аналогового входа защиты, а так же сопротивлений всех устройств находящихся во вторичной цепи ТТ.

Контактные соединения цепей ТТ на объекте должны отвечать требованиям ГОСТ 10434-82 [10] и ГОСТ 21242-75 [11]. Измерение значений контактных сопротивлений производится согласно ГОСТ 17441-84 [12].

Если при расчетах, на практике, определение этих значений невозможно, то суммарное сопротивление контактных соединений можно выбрать в пределах 0,05 ... 0,5 Ом [17].

Пример

Для вторичных цепей ТТ ТВ-110 кВ используется контрольный соединительный кабель КВВГЭнг-LS с медными жилами сечением $2,5 \text{ мм}^2$. Определить полное сопротивление нагрузки вторичной цепи для схемы на рисунке 23 для случая однофазного КЗ, если длина кабеля составляет 300 м.

Решение

Так как к трансформатору подключены 10 терминалов, то по таблице 1 суммарное сопротивление составит

$$Z_{\text{урз}} = 1 \text{ Ом}.$$

Суммарное сопротивление контактных соединений выберем равным 1,5 Ом.

Сопротивление одной жилы кабеля

$$R_{\text{пр}} = \rho \frac{l}{S} = 0,017 \cdot \frac{300}{2,5} = 2,04 \text{ Ом.}$$

Полное сопротивление нагрузки по формуле (45) составит:

$$Z_{\text{н}} = 2 \cdot 2,04 + 1 + 1,5 = 6,58 \text{ Ом,}$$

Что меньше сопротивления трансформатора мощностью 25 МВА:

$$6,58 \text{ Ом} < 56 \text{ Ом.}$$

6.2.8 Выбор уставок органа контроля цепей тока

В ДЗЛ предусмотрен контроль исправности цепей переменного тока. Построен на основе трех ПО, сравнивающих величины дифференциальных фазных токов $I_{\text{д}}$ с порогом $I_{\text{д кцт уст}}$. Фазные ПО объединены по схеме «ИЛИ». Срабатывание ПО контроля токовых цепей происходит при превышении модулем дифференциального тока заданного порога:

$$I_{\text{д}} \geq I_{\text{д кцт уст}} \quad (48)$$

Порог срабатывания регулируется в пределах от 0,04 до 2,0 о.е. При обрыве токовой цепи срабатывает ПО контроля токовых цепей и с выдержкой времени, регулируемой в диапазоне от 0,05 до 27,0 с, фиксируется логический сигнал «Обрыв цепей тока». Обычно сигнал действует только на цепи сигнализации, но может быть программно подключен для действия на любые другие цепи.

Уставка ПО контроля токовых цепей выбирается исходя из максимальной величины расчетного небаланса в дифференциальном токе:

$$I_{\text{д кцт уст}} = k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{нб}} \quad (49)$$

где $k_{\text{отс}}$ – коэффициент отстройки, принимается равным 1,1 – 1,3,

$I_{\text{нб}}$ – ток небаланса, рассчитывается по выражению (20).

Уставка по времени срабатывания **[101323] DT3_ДЗЛ Задержка сраб. контроля обрыва цепей тока** выбирается исходя из длительности протекания тока КЗ. Ее необходимо согласовать со временем отключения КЗ:

$$t_{\text{кцт уст}} \geq t_{\text{КЗ макс}} \quad (50)$$

где $t_{\text{КЗ макс}}$ – максимальное время отключения КЗ.

6.2.9 Выбор уставок по времени

6.2.9.1 Выбор выдержек времени на срабатывание ДЗЛ [101321] DT1_ДЗЛ и ДТО [101322] DT2_ДЗЛ

В подавляющем большинстве случаев, действие защиты на отключение идет без дополнительной задержки. Установка задержки на срабатывание ДЗЛ и/или ДТО необходима в случае, когда имеются специальные дополнительные требования.

К таким требованиям может относиться исключение срабатывания ДЗЛ при внешних КЗ в случае, когда возможно насыщение ТТ. Выдержка времени может выбираться в процессе анализа работы ДЗЛ в программном симуляторе (Симулятор ДЗЛ. Руководство пользователя. ЭКРА.00088-01 90 01). Вводимая выдержка времени должна быть согласована с условиями устойчивости энергосистемы.

Также, к таким требованиям может относиться, например, необходимость отстройки от быстродействующих основных защит трансформаторов. При КЗ на выводах ВН трансформатора, присоединенного к ответвлению защищаемой ВЛ, практически одновременно срабатывают основная защита трансформатора и ДЗЛ. Возможна ситуация, когда отключение линии от ДЗЛ произойдет быстрее, чем основная защита трансформатора подействует на отключение выключателя на стороне ВН (или на включение короткозамыкателя на стороне ВН при использовании ОД-КЗ) и подача напряжения по команде от устройства АПВ произойдет на оставшийся включенным поврежденный трансформатор. В этом случае целесообразно ввести замедление действия ДЗЛ на отключение при условии обеспечения динамической устойчивости системы. Время замедления действия ДЗЛ на отключение принимается в диапазоне от 100 до 150 мс, в зависимости от типа основной защиты трансформатора.

Выдержки времени в большинстве случаев выбираются одинаковыми.

6.2.9.2 Время блокировки при НЦН для ВЛ с ответвлениями [103324] DT4_ДЗЛ

Выдержка времени используется при выставлении [101351] ХВ1_ДЗЛ Работа на ВЛ с ответвлениями в положение 1 – по U или 2 – по РС и [101352] ХВ2_ДЗЛ Работа на ВЛ с ответвлениями при НЦН в положение 2 - блокируется на время.

Выдержка времени используется для резервирования защит на стороне НН трансформатора ответвления если неселективное отключение ВЛ при КЗ на стороне НН трансформатора не допускается даже в режиме неисправности цепей напряжения. Величина выдержки времени определяет через какой промежуток времени неустранения КЗ на низкой стороне трансформатора ответвления можно производить отключение ВЛ и может выбираться исходя из времени срабатывания как быстродействующих, так и медленнодействующих защит стороны НН. Для длительной блокировки без функции резервирования выдержка времени **DT4_ДЗЛ Время блокировки при НЦН для ВЛ с ответвлениями** выставляется в максимальное значение из диапазона (0.040 - 15.000).

6.2.10 Совместная работа полукомплектов ДЗЛ различных серий

В случае, если на концах ВЛ установлены полукомплекты ДЗЛ различных серий x9x_2xx, x9x_3xx, x9x_4xx, необходимо обеспечение совместимости работы. Возможность обеспечения совместимости различных версий ПО должна быть обязательно согласована в службе поддержки разработчика: support@ekra.ru.

Необходимость обновления прошивки может быть выявлена при наладке. В случае несовместимости версий по формату появляется ошибка «Несоотв. версий ПО».

Также, при совмещении различных версий ПО: x9x_2xx и x9x_3xx, или x9x_2xx и x9x_4xx программная накладка «Совместная работа с ДЗЛ серии 200 и ранее» (Совм. работа с ДЗЛ 200<), должна быть установлена в положение «предусмотрена».

Примечание - программная накладка «Совместная работа с ДЗЛ серии 200 и ранее» в устройствах серии 400 имеет идентификатор 101355.

6.3 Пример расчета уставок ДЗЛ на ЛЭП 220 кВ с двусторонним питанием

На ВЛ 220 кВ в качестве основной защиты установлена дифференциальная защита линии (рисунок 2 а). Исходные данные для расчета приведены в таблице 1.

Таблица 1

Группа параметров	Наименование параметра	Значение
Режим	Максимальный ток внешнего КЗ	4000 А
	Максимальный рабочий ток	800 А
	Минимальный ток КЗ в зоне работы ДЗЛ	1,3 кА
	Емкостный ток	40 А
	Постоянная времени первичной цепи	90 мс
	Длина линии	80 км
Параметры ТТ	Коэффициент трансформации	1000/1
	Класс точности	10Р
	Номинальная вторичная нагрузка	40 ВА
	Сопротивление обмотки	0,4 Ом
	Сопротивление нагрузки	60 Ом

Примечание – расчет ведется для одинаковых ТТ по концам ВЛ.

Трансформаторы напряжения на ПС А и ПС Б одинаковые, установлены на шинах и имеют коэффициент трансформации для цепи «звезда» 220 кВ / 100 В в масштабе линейных величин или 127 кВ / 57 В в масштабе фазных величин.

Для цепи «открытый треугольник», соответственно, коэффициент трансформации равен 220 кВ / 173 В в масштабе линейных величин или 127 кВ / 100 В в масштабе фазных величин.

Защита работает в режиме с торможением от суммы модулей векторов токов, характеристика срабатывания - «кардиоида». Цифровые каналы связи организованы с

применением мультиплексов, при этом гарантированная асимметрия КС составляет 200 мкс.

Базисный ток

Базисный ток (16) выбираем как среднеарифметическое значение номинальных токов ТТ:

$$I_6 = \frac{I_{\text{ТТ ПСА}} + I_{\text{ТТ ПСБ}}}{2} = 1000 \text{ А.}$$

Базисный ток должен быть одинаковым для обоих полукомплектов в первичных величинах (во вторичных величинах базисные токи по концам линии могут отличаться).

Ток срабатывания ДЗЛ

Отстройка уставки $I_{\text{Д0}}$ от токов небаланса в нагрузочном режиме.

Определим по формулам (6) и (22) небаланс при несимметрии КС равной 200 мкс:

$$\varphi_{\text{КС}} = \Delta t_{\text{КС}} \cdot 18 \cdot 10^{-3} = 200 \cdot 18 \cdot 10^{-3} = 3,6^\circ,$$

$$\delta_{\text{КС}} = 2 \cdot \sin(\varphi_{\text{КС}}/2) = 2 \cdot \sin(1,8^\circ) = 0,063 \text{ о. е.}$$

Общий небаланс от всех составляющих факторов, согласно (20), будет:

$$\begin{aligned} I_{\text{Нб}} &= \frac{1}{I_{6 \text{ ДЗЛ}}} \cdot \left[(2 \cdot \varepsilon + 2 \cdot \varepsilon_{\text{изм}} + \delta_{\text{КС}}) \cdot I_{\text{раб макс}} + \sum I_{\text{отв}} + \frac{I_{\text{емк}}}{2} \right] = \\ &= \frac{1}{1000} \cdot \left[(2 \cdot 0,03 + 2 \cdot 0,01 + 0,063) \cdot 1000 + 0 + \frac{40}{2} \right] = \\ &= 0,06 + 0,02 + 0,063 + 0,02 = 0,163 \text{ о. е.} \end{aligned}$$

Ток срабатывания (24) равен

$$I_{\text{Д0}} = \frac{k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{Нб}}}{k_{\text{в}}} = \frac{2 \cdot 0,163}{0,95} = 0,343 \text{ о. е.}$$

Коэффициент чувствительности рассчитаем по формуле:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{КЗ мин}}}{I_{\text{Д0}} \cdot I_{6 \text{ ДЗЛ}}} = \frac{1300}{0,343 \cdot 1000} = 3,79.$$

Коэффициент чувствительности $k_{\text{ч}} > 2$, поэтому ограничим его до $k_{\text{ч}} = 2$.

$$I_{\text{Д0}} = \frac{I_{\text{КЗ мин}}}{k_{\text{ч}} \cdot I_{6 \text{ ДЗЛ}}} = \frac{1300}{2 \cdot 1000} = 0,65 \text{ о. е.}$$

Ток контроля токовых цепей найдем исходя из формулы (49)

$$I_{\text{Д кцт уст}} = k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{Нб}} = 1,5 \cdot 0,163 = 0,244 \text{ о. е.}$$

Дифференциальный ток отсечки

Вторичная нагрузка ТТ примерно в 1,5 раза выше номинальной, поэтому, исходя из существующих кривых, принимаем расчетное значение $Z_{\text{н}} = 2 \cdot Z_{\text{н ном}}$.

Определим значение $k_{\text{с}}$ по рисунку 17 при следующих параметрах: $\tau = 100 \text{ мс}$, $I_{\text{КЗ внеш макс}} = 4000 \text{ А}$, $Z_{\text{н}} = 2 \cdot Z_{\text{н ном}}$. Предварительно определим ток внешнего КЗ в относительных единицах:

$$I_{КЗ}^* = \frac{I_{КЗ \text{ внеш макс}}}{I_{НОМ ТТ}} = \frac{4000}{1000} = 4,0 \text{ о. е.}$$

Определим значение k_s , для чего по горизонтальной оси на рисунке 17 отложим значение $I_{КЗ}^* = 4,0$ о. е. и проведем вертикальную линию (см. рисунок 24). На пересечении с кривыми при $Z_H = 2 \cdot Z_{H \text{ ном}}$ находим значения $k_s = 2,7$, $\Delta\phi_s = 25,2^\circ$.

Ток небаланса при внешнем КЗ с максимальным током КЗ согласно (36) равен

$$I_{НБ \text{ КЗ внеш макс}} = I_{КЗ \text{ внеш макс}} \sqrt{1 + \frac{1}{k_s} \cdot \left(\frac{1}{k_s} - 2 \cdot \cos(\Delta\phi_s) \right)} =$$

$$= 4000 \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{2,7} \cdot \left(\frac{1}{2,7} - 2 \cdot \cos(25,2^\circ) \right)} = 2733 \text{ А.}$$

Ток срабатывания ДТО выбирается равным

$$I_{Д \text{ отс}} = \frac{k_{отс} \cdot I_{НБ \text{ КЗ внеш макс}}}{I_{6 \text{ ДЗЛ}}} = \frac{1,5 \cdot 2733}{1000} = 4,1 \text{ о. е.}$$

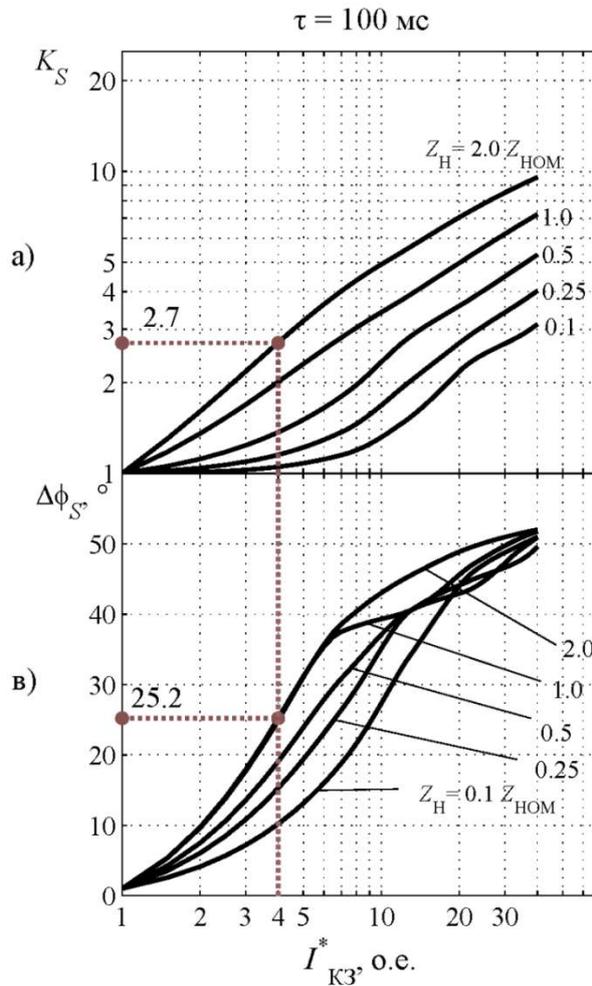


Рис. 24 – Определение значения коэффициента искажения k_s и отклонения угла $\Delta\phi_s$ между векторами первичного и вторичного тока ТТ от тока КЗ для расчета уставки ДТО

Выбор параметров наклонных участков характеристики срабатывания

Первый наклонный участок характеризует область режимов работы защиты, в которых искажение тока из-за насыщения ТТ незначительно либо полностью отсутствует. Коэффициент торможения $k_{T1} = 0,5$ о. е.

Определим ток I_{S2} начала торможения на втором участке характеристики срабатывания. Для этого зададимся значением тока КЗ $I_{K3}^* = 2$ (примерно в 2 раза меньше тока внешнего КЗ). По рисунку 17 определим значение коэффициента искажения k_s , а также фазу тока $\Delta\varphi_s$. Вторичная нагрузка ТТ примерно в 1,5 раза выше номинальной, поэтому, исходя из существующих кривых, принимаем расчетное значение $Z_H = 2 \cdot Z_{H\text{НОМ}}$. По рисунку 25 (графическое построение 1) получаем значения $k_s = 1,8$, $\Delta\varphi_s = 9,6^\circ$. Точка $A_1(1,8; 9,6)$ находится ниже кривой $\Delta\varphi = f(k_s)$, построенной для $k_{T1} = 0,5/1,2 = 0,417$ (рисунок 26).

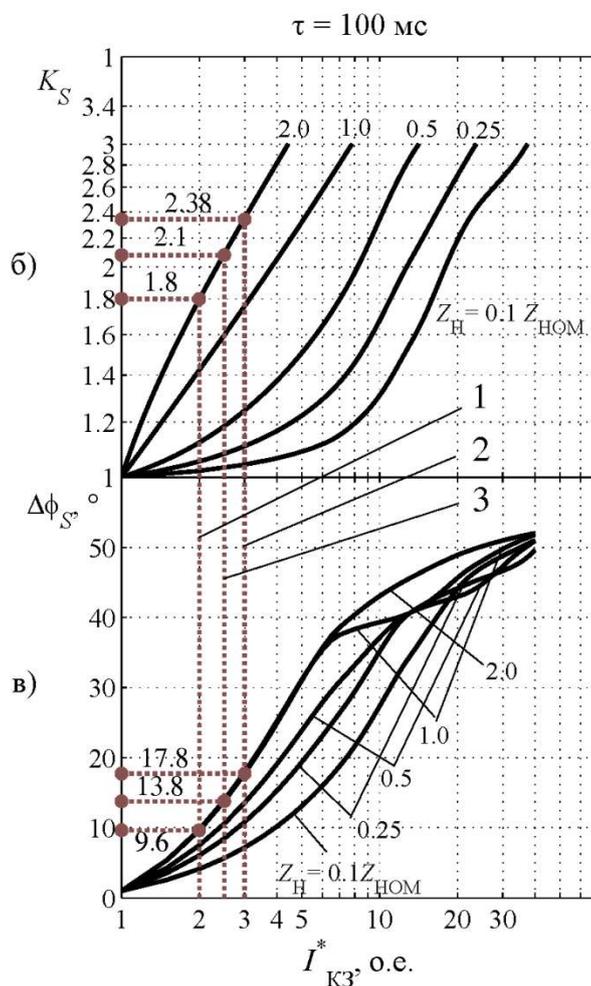


Рис. 25 – Итерационный подбор значения коэффициента искажения k_s и отклонения угла $\Delta\varphi_s$ между векторами первичного и вторичного тока ТТ от тока КЗ при $\tau = 100$ мс

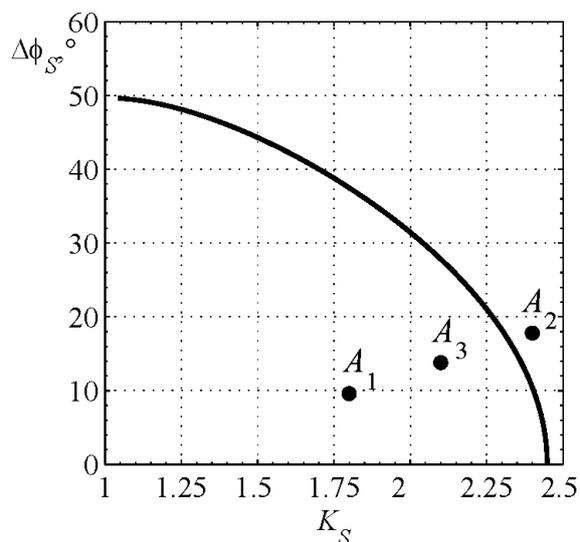


Рис. 26 – Зависимость предельного максимального отклонения угла $\Delta\varphi$ между векторами первичного и вторичного тока ТТ в зависимости от коэффициента искажения k_s при $k_{T1} = 0,5/1,2 = 0,417$

Увеличим исходное значение тока КЗ $I_{K3}^* = 3,0$ и повторим графические построения. По рисунку 25 (графическое построение 2) получаем значения $k_s = 2,4$, $\Delta\varphi_s = 17,8^\circ$. Полученная точка $A_2(2,4; 17,8)$ находится выше кривой $\Delta\varphi = f(k_s)$, (рисунок 26).

Уменьшим значение тока КЗ $I_{K3}^* = 2,5$, и снова повторим графические построения. По рисунку 25 (графическое построение 3) получаем значения $k_s = 2,1$, $\Delta\varphi_s = 13,8^\circ$. Полученная точка $A_3(2,1; 13,8)$ находится ниже кривой $\Delta\varphi = f(k_s)$, и при этом близко к границе предельных значений (рисунок 26).

Исходя из полученных итерационным методом данных, окончательно определим коэффициент искажения тормозного тока k_{sT} по рисунку 20:

$$k_{sT} = 1,5,$$

и находится эта точка ниже линии $k_T = 0,417$, тем самым обеспечивая необходимый запас по отстройке от насыщения ТТ при искомом токе I_{s2} (рисунок 27).

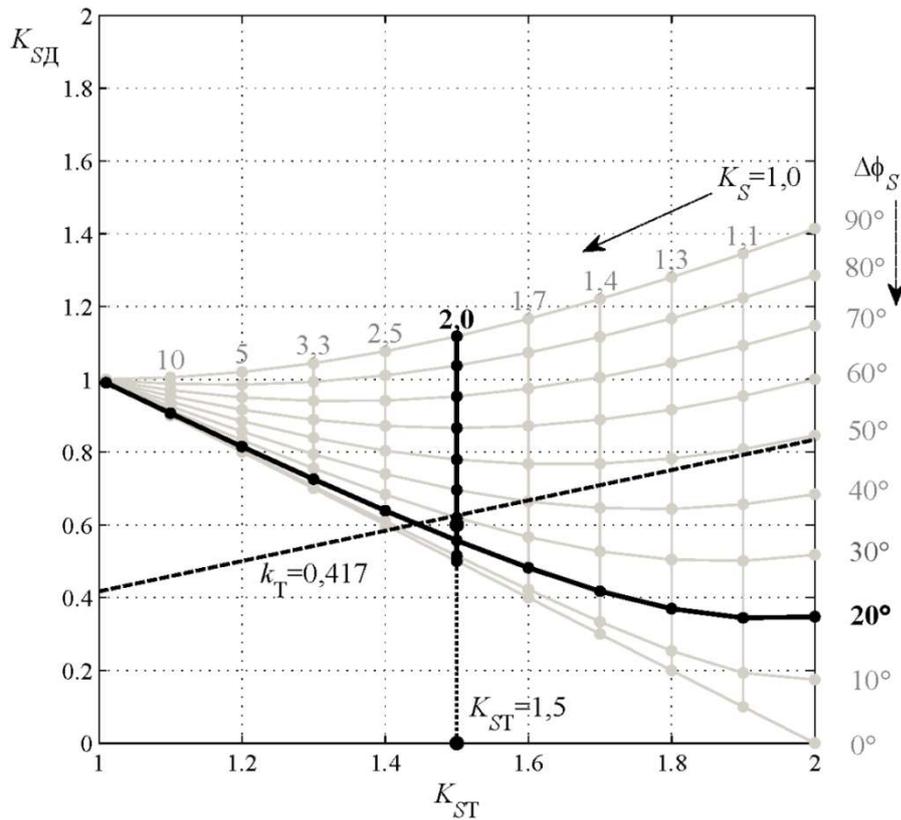


Рис. 27 – Определение коэффициента искажения тормозного тока

Определим ток I_{s2} начала торможения на втором участке характеристики срабатывания:

$$I_{s2} = \frac{k_{сТ} \cdot I_{КЗ}^* \cdot I_{НОМ ТТ}}{I_{б ДЗЛ}} = \frac{1,5 \cdot 2,5 \cdot 1000}{1000} = 3,75 \text{ о. е.}$$

Далее, по данным рисунка 24 ($k_s = 2,7$, $\Delta\phi_s = 25,2^\circ$), определим необходимое значение эквивалентного коэффициента торможения $k_{тэ отс}$ при максимальном токе внешнего КЗ (см. раздел **Выбор уставок дифференциальной токовой отсечки**).

Построения представлены на рисунке 28.

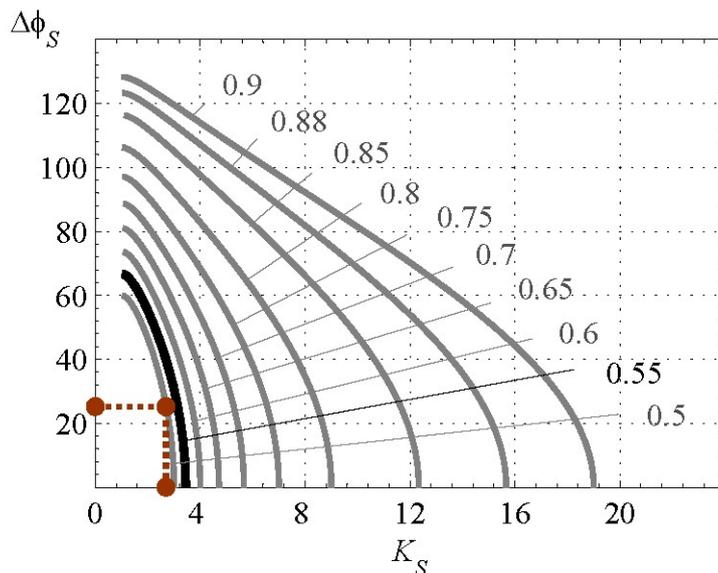


Рис. 28 – Взаимосвязь между максимальным отношением токов по концам защищаемой линии и предельным углом между токами, при котором происходит блокирование ДЗЛ, для характеристики «кардиоида»

Выбираем требуемое значение $k_{тэ\ отс} = 0,55$.

Коэффициент торможения $k_{т2}$ определяется по формуле (48) и выбирается из диапазона от 0,3 до 3,0 о.е.

$$k_{т2} = \frac{k_{тэ\ отс} - 0,5 \frac{I_{s2}}{I_{т\ отс}}}{1 - \frac{I_{s2}}{I_{т\ отс}}} = \frac{0,55 - 0,5 \frac{3,75}{7,45}}{1 - \frac{3,75}{7,45}} = \frac{0,55 - 0,252}{1 - 0,503} = 0,6,$$

при этом предельный тормозной ток равен

$$I_{т\ отс} = \frac{I_{д\ отс}}{0,55} = \frac{4,1}{0,55} = 7,45 \text{ о. е.}$$

Форма бланка уставок и параметров ДЗЛ терминала

Унифицированные идентификаторы в первых столбцах таблиц используются в серии терминалов 400 (и выше). В устройствах серии 200 и 300 они отсутствуют.

ТТ, ТН

Таблица 2 - Первичная/вторичная величина датчиков аналоговых входов

Номер сигнала	Наименование параметра (диапазон),размерность [шаг]	По умолчанию	Значения
050201	Первичная величина датчика аналогового входа Ia B1 (0.001-1000000.000),А [шаг 0.001]	1000.000	1000.000
050202	Вторичная величина датчика аналогового входа Ia B1 (1-5),А [шаг 0.1]	5	1
050203	Первичная величина датчика аналогового входа Ia B2 (0.001-1000000.000),А [шаг 0.001]	1000.000	1000.000
050204	Вторичная величина датчика аналогового входа Ia B2 (1-5),А [шаг 0.1]	5	1
050205	Первичная величина датчика аналогового входа 3I0// (0.001-1000000.000),А [шаг 0.001]	1000.000	1000.000¹
050206	Вторичная величина датчика аналогового входа 3I0// (1-5),А [шаг 0.1]	5	1¹
050207	Первичная величина датчика аналогового входа Ua (0.001-1000000.000),В [шаг 0.001]	110000.000	220000.000
050208	Вторичная величина датчика аналогового входа Ua (0.001-1000000.000),В [шаг 0.001]	100.000	100.000
050209	Первичная величина датчика аналогового входа Уни (0.001-1000000.000),В [шаг 0.001]	110000.000	220000.000
050210	Вторичная величина датчика аналогового входа Уни (0.001-1000000.000),В [шаг 0.001]	173.203	173.203

¹ - параллельной линии нет, цепь не используется, устанавливается значение по умолчанию

Таблица 3 - ТТ

Номер сигнала	Наименование параметра	По умолчанию	Значения
050251	ТТ В2 (используется, не используется)	используется	используется
050253	ТТ 3I0 // линии (используется, не используется)	используется	не используется²
050257	Обнуление ТТ В1	-	
050258	Обнуление ТТ В2	-	

² - параллельной линии нет, цепь не используется

Параметры линии

Таблица 4 - Параметры линии

Номер сигнала	Наименование параметра (диапазон),размерность [шаг]	По умолчанию		Значения	
		Перв	Втор	Перв	Втор
050341	Длина линии Lл (0.00 .. 10000.00),км [шаг 0.01]	100.00		80.00	
050342	Удельная проводимость прямой последовательности b1*10 ⁻⁶ (0.00-300.00) /ном,Сим/км [шаг 0.01]	4.30	23.65	3.90	8.58
050343	Удельное активное сопротив.прямой последовательности (0.0001-100.00) /ном,Ом/км [шаг 0.0001]	0.0980	0.0178	0.1500	0.0680
050344	Удельное реактивное сопротив.прямой последовательности (0.0001-100.00) /ном,Ом/км [шаг 0.0001]	0.4220	0.0767	0.3900	0.1770
050345	Удельная проводимость нулевой последовательности b0*10 ⁻⁶ (0.00-300.00) /ном,Сим/км [шаг 0.01]	3.30	18.15	3.10	6.82
050346	Удельное активное сопротив.нулевой последовательности (0.0001-100.00) /ном,Ом/км [шаг 0.0001]	0.2480	0.0451	0.2200	0.1000
050347	Удельное реактивное сопротив.нулевой последовательности (0.0001-100.00) /ном,Ом/км [шаг 0.0001]	1.1790	0.2144	1.1000	0.5000

Номер сигнала	Наименование параметра (диапазон),размерность [шаг]	По умолчанию		Значения	
		Перв	Втор	Перв	Втор
050348	Удельное активное сопротив.взаимоинд.нулевой послед.гОМ с //ВЛ (0.0001-100.00) /Ином,Ом/км [шаг 0.0001]	0.0940	0.0171	0.0940	0.0430
050349	Удельное реактивное сопротив.взаимоинд.нулевой послед.хОМ с //ВЛ (0.0001-100.00) /Ином,Ом/км [шаг 0.0001]	0.3160	0.0575	0.3160	0.1440

ДЗЛ

Таблица 5 - Настройка КС

Номер сигнала	Наименование параметра (диапазон),размерность [шаг]	По умолчанию	Значения	РВУ
101201	Роль (ведомый, ведущий)	ведомый	ведомый	-
101202	Задержка сигнализации неисправности КС (0.0 .. 10.0) ,с [шаг 0.1]	3.0	3.0	-

Таблица 6 - Параметры КС1

Номер сигнала	Наименование параметра (диапазон),размерность [шаг]	По умолчанию	Значения	РВУ
101204	Кодирование в КС1 (Манчестер, С37.94)	Манчестер	С37.94	-
101205	Генерация сигнала синхронизации КС1 (внутренняя, внешняя)	внутренняя	внешняя	-
101206	Скорость передачи по КС1 (64 кБит/с, 128 кБит/с, 256 кБит/с, 512 кБит/с)	64 кБит/с	64 кБит/с	-
101207	Компенсация асимметрии КС1 (-2500 .. 2500) ,мкс [шаг 1]	0	200	-
101209	Передаваемый ID КС1 (0 .. 15)	0	0	-
101216	Принимаемый ID КС1 (0 .. 15)	0	1	-

Таблица 7 - Параметры КС2

Номер сигнала	Наименование параметра (диапазон),размерность [шаг]	По умолчанию	Значения	РВУ
101210	Кодирование в КС2 (Манчестер, С37.94)	Манчестер	С37.94	-
101211	Генерация сигнала синхронизации КС2 (внутренняя, внешняя)	внутренняя	внешняя	-
101212	Скорость передачи по КС2 (64 кБит/с, 128 кБит/с, 256 кБит/с, 512 кБит/с)	64 кБит/с	64 кБит/с	-
101213	Компенсация асимметрии КС2 (-2500 .. 2500) ,мкс [шаг 1]	0	200	-
101215	Передаваемый ID КС2 (0 .. 15)	1	2	-
101217	Принимаемый ID КС2 (0 .. 15)	1	3	-

Таблица 8 - Уставки ПО

Номер сигнала	Наименование параметра (диапазон),размерность [шаг]	По умолчанию		Значения		РВУ
		Перв	Втор	Перв	Втор	
101231	Базисный ток (0.1-16.0) Iном,А [шаг 0.1]	1000.0	5.0	1000	1	6.2.1
101232	Иср ПО ДЗЛ (Id0) (0.20 .. 2.00) ,о.е. [шаг 0.01]	0.40		0.65		6.2.3
101233	Вид торможения ДЗЛ (сумма модулей, модуль разности векторов, сектор)	сумма модулей		сумма модулей		6.2.5
101234	Коэффициент торможения дифф. защиты К1 (0.10 .. 0.90) ,о.е. [шаг 0.01]	0.50		0.50		6.2.5
101235	Коэффициент торможения дифф. защиты К2 (0.30 .. 3.00) ,о.е. [шаг 0.01]	0.75		0.61		6.2.5
101236	Ток начала торможения Is2 (0.40 .. 20.00) ,о.е. [шаг 0.01]	2.00		3.75		6.2.5
101251	Угол сектора блокирования (10 .. 89) ,° [шаг 1]	70		70³		6.2.5
101261	Компенсация емкостного тока ДЗЛ (не предусмотрена, предусмотрена)	не предусмотрена		Предусмотрена⁴		-
101271	Иср ПО ДТО (2.00 .. 40.00) ,о.е. [шаг 0.01]	8.00		4.1		6.2.4
101272	Иср ПО контроля обрыва цепей тока (0.04 .. 2.00) ,о.е. [шаг 0.01]	0.10		0.25		6.2.8

³ - Если характеристика типа «сектор» не используется, значение угла устанавливается по умолчанию.

⁴ - Компенсация емкостного тока предусматривается при длине воздушной линии более 50 км. Для кабельной линии компенсация емкостного тока предусматривается всегда.

Таблица 9 - Уставки времени

Номер сигнала	Наименование параметра (диапазон),размерность [шаг]	По умолчанию	Значения	РВУ
101321	DT1_ДЗЛ Задержка на срабатывание ДЗЛ (0.000 .. 0.150) ,с [шаг 0.001]	0.000	0.000⁵	6.2.9.1
101322	DT2_ДЗЛ Задержка на срабатывание ДТО (0.00 .. 2.00) ,с [шаг 0.01]	0.00	0.00⁶	6.2.9.1
101323	DT3_ДЗЛ Задержка срабатывания контроля обрыва цепей тока (0.05 .. 27.00) ,с [шаг 0.01]	10.00	10.00⁷	6.2.8
101324	DT4_ДЗЛ Время блокировки при НЦН для ВЛ с ответвлениями (0.04 .. 15.00) ,с [шаг 0.01]	0.2	0.2⁸	6.2.9.2

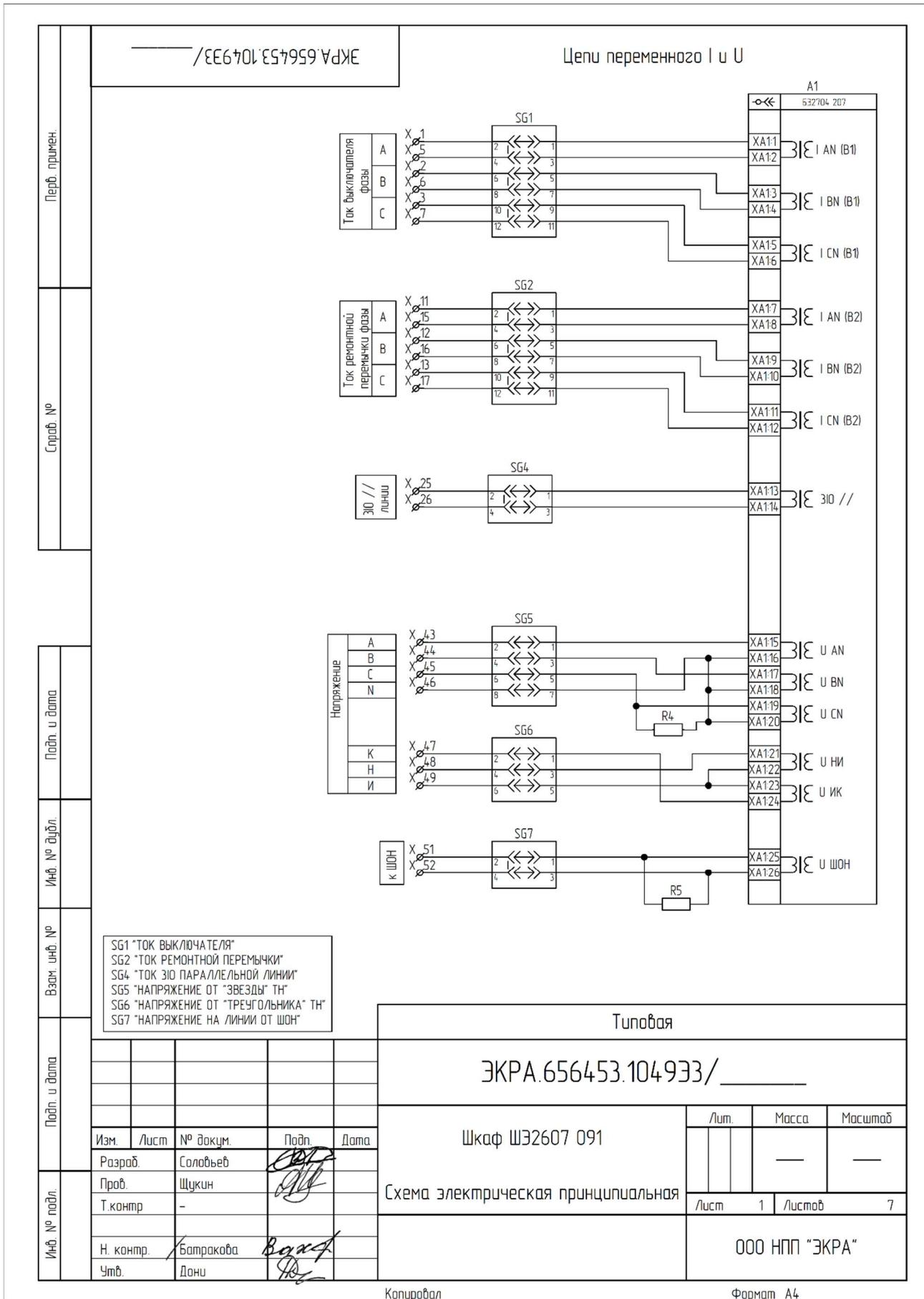
⁵ - Требований по согласованию времени действия ДЗЛ с другими защитами нет.

⁶ - Требований по согласованию времени действия ДТО с другими защитами нет.

⁷ - Если нет специальных требований, то выбирается значение по умолчанию.

⁸ - Не используется.

Приложение А (рекомендуемое). Схема электрическая принципиальная



Копировал

Формат А4

Приложение Б (рекомендуемое). Удельные параметры ВЛ

Таблица Б.1

Марка провода	Число проводов в фазе	Удельная проводимость, $10^{-6} \cdot \text{Сим/км}$	
		110 кВ	220 кВ
АС-50	1	2,53	-
АС-70	1	2,58	-
АС-95	1	2,65	-
АС-120	1	2,69	-
АС-150	1	2,74	-
АС-185	1	2,82	-
АСО-240	1	2,85	2,66
	2	-	3,64
АСО-300	1	2,91	2,71
	2	-	3,70
АСО-400	1	3,00	2,73
	2	-	3,76
АСО-500	1	-	2,79
	2	-	3,70
АСО-600	1	-	2,84

Для определения удельных параметров для схемы нулевой последовательности необходимо задаться соотношением b_0/b_1 , значение которого находится в пределах 0,55 - 0,60. В случае если ВЛ имеет грозозащитные тросы, то диапазон 0,60 - 0,65.

Если в таблице Б.1 отсутствуют необходимые параметры, можно производить расчеты по средним значениям проводимости:

- для ВЛ класса напряжения 110-220 кВ $b_1 = 2,76 \cdot 10^{-6} \text{ Сим/км}$;
- для ВЛ класса напряжения 330-750 кВ $b_1 = 3,77 \cdot 10^{-6} \text{ Сим/км}$.

Приложение В (рекомендуемое). Сопротивления трансформаторов

Все данные приложения В о сопротивлениях являются средними значениями из ряда справочников.

Таблица В.1

Мощность трансформатора, МВА	Сопротивление, Ом							
	Номинальное напряжение 35 кВ		Номинальное напряжение 110 кВ		Номинальное напряжение 220 кВ		Номинальное напряжение 500 кВ	
	двухобмоточные	трехобмоточные	двухобмоточные	трехобмоточные	двухобмоточные	трехобмоточные	двухобмоточные	трехобмоточные
1	80	-	-	-	-	-	-	-
1,6	50	-	-	-	-	-	-	-
2,5	32	-	510	-	-	-	-	-
4	23	-	-	-	-	-	-	-
6,3	15	16	221	226	-	-	-	-
10	19	23	139	143	-	-	-	-
16	-	14	87	89	-	-	-	-
25	6	-	56	57	-	275	-	-
32	6	-	-	-	-	-	-	-
40	5	-	35	36	158	165	-	-
63	3	-	23	23	101	104	-	-
80	2	-	18	19	-	-	-	-
100	-	-	-	-	64	-	-	-
125	-	-	14	-	-	49	-	-
135	-	-	-	-	-	-	-	70
160	-	-	-	-	40	-	-	-
167	-	-	-	-	-	-	-	61
200	-	-	8	-	33	-	-	-
250	-	-	7	-	26	26	143	138
267	-	-	-	-	-	-	-	40
400	-	-	4	-	17	-	90	-
500	-	-	-	-	-	-	-	58
533	-	-	-	-	-	-	23	-
630	-	-	-	-	12	-	61	-
1000	-	-	-	-	7	-	40	-

Список литературы

1. СТО 56947007-29.240.30.010-2008. Схемы принципиальные электрические РУ ПС 35-750 кВ. Типовые решения, ОАО ФСК ЕЭС
2. Шкафы РЗА серий ШЭ2607, ШЭ2710. Методические указания по проверке и выбору трансформаторов тока. ЭКРА.650323.085 Д.
3. Шкаф дифференциальной защиты линии типа ШЭ2607 091. Руководство по эксплуатации. ЭКРА.656453.126 РЭ. [Текст] – Чебоксары: ООО НПП «ЭКРА», 2008.
4. Методические указания по расчету и выбору параметров настройки дистанционных защит линий электропередачи 110 кВ и выше (утверждены распоряжением АО «СО ЕЭС» №89р от 17.08.2021)
5. Правила устройства электроустановок. Седьмое издание, дополненное с исправлениями. [Текст]: ПУЭ: утв. М-вом энергетики Рос. Федерации 08.07.2002: введ. в действие с 01.01.03.
6. Афанасьев В.В. Трансформаторы тока. [Текст] / В.В. Афанасьев. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 416 с.
7. Трансформаторы тока. Общие технические условия. [Текст]: ГОСТ 7746-2015. – Введ. 2017-03-01. – М.: Стандартиформ, 2016.
8. Инструкция по проверке трансформаторов тока используемых в схемах релейной защиты и измерения. [Текст]: РД 153-34,0-35,301-202: утв. Департаментом научно-технической политики и развития РАО «ЕЭС России» 06.06.2002: введ в действие с 2003-03-01.
9. Королев Е.П. Расчеты допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты. [Текст] / Е.П. Королев, Э.М. Либерзон. - М.: Энергия, 1980. – 207 с.
10. Соединения контактные электрические. Классификация. Общие технические требования. [Текст]: ГОСТ 10434-82. – Введ. 83-01-01. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам. Издательство стандартов., 1982.
11. Выводы контактные электротехнических устройств плоские и штыревые. Основные размеры. [Текст]: ГОСТ 21242-75. – Введ. 76-07-01. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам. Издательство стандартов., 1975.
12. Соединения контактные электрические. Приемка и методы испытаний. [Текст]: ГОСТ 17441-84. – Введ. 86-01-01. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам. Издательство стандартов., 1984.
13. Идельчик В.И. Электрические системы и сети. Учебник для вузов. [Текст] – М.: Энергоатомиздат, 1989. - 592 с.
14. Резервные защиты линии 110-220 кВ. Рекомендации по выбору уставок. [Текст] – Чебоксары: ООО НПП «ЭКРА», 2022.
15. Циглер Г. Цифровая дистанционная защита: принципы и применение. Перевод с англ. Под ред. Дьякова А.Ф. [Текст] – М.: Энергоиздат, 2005.

16. Нормы качества электроэнергии в системах электроснабжения общего назначения. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. [Текст]: ГОСТ 54149-2010. – Введ. 2010-12-21. – М.: Стандартинформ, 2012.

17. Марков Е.Ф. Справочник по электрическим сетям 0,4 – 35 кВ и 110 – 1150 кВ. Том 6. [Текст] / Е.Ф. Марков. – М.: ИП «Энергия», 2006. – 624 с.

18. Федосеев А.М. Релейная защита электрических систем. [Текст] – М.: Энергия, 1976.