

**Рекомендации по выбору уставок функции
продольной дифференциальной защиты
линии электропередачи**

ЭКРА.650323.037Д7

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

Содержание

Введение	7
1 Продольная дифференциальная защита линии	9
1.1 Принцип действия дифференциальной защиты	9
1.2 Режимы работы ДЗЛ	11
1.2.1 Нагрузочный режим и режим внешнего повреждения.....	11
1.2.2 Повреждение в зоне действия ДЗЛ	11
1.2.3 Влияние асимметричности цифрового канала связи.....	13
1.2.4 Влияние насыщения измерительных трансформаторов тока.....	14
1.3 Характеристики срабатывания ДЗЛ	17
2 Определение параметров ДЗЛ	23
2.1 Выбор базисного тока	23
2.2 Выбор начального тока срабатывания дифференциальной защиты	24
2.3 Выбор уставок дифференциальной токовой отсечки	27
2.4 Определение параметров характеристики срабатывания ДЗЛ.....	29
2.5 Выбор уставок органа контроля цепей тока	37
2.6 Блокировка устройства при внешних КЗ	37
2.7 Совместная работа полуккомплектов ДЗЛ различных серий.....	39
2.8 Пример расчета	39
Приложение А (рекомендуемое). Удельные параметры ВЛ.....	46
Список литературы.....	47
Принятые сокращения.....	48

Введение

В настоящем документе рассмотрены вопросы выбора уставок дифференциальной защиты линии (ДЗЛ), входящей в состав функций устройств релейной защиты, реализованных в микропроцессорных терминалах БЭ2704 производства ООО «НПП «ЭКРА».

В первом разделе приведено описание характеристик ДЗЛ и рассмотрены различные факторы, влияющие на характеристические режимы работы ДЗЛ. К этим факторам относятся: нагрузочный режим работы линии, временные характеристики цифрового канала связи между полуккомплектами защиты, насыщение измерительных трансформаторов тока (ТТ). Описаны процессы происходящие в ТТ в статических и переходных режимах, которые оказывают существенное влияние на функционирование защиты.

Второй раздел документа посвящен выбору параметров (уставок) ДЗЛ, необходимых для работы защиты.

1 Продольная дифференциальная защита линии

1.1 Принцип действия дифференциальной защиты

Принцип действия дифференциальной защиты [1] 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 1 а).

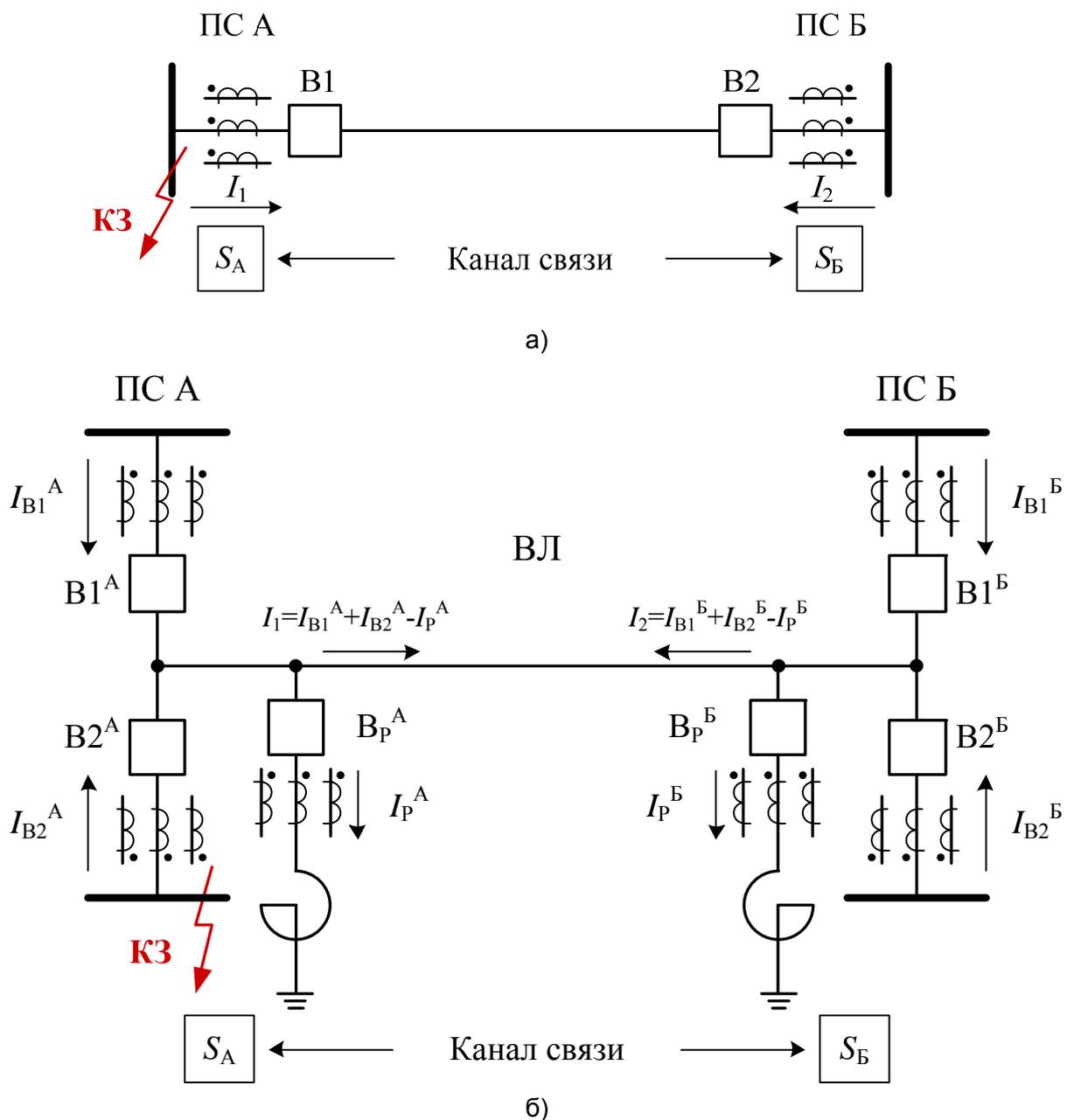


Рис. 1 – Принцип действия ДЗЛ

Дифференциальный ток определяется по формуле (рисунок 1 а):

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

где Φ – фаза А, В или С.

В случае применения схемы с двумя выключателями расчёт дифференциального тока производится следующим образом:

$$I_{Д(\Phi)} = |i_{B1\Phi}^A + i_{B2\Phi}^A + i_{B1\Phi}^B + i_{B2\Phi}^B|, \quad (2)$$

для защит линий с напряжением 330 – 750 кВ, при наличии реакторов:

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

где индексы В1, В2, Р – обозначают принадлежность токов к цепям выключателя В1, В2 или к цепям шунтирующего реактора (рисунок 1 б).

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

$$I^* = \frac{I}{I_B}, \quad (4)$$

где I_B – базисный ток дифференциальной защиты.

Базисный ток предназначен для выравнивания токов плеч защиты во вторичных величинах при различных коэффициентах трансформации ТТ.

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

При внешних повреждениях по отношению к защищаемому объекту сумма токов 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 I_2/I_1 (рисунки 2 и 3). Указанная плоскость служит для визуализации нормальных режимов работы линии и режимов в условиях аварийных повреждений в энергосистеме.

1.2 Режимы работы ДЗЛ

1.2.1 Нагрузочный режим и режим внешнего повреждения

В нормальном режиме по линии протекает ток нагрузки (рисунок 2 а). В комплексной плоскости отношения векторов токов, без учёта дополнительных искажающих факторов, нагрузочный режим (рисунок 2 а) и внешние повреждения (рисунок 2 б) представлены одной точкой: $(-1 + j0)$ - рисунок 3. 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 ёмкостного тока, являющимся для защиты дифференциальным током. Для исключения дополнительного загробления ДЗЛ при отстройке от ёмкостного тока, применяется выравнивание токов по концам линии с помощью специального устройства компенсации ёмкостного тока.

1.2.2 Повреждение в зоне действия ДЗЛ

При повреждениях на линии дифференциальный ток, вычисляемый в каждом полукомплекте ДЗЛ, равен току повреждения $I_{КЗ}$ в месте КЗ (рисунок 2 в).

В случае одностороннего питания, при внутренних КЗ через переходное сопротивление, возможно протекание токов по концам линии с направлением, соответствующем внешнему повреждению (рисунок 2 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 раздельное сравнение трех фазных 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 4).

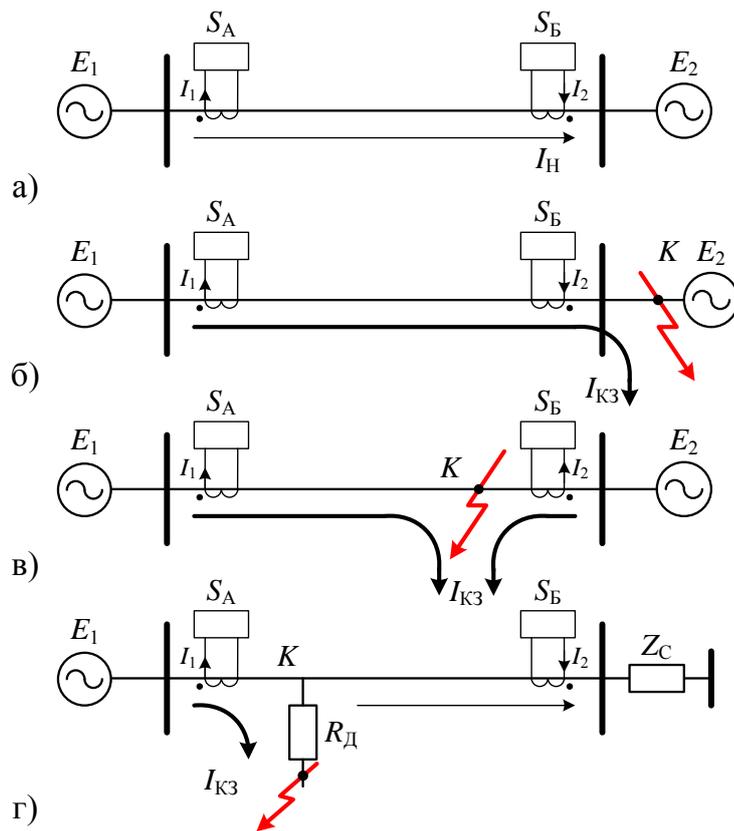


Рис. 2 – Рабочие и аварийные режимы работы:

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

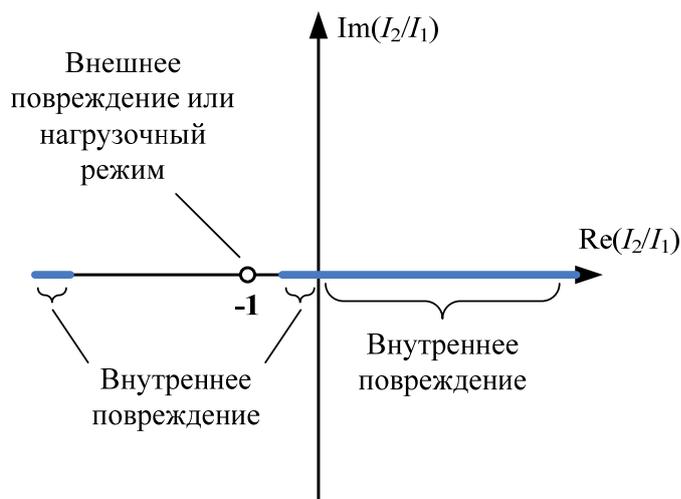


Рис. 3 – Характерные точки на плоскости ОВТ

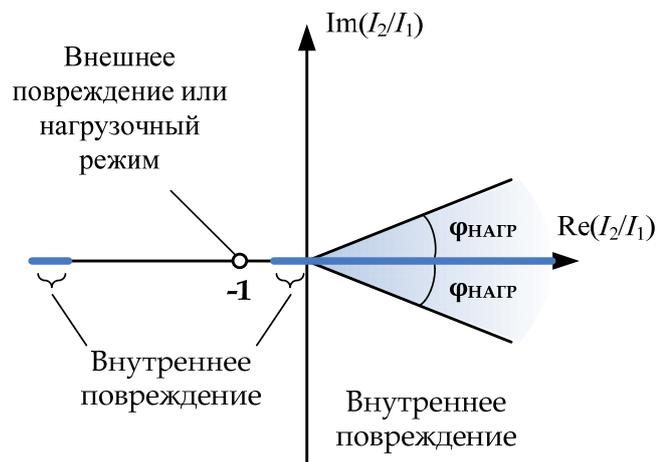


Рис. 4 – Влияние угла нагрузки

1.2.3 Влияние асимметричности цифрового канала связи

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

$$\varphi_{КС} = \Delta t_{КС} \frac{360^\circ}{20 \text{ мс}} = \Delta t_{КС} \cdot 18 \cdot 10^{-3} \text{ (}^\circ\text{)}. \quad (5)$$

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. Одним из требований применимости цифровых каналов связи с использованием мультиплексов является условие $\Delta t_{КС} < 250 \text{ мкс}$. В этом случае угол $\varphi_{КС}$ не превышает $4,5^\circ$.

При внешних повреждениях и в нагрузочных режимах, за счет разности времени $\Delta t_{КС}$ передачи цифрового сигнала между полуконтактами 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 5.

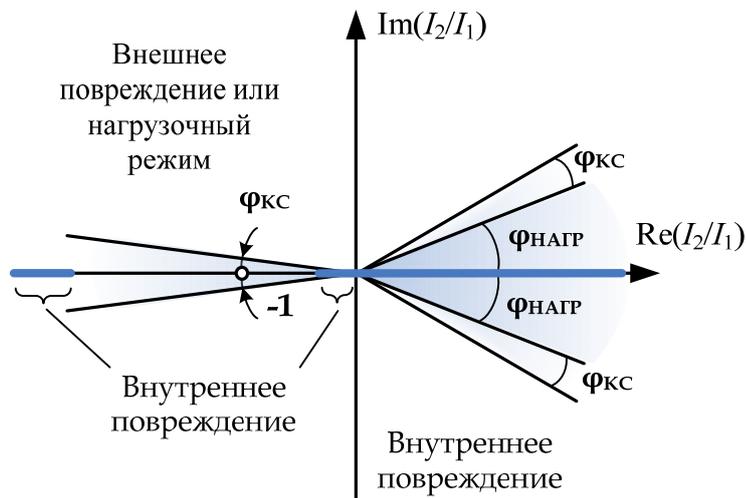


Рис. 5 – Влияние асимметричности канала связи

1.2.4 Влияние насыщения 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 её постоянной времени затухания, от величины нагрузки во вторичной цепи ТТ, характеристик магнитопровода и остаточной намагниченности.

На рисунке 6 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.

Примечание - При внешнем КЗ вторичные токи направлены противоположно. Для наглядности, на рисунках 6 и 7, осциллограммы токов (верхнее поле) развернуты на 180°.

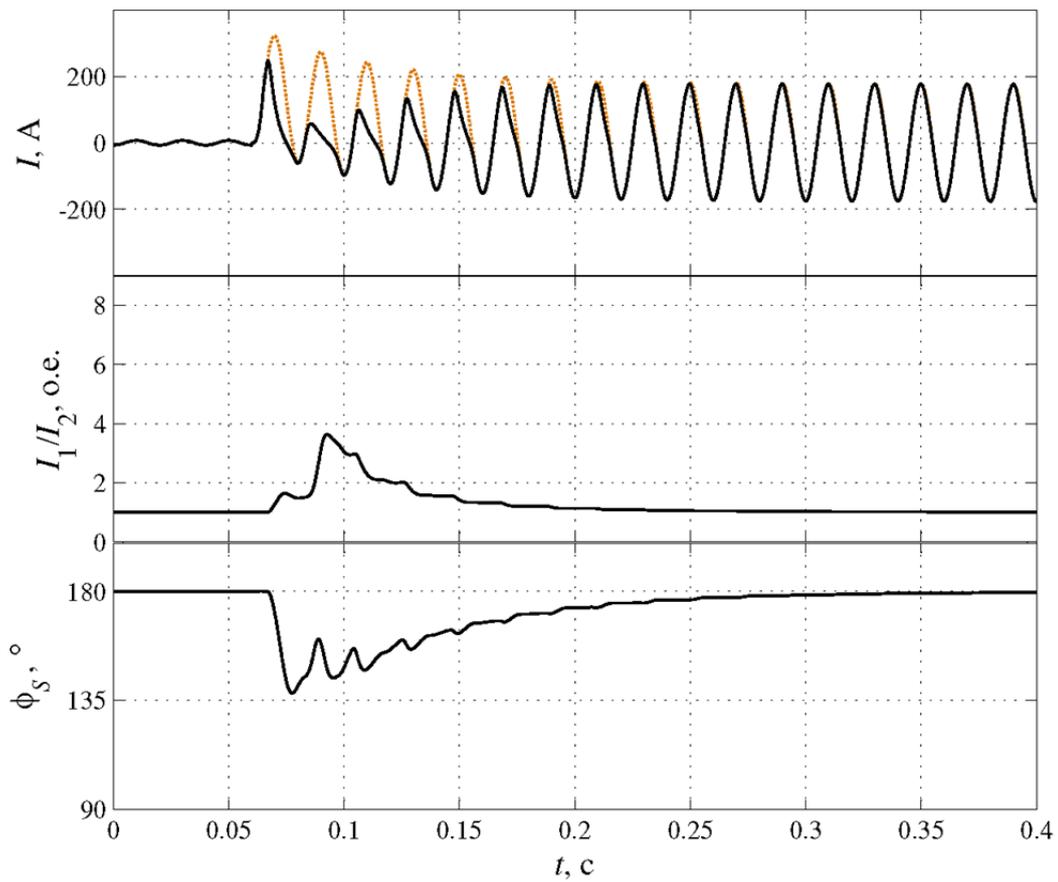


Рис. 6 – Насыщение ТТ: $\tau = 50$ мс, $\epsilon = 10\%$

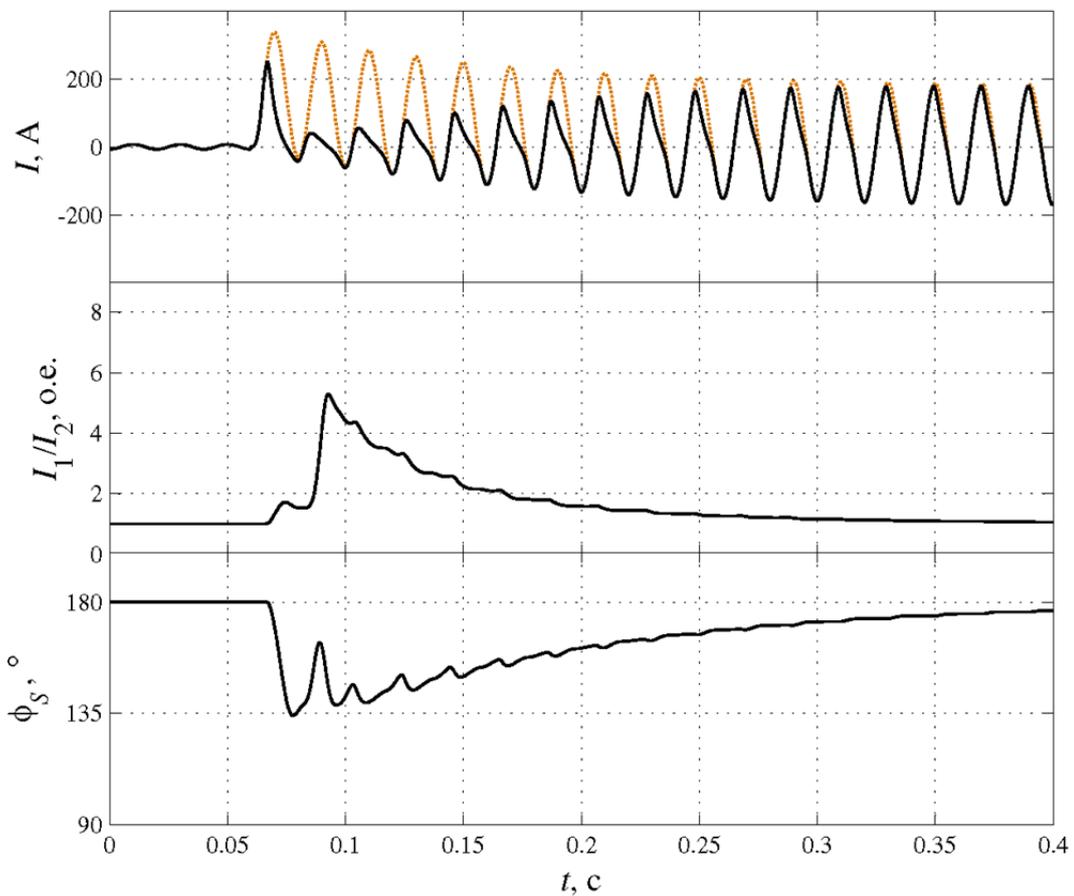


Рис. 7 – Насыщение ТТ: $\tau = 100$ мс, $\epsilon = 10\%$

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 апериодической составляющей в токе КЗ и остаточной намагниченности магнитопровода. Так, для случая приведенного на рисунке 6, максимальная величина отношений модулей токов составляет 3,6 о.е., максимальное отклонение сдвига фаз – $\Delta\varphi_S = 41^\circ$.

Максимальные величины отношений токов и фазовых сдвигов зависят от постоянной времени апериодической составляющей тока КЗ. На рисунке 7 приведены аналогичные кривые для постоянной времени апериодической составляющей тока КЗ, равной 100 мс. В этом случае максимальная величина отношений токов составляет 5,3 о.е., а максимальное отклонение сдвига фаз – $\Delta\varphi_S = 46^\circ$.

Максимумы величины отношения токов и фазового сдвига возникают в разные моменты времени (рисунок 6 и 7). Так как в расчетах по выбору параметров ДЗЛ участвуют данные величины, то указанная разновременность возникновения максимумов обеспечивает небольшой запас при расчёте параметров срабатывания.

Таким образом, имеем ещё одну составляющую $\Delta\varphi_S$ общего угла, на который может отклоняться вектор отношений токов по концам линии (рисунок 8).

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.

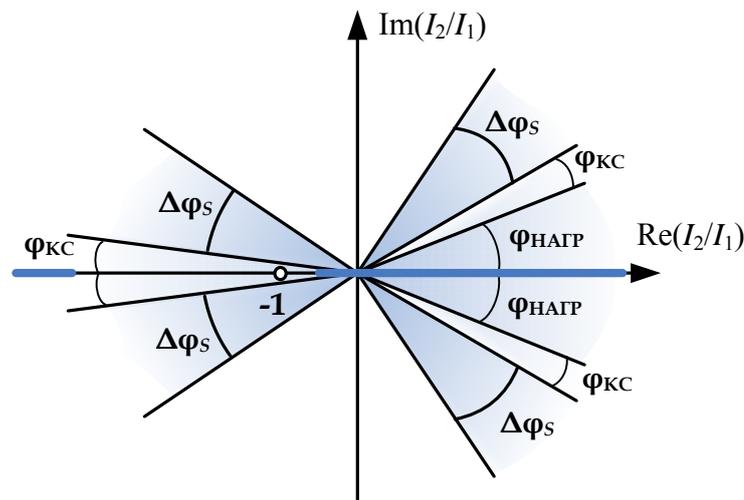


Рис. 8 – Влияние насыщения ТТ

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.

1.3 Характеристики срабатывания ДЗЛ

Характеристика срабатывания защиты в координатах дифференциальной и тормозной величин приведена на рисунке 9. Характеристика срабатывания имеет четыре участка.

Дифференциальный ток I_D соответствует модулю тока, протекающему в месте повреждения. При любых характеристиках срабатывания, действие дифференциального элемента на отключение разрешается только при превышении дифференциальным током некоторой величины тока I_{D0} , определяемой уставкой. Это соответствует горизонтальному участку характеристики.

Величина порога срабатывания дифференциальной защиты I_{D0} 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_{T1} . (определяется уставкой k_{T1}). Точка пересечения горизонтального участка и первого наклонного участка определяется по выражению:

$$I_{S1} = \frac{I_{D0}}{k_{T1}}. \quad (6)$$

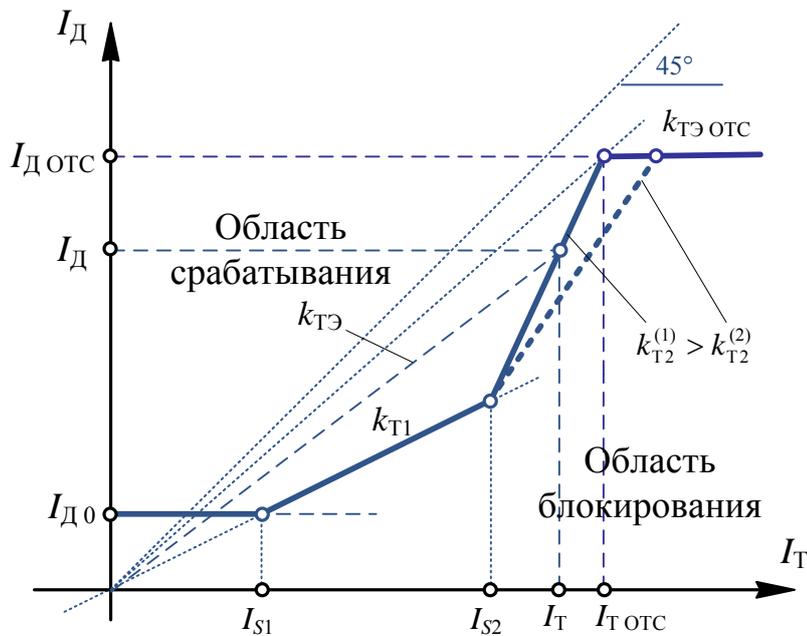


Рис. 9 – Характеристика срабатывания ДЗЛ

Второй наклонный участок характеристики определяется двумя уставками:

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

k_{T2} - коэффициентом торможения 2-го участка характеристики.

Для каждой точки на 2-м участке характеристики можно рассчитать эквивалентный коэффициент торможения $k_{TЭ}$, величина которого зависит от нескольких параметров и может быть рассчитана по формуле:

$$k_{TЭ} = k_{T2} + (k_{T1} - k_{T2}) \frac{I_{S2}}{I_T}. \quad (7)$$

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

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 $k_{TЭ} = k_{T1}$.

Коэффициент k_{T1} регулируется в пределах от 0,1 до 0,9. Коэффициент k_{T2} 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.

При превышении дифференциальным током величины $I_{D OTС}$, независимо от величины тормозного тока, происходит срабатывание ПО дифференциальной отсечки с действием на отключение. Уставка срабатывания ПО дифференциальной отсечки $I_{D OTС}$ регулируется в пределах от 2,0 о.е. до 40,0 о.е.

Величина тормозного тока I_T (рисунок 9) 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 10, отличающихся способом формирования тормозного тока:

- от суммы модулей векторов токов (рисунок 10 а):

$$I_{T(\Phi)} = |I_{\Phi}^A| + |I_{\Phi}^B|; \quad (8)$$

- от модуля разности векторов токов (рисунок 10 б)

$$I_{T(\Phi)} = |I_{\Phi}^A - I_{\Phi}^B|; \quad (9)$$

- с использованием специальной «секторной» характеристики (рисунок 10 в).

Примечание – На обоих полукомплексах ДЗЛ, защищающих линию, должен выбираться одинаковый тип характеристики (торможения).

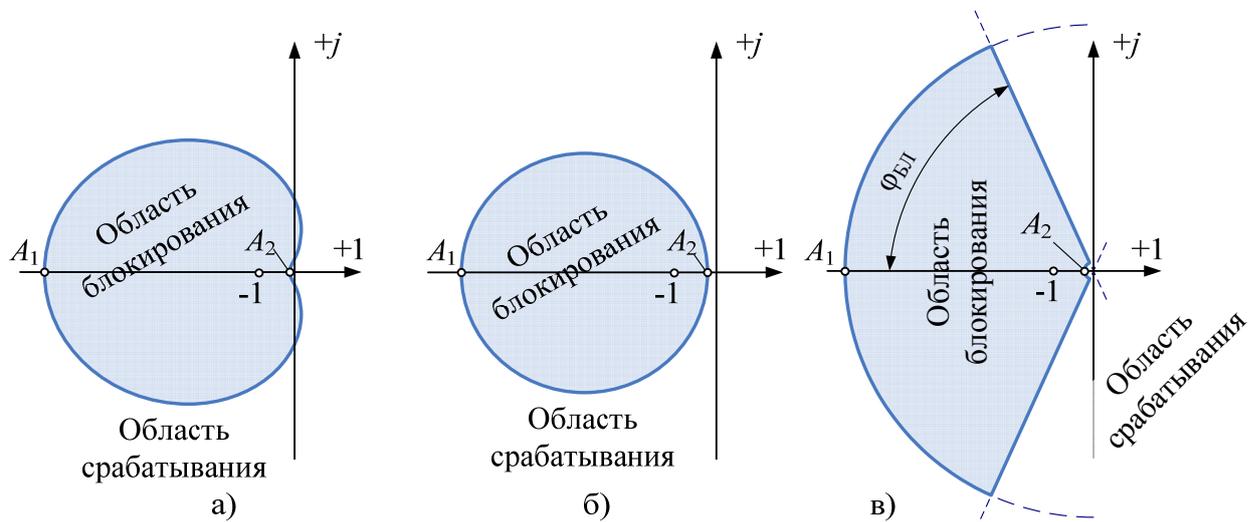


Рис. 10 – Характеристики блокирования ДЗЛ в комплексной плоскости:

а – «кардиоиды», 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 10 а). 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 10 б).

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 10 в) является независимость границ модуля отношения токов и угла блокирования. Границы по допустимой величине модуля отношений токов определяются коэффициентом торможения $k_{Т1}$, а по величине угла задается уставкой $\varphi_{БЛ}$.

При большой разнице 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 в данный момент времени коэффициентом торможения $k_{ТЭ}$:

$$A_1 = \frac{1 + k_{ТЭ}}{1 - k_{ТЭ}}, \quad A_2 = \frac{1}{A_1}. \quad (10)$$

В случае применения схемы с двумя выключателями используется только характеристика типа «кардиоида» и расчёт тормозного тока производится следующим образом:

$$I_{Т(Ф)} = |j_{В1Ф}^A| + |j_{В2Ф}^A| + |j_{В1Ф}^B| + |j_{В2Ф}^B|, \quad (11)$$

где индексы В1, В2 – обозначают принадлежность токов к цепям выключателя В1, В2.

Для защит линий напряжением 330 – 750 кВ, также используется только характеристика типа «кардиоида» и расчёт тормозного тока производится следующим образом:

$$I_{Т(Ф)} = |j_{В1Ф}^A| + |j_{В2Ф}^A| + |j_{РФ}^A| + |j_{В1Ф}^B| + |j_{В2Ф}^B| + |j_{РФ}^B|, \quad (12)$$

где индекс Р – обозначает принадлежность токов к цепям шунтирующего реактора.

Срабатывание дифференциальной защиты при использовании первых двух характеристик происходит при условии

$$I_D > \max(I_{Д0}, k_{ТЭ} \cdot I_T). \quad (13)$$

Для третьего типа характеристики условием срабатывания является соотношение $I_D > I_{Д0}$, а так же условие непопадания характеристической точки в область блокирования типа «сектор».

Примечание – Для характеристики типа «сектор» необходимо задать только $k_{Т1}$ 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 $\varphi_{\text{БЛ}}$, аналогично углу блокировки фазной характеристики дифференциально-фазной защиты. Принципиальное отличие в том, что угол зависит от соотношения векторов токов по концам линии (рисунок 11).

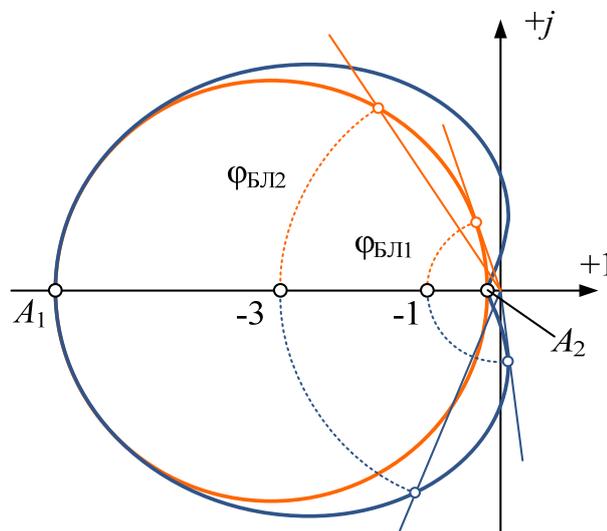


Рис. 11 – Угол блокировки при $k_{ТЭ} = 0,75$

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», для тех же условий, величины углов блокирования равны 97° и 80° , соответственно.

На рисунке 12 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 «сектор» имеет наибольшую площадь из всех, поэтому при её применении условия блокирования наилучшие, но условия действия на отключение несколько ухудшаются. Применение такой характеристики блокирования может быть рекомендовано при ожидаемом сильном насыщении ТТ.

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.

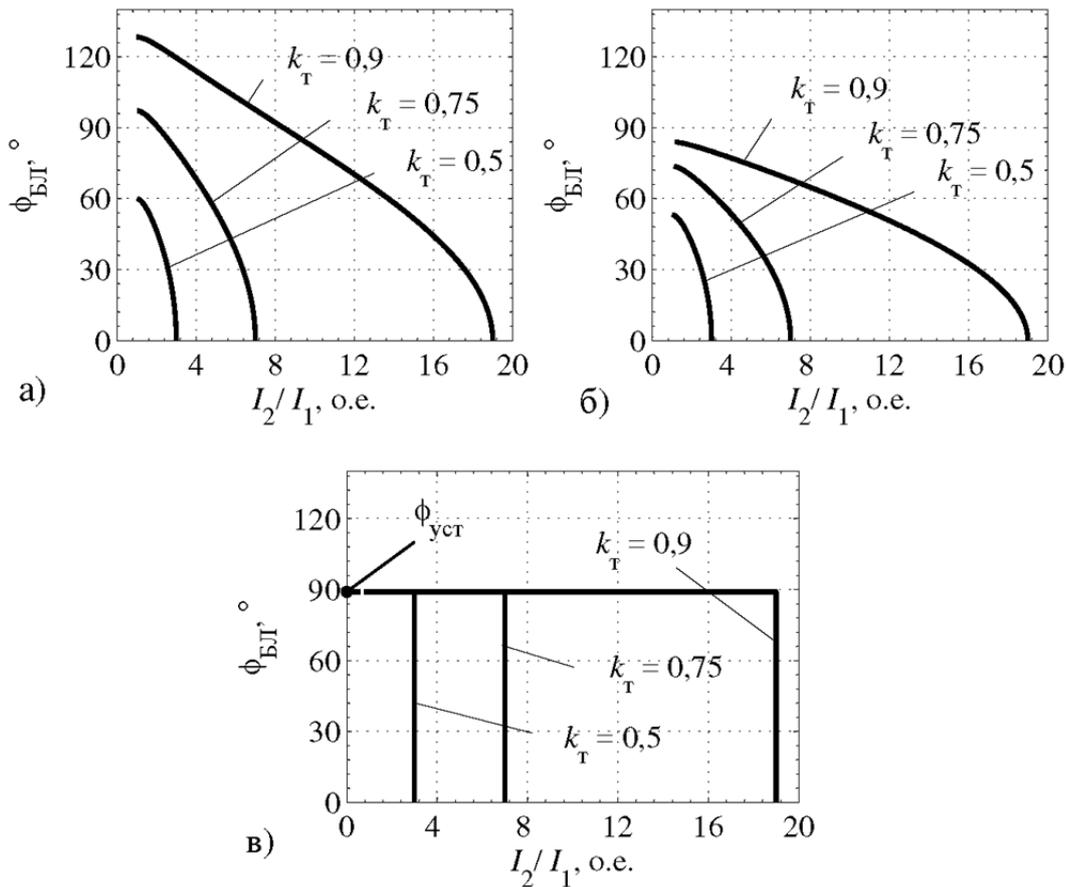


Рис. 12 – Взаимосвязь между максимумом отношения токов по концам защищаемой линии и предельным углом между ними, при котором происходит блокирование ДЗЛ:

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

2 Определение параметров ДЗЛ

При расчете уставок ДЗЛ необходимо выбрать следующие параметры:

- величину базисного тока I_B ;
- начальный ток срабатывания дифференциальной защиты $I_{Д0}$;
- ток срабатывания дифференциальной токовой отсечки $I_{Дотс}$;
- коэффициенты торможения $k_{Т1}$, $k_{Т2}$ и точку начала торможения I_{S2} для 2-го участка.

Примечание – для обоих полукомплектов ДЗЛ, защищающих линию, должны выбираться одинаковые уставки.

2.1 Выбор базисного тока

Задание величины базисного тока необходимо для правильного суммирования токов во вторичных величинах при разных коэффициентах трансформации ТТ по концам линии. Базисный ток задается в первичных величинах и может быть выбран равным первичному номинальному току ТТ, либо максимальному нагрузочному току. В устройствах ДЗЛ вторичный базисный ток 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 вторичные токи ТТ В1 и В2 к одному масштабу.

Для ДЗЛ линий с 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 В1.

Если на линии установлены ТТ с различным первичным номинальным током, то следует выбрать среднеарифметическое значение номинальных токов обоих ТТ:

$$I_B = \frac{I_{ТТ ПСА} + I_{ТТ ПСБ}}{2}, \quad (14)$$

где I_B – базисный ток,

$I_{ТТ ПСА}$ и $I_{ТТ ПСБ}$ – номинальный первичный ток ТТ цепи В1 на ПС А и ПС Б (рисунок 1).

В первичных величинах базисный ток должен задаваться одинаковым для обоих полукомплектов.

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

Пример

Подстанция А. Трансформатор тока цепи выключателя В1 имеет коэффициент трансформации 1000/1, трансформатор тока цепи выключателя В2 - 800/5 (рисунок 1 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 $1200/1000 = 1,2 < 2$

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

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

Рассчитываем базисный ток:

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

Выбираем значение $I_B = 1100 \text{ А}$.

2.2 Выбор начального тока срабатывания дифференциальной защиты

Уставку по начальному току срабатывания ДЗЛ $I_{Д0}$ 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;

- 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 ёмкостный ток и несимметричность каналов связи в случае использования для их организации мультиплексоров.

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

Ёмкостный ток компенсируется включением режима компенсации с корректно заданными параметрами линии по проводимости b_1 , b_0 и полной длине L_L . Следует ЭКРА.650323.037Д7

учитывать, что при неисправностях в цепях напряжения измерительных трансформаторов напряжения (ТН) происходит автоматическое отключение компенсации ёмкостного тока в том полуккомплекте, 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:

$$I_{НБ} = \frac{1}{I_B} \cdot \left[(2 \cdot \varepsilon + 2 \cdot \varepsilon_{изм} + \delta_{КС}) \cdot I_{РАБ\ МАКС} + \sum I_{ОТВ} + \frac{I_{\dot{E}МК}}{2} \right], \quad (15)$$

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 полуккомплектов ДЗЛ, $\varepsilon_{изм} = 0,01$,

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

$I_{\dot{E}МК}$ – расчётный ёмкостный ток линии, А (в первичных величинах),

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

Погрешность ТТ ε для ТТ класса 5Р и 10Р нормируется при токе, равном номинальному. Если величина тока $I_{РАБ\ МАКС} > 2 \cdot I_{НОМ\ ТТ}$, то погрешность ТТ ε необходимо увеличить в 1,5 раза. Если величина тока $I_{РАБ\ МАКС} < I_{НОМ\ ТТ}$, то в расчёте необходимо принять $I_{РАБ\ МАКС} = I_{НОМ\ ТТ}$.

Ёмкостный ток линии в симметричном режиме рассчитывается по формуле:

$$I_{\dot{E}МК} = b_1 \cdot L_L \cdot U_{\Phi}, \quad (16)$$

где b_1 – удельная поперечная проводимость линии по прямой последовательности,

L_L – длина линии,

U_{Φ} – номинальное фазное напряжение.

При включенном режиме компенсации ёмкостного тока линии составляющая небаланса $I_{\dot{E}МК}$ близка к нулю. При неисправности в цепях напряжения ДЗЛ на одном конце линии эта составляющая небаланса в дифференциальном равна $I_{\dot{E}МК}/2$. Если компенсация ёмкостного тока в защите не предусматривается, то эта составляющая небаланса должна быть увеличена в два раза.

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

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

$$\delta_{\text{КС}} = 2 \cdot \sin\left(\frac{\varphi_{\text{КС}}}{2}\right), \quad (17)$$

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

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

$$\Delta t_{\text{КС}} = \frac{t_{(+)} - t_{(-)}}{2}. \quad (18)$$

Дополнительный сдвиг фаз между токами плеч ДЗЛ, согласно (5), 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. Допустимая величина компенсации времени асимметрии ± 500 мкс. В этом случае величина небаланса $\delta_{\text{КС}}$ определяется нестабильностью времени асимметрии КС, зависящей от применяемой аппаратуры мультиплексирования и режимов ее работы. Предельно допустимая нестабильность времени асимметрии КС, не должна превышать ± 250 мкс. При этом максимально возможный дополнительный сдвиг фаз токов по концам линии не превышает 4.5° , а $\delta_{\text{КС}} \leq 0,078$ 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:

$$I_{\text{Д0}} = \frac{K_{\text{ОТС}} \cdot I_{\text{НБ}}}{K_{\text{В}}}, \quad (20)$$

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 $I_{Д0}$ может задаваться в широких пределах, но при этом необходимо, в соответствии с пунктом 3.2.21 ПУЭ [3], обеспечить коэффициент чувствительности не менее двух 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 рассчитывается по формуле:

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{КЗ МИН}}}{I_{\text{Д0}} \cdot I_{\text{Б}}}, \quad (21)$$

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

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

$$I_{\text{Д0}} = \frac{I_{\text{КЗ МИН}}}{2 \cdot I_{\text{Б}}}. \quad (22)$$

Если при этом выполняется условие:

$$I_{\text{Д0}} \geq \frac{1,2 \cdot I_{\text{РАБ МАКС}}}{I_{\text{Б}}}, \quad (23)$$

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

2.3 Выбор уставок дифференциальной токовой отсечки

В ДЗЛ предусмотрена дифференциальная токовая отсечка (ДТО). Построена на основе трёх 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 модуля дифференциального тока заданного порога:

$$I_{\text{Д}} \geq I_{\text{Д ОТС}}.$$

Порог срабатывания регулируется в пределах от 2,0 до 40,0 о.е. Срабатывает с выдержкой времени, регулируемой в диапазоне от 0,0 до 2,0 с.

Ток срабатывания ДТО определяется по выражению

$$I_{\text{Д ОТС}} = \frac{K_{\text{ОТС}} \cdot I_{\text{НБ КЗ ВНЕШ МАКС}}}{I_{\text{Б}}}, \quad (24)$$

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

$I_{\text{НБ КЗ ВН МАКС}}$ – 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 гармонике 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):

$$K_S = \frac{I_1}{n_{\text{НОМ}} \cdot I_2}. \quad (25)$$

На рисунке 6 максимальный коэффициент искажений равен 3,6, а на рисунке 7 – 5,3.

Значение тока небаланса в выражении (24) можно определить исходя из коэффициента искажения формы тока K_S при насыщении ТТ одного из полуккомплектов ДЗЛ и из конкретного фазового сдвига между первичным и вторичным током ТТ - $\Delta\varphi_S$:

$$I_{\text{НБ КЗ ВНЕШ МАКС}} = I_{\text{КЗ ВНЕШ МАКС}} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{K_S} \cdot \left(\frac{1}{K_S} - 2 \cdot \cos(\Delta\varphi_S) \right)}, \quad (26)$$

где $I_{\text{КЗ ВН МАКС}}$ – 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 и максимального тока внешнего КЗ (в относительных единицах) по рисункам 13 а - 15 а.

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

$$I_{\text{КЗ}}^* = \frac{I_{\text{КЗ ВНЕШ МАКС}}}{I_{\text{НОМ ТТ}}}, \quad (27)$$

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

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

$$I_{\text{Д ОТС}} = \frac{K_{\text{ОТС}} \cdot K_{\text{БТНТ}} \cdot I_{\text{НОМ}}}{I_{\text{Б}}}, \quad (28)$$

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

$K_{\text{БТНТ}}$ – кратность броска тока намагничивания, принимается равной 6,5 [2];

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

Если указанное условие не выполняется, то значение уставки тока срабатывания ДТО принимается не по выражению (24), а по (28).

2.4 Определение параметров характеристики срабатывания ДЗЛ

В соответствии с пунктом 3.2.21 ПУЭ [3], 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 (13) $k_{\text{ТЭ}} \leq 0,5$.

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 котором 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 $K_{\text{С}}$), значение тормозной величины во вторичных величинах токов 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 $k_{\text{ТЭ}} = k_{\text{Т1}} = 0,5$. Следует отметить, что закон изменения тормозной величины зависит от используемого принципа торможения, что и отражено в номограммах на рисунке 17. На рисунке 17 величины отложенные по осям абсцисс и ординат: $K_{\text{СД}}$ – коэффициент искажения дифференциального тока, $K_{\text{СТ}}$ – коэффициент искажения тормозного тока.

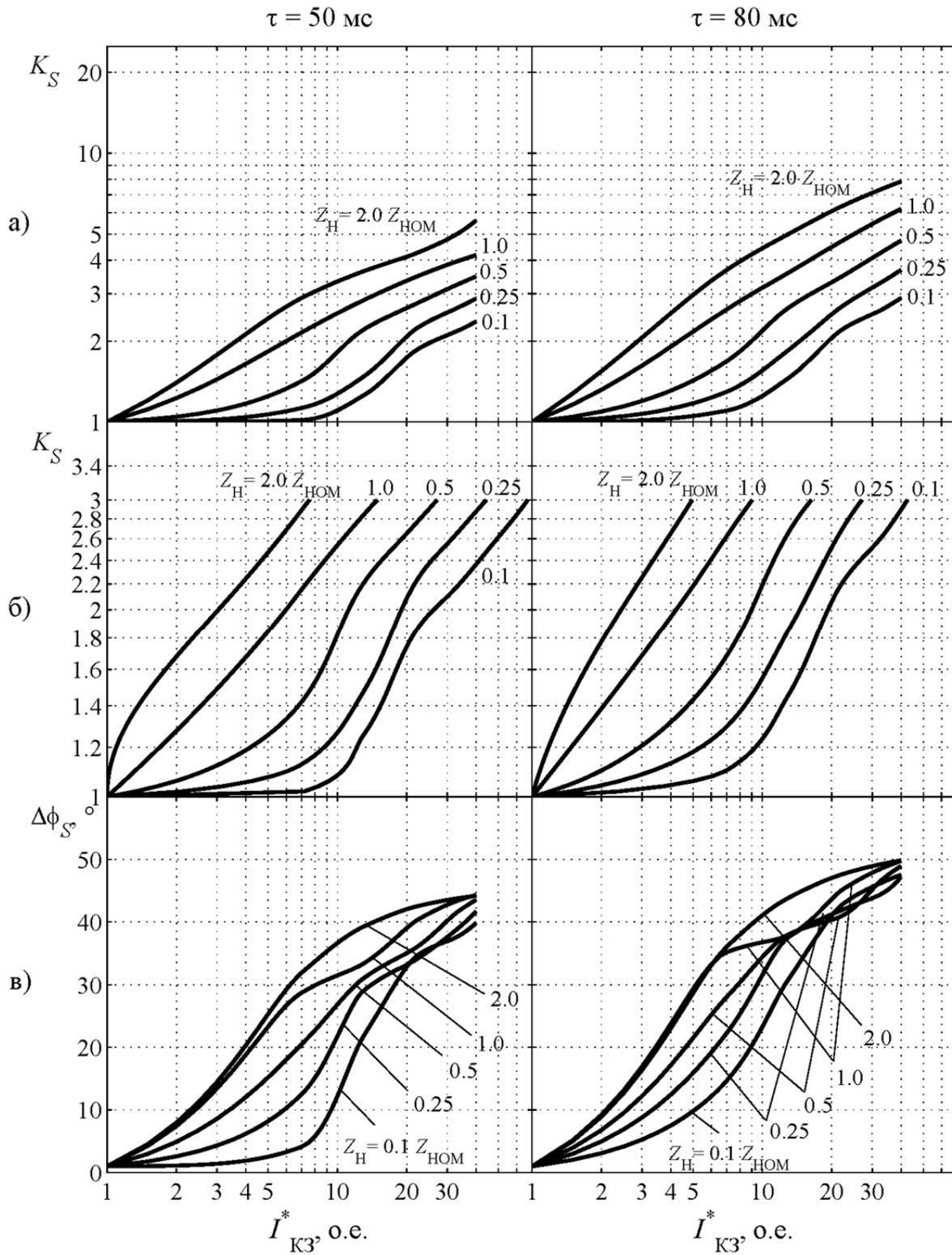


Рис. 13 – Зависимость коэффициента искажения K_S и отклонения угла $\Delta\phi_S$ между векторами первичного и вторичного тока ТТ от тока КЗ для разных значений постоянной времени ($\tau = 50 \text{ мс}$ и 80 мс) и вторичной нагрузки ТТ при $\cos(\varphi) = 0,8$

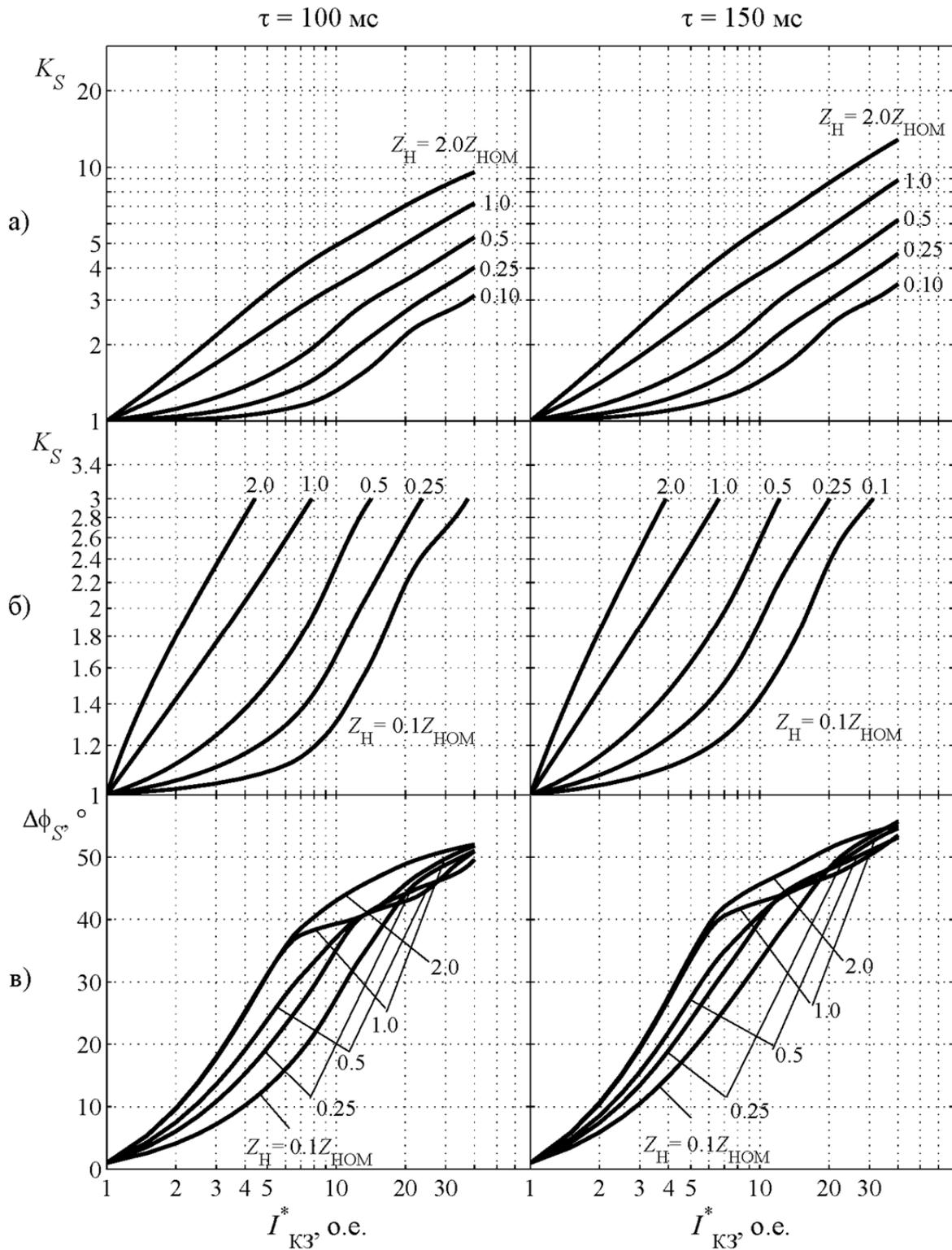


Рис. 14 – Зависимость коэффициента искажения K_S и отклонения угла $\Delta\phi_S$ между векторами первичного и вторичного тока ТТ от тока КЗ для разных значений постоянной времени ($\tau = 100$ мс и 150 мс) и вторичной нагрузки ТТ при $\cos(\varphi) = 0,8$

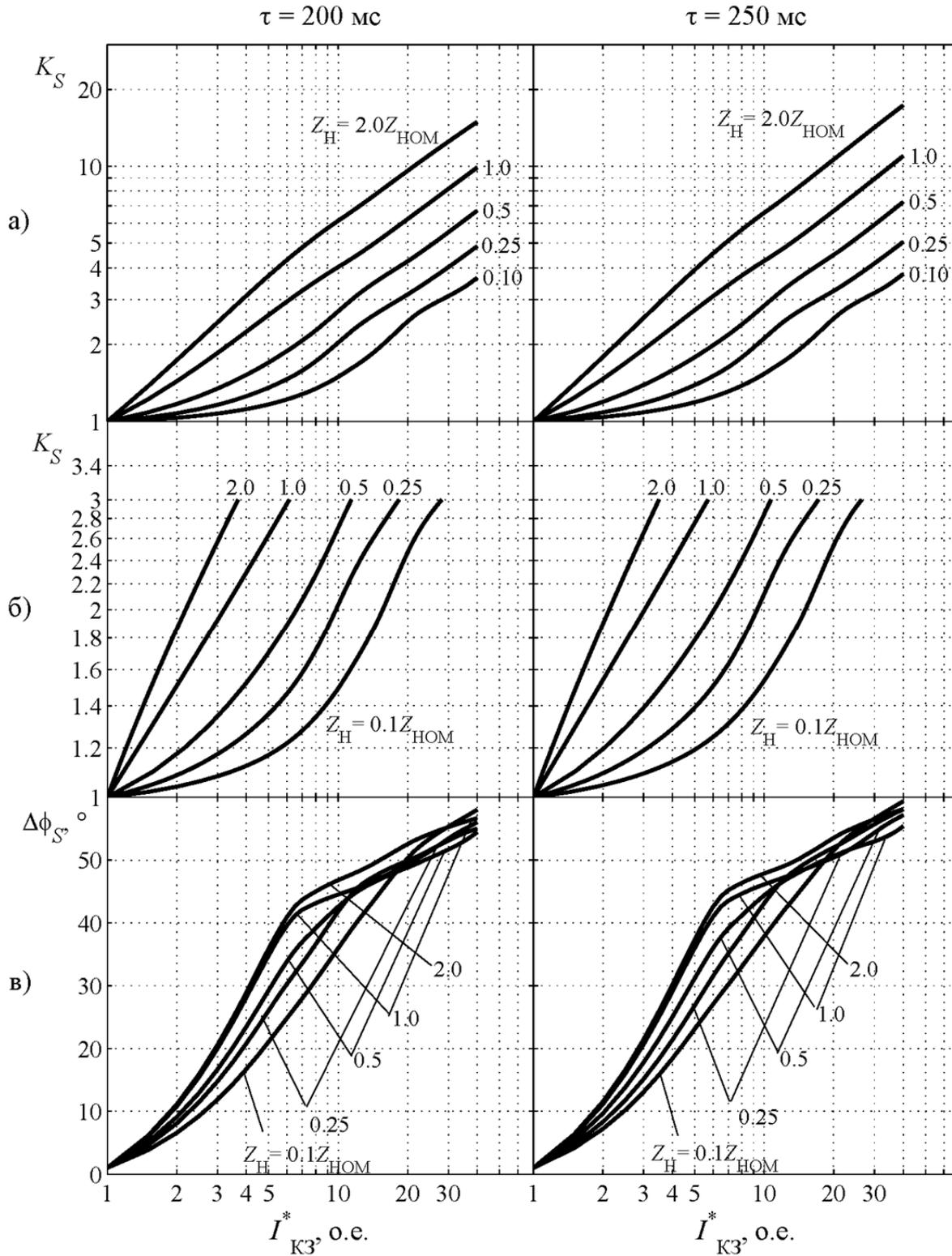


Рис. 15 – Зависимость коэффициента искажения K_S и отклонения угла $\Delta\phi_S$ между векторами первичного и вторичного тока ТТ от тока КЗ для разных значений постоянной времени ($\tau = 200$ мс и 250 мс) и вторичной нагрузки ТТ при $\cos(\varphi) = 0,8$

Задав значение тока КЗ $I_{КЗ}^*$ (в относительных единицах от номинального тока ТТ), постоянную времени затухания апериодической составляющей, вторичную нагрузку ТТ, по кривым на рисунках 13 - 15 определить величину коэффициента искажения вторичного тока K_S и максимальное отклонение угла $\Delta\varphi_S$ между векторами первичного и вторичного тока ТТ.

По сетке номограмм (рисунок 17) следует определить, находится ли полученное значение K_S и максимальное отклонение угла $\Delta\varphi_S$ ниже линии, соответствующей коэффициенту торможения $k_{Т1} = 0,5/1,2 = 0,417$. При этом дополнительно необходимо проверить не превышает ли значение угла $\Delta\varphi$ его предельного значения по рисунку 16. Точка с координатами $A(K_S; \Delta\varphi_S)$, определенная по рисункам 13 - 15, должна лежать ниже кривой изображенной на рисунке 16.

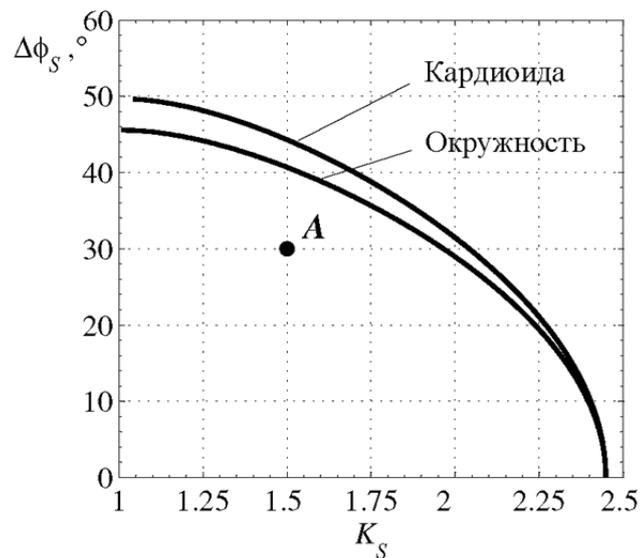
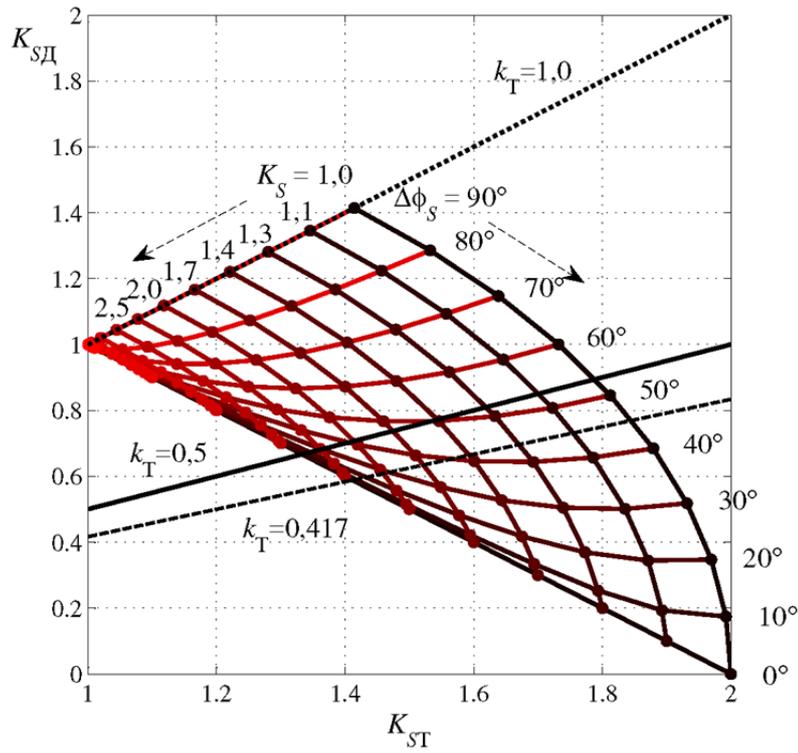
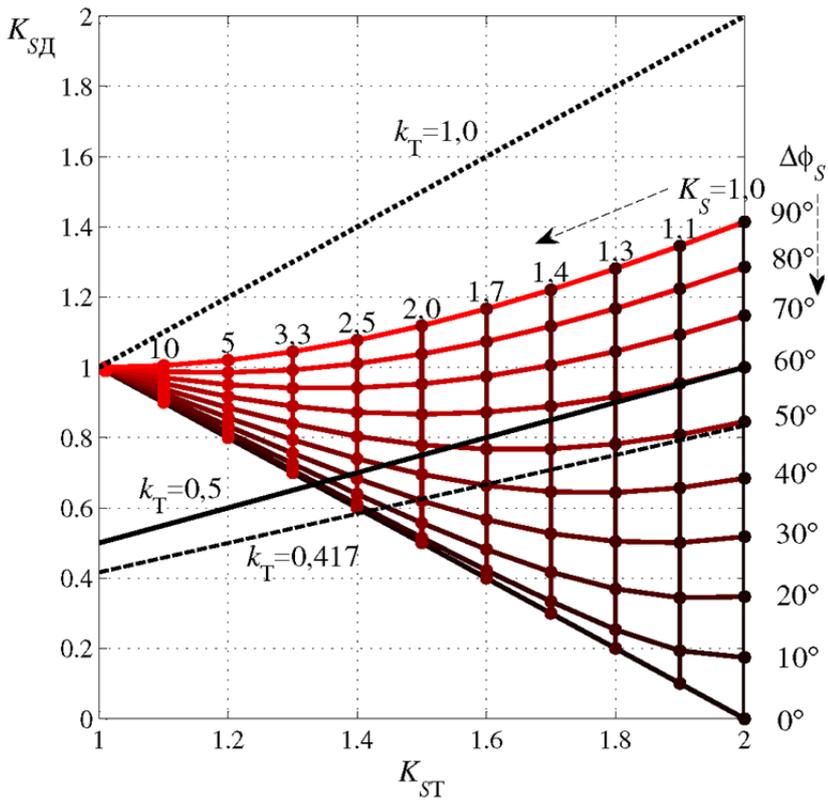


Рис. 16 – Зависимость предельного максимального отклонения угла $\Delta\varphi$ между векторами первичного и вторичного тока ТТ в зависимости от коэффициента искажения K_S при значении коэффициента торможения $k_{Т1} = 0,5/1,2 = 0,417$.



а)



б)

Рис. 17 – Номограммы искажения дифференциальной и тормозной величин

а) торможение от разности векторов токов

б) торможение от суммы модулей токов

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 $\Delta\varphi$ между векторами первичного и вторичного тока ТТ находятся наиболее близко к линии $k_T = 0,417$ (рисунок 17). Полученное значение тока КЗ $I_{КЗ}^*$ необходимо использовать для определения величины уставки I_{S2} .

Далее по номограммам рисунка 17 определяется коэффициент искажения тормозного тока $K_{СТ}$ и рассчитывается значение уставки I_{S2} :

$$I_{S2} = \frac{K_{СТ} \cdot I_{КЗ}^* \cdot I_{НОМ ТТ}}{I_B}, \quad (29)$$

где $K_{СТ}$ – коэффициент искажения тормозного тока,

$I_{КЗ}^*$ – ток внешнего КЗ, в относительных единицах, для которого определено значение K_S по рисункам 13 - 15,

$I_{НОМ ТТ}$ – номинальный ток рассматриваемого ТТ.

Для характеристики типа «кардиоида» коэффициент искажения тормозного тока $K_{СТ}$ может быть определен по формуле:

$$K_{СТ} = 1 + \frac{1}{K_S}. \quad (30)$$

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

$$K_{СТ} = \sqrt{1 + \frac{1}{K_S} \cdot \left(\frac{1}{K_S} + 2 \cdot \cos(\Delta\varphi_S) \right)}. \quad (31)$$

Величина коэффициента торможения $k_{Т2}$ выбирается исходя из условия, что при токе внешнего КЗ, соответствующем тормозному току $I_{Т ОТС}$ (рисунок 9), значение эквивалентного коэффициента торможения $k_{ТЭ ОТС}$ должно обеспечивать отстройку от излишних срабатываний ДЗЛ при насыщении ТТ. В тоже время, от величины коэффициента $k_{ТЭ ОТС}$ зависит коэффициент чувствительности при данном токе внутреннего КЗ.

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

Минимальное значение коэффициента $k_{ТЭ ОТС}$ для отстройки от внешних КЗ определяется по кривым на рисунке 18, исходя из значений K_S и $\Delta\varphi_S$, определенных для ДТО по небалансу при максимальном токе внешнего КЗ $I_{НБ КЗ ВНЕШ МАКС}$. 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 13 а - 15 а (см. раздел 2.3).

Для данных значений K_S и $\Delta\phi_S$ определяем значение $k_{ТЭ\text{ ОТС}}$, для чего на рисунке 18 выбираем ближайшую зависимость, охватывающую точку с координатами $(K_S, \Delta\phi_S)$.

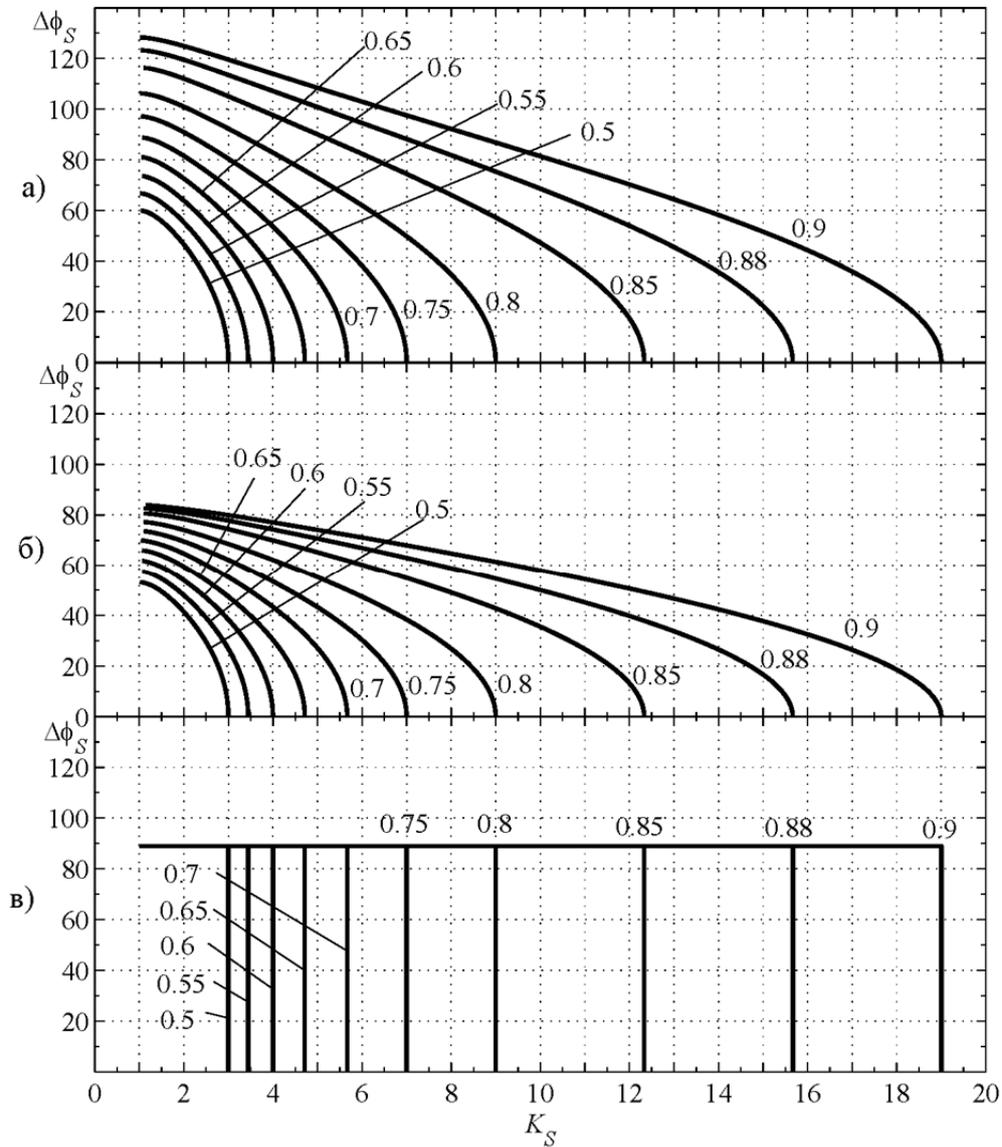


Рис. 18 – Взаимосвязь между максимумом отношения токов по концам защищаемой линии и предельным углом между ними, при котором происходит блокирование ДЗЛ:

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

Коэффициент торможения $k_{Т2}$ выбирается из диапазона от 0,3 до 3,0 о.е. и может быть рассчитан по формуле:

$$k_{Т2} = \frac{k_{ТЭ\text{ ОТС}} - k_{Т1} \frac{I_{S2}}{I_{Т\text{ ОТС}}}}{1 - \frac{I_{S2}}{I_{Т\text{ ОТС}}}}, \quad (32)$$

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

$$I_{T\text{отс}} = \frac{I_{D\text{отс}}}{k_{TЭ\text{отс}}}. \quad (33)$$

Примечание – 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 $k_{T1} = (0,3 - 0,5)$.

2.5 Выбор уставок органа контроля цепей тока

В ДЗЛ предусмотрен контроль исправности цепей переменного тока. Построен на основе трёх ПО, сравнивающих величины дифференциальных фазных токов I_D с порогом $I_{D\text{кцтуст}}$. Фазные ПО объединены по схеме «ИЛИ». Срабатывание ПО контроля токовых цепей происходит при превышении модуля дифференциального тока заданного порога

$$I_D \geq I_{D\text{кцтуст}}. \quad (34)$$

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:

$$I_{D\text{кцтуст}} = K_{\text{отс}} \cdot I_{\text{нб}}. \quad (33)$$

где $K_{\text{отс}}$ – коэффициент отстройки, принимается равным 1,5,

$I_{\text{нб}}$ – ток небаланса, рассчитывается по выражению (15).

Уставка по времени срабатывания выбирается исходя из длительности протекания тока КЗ. Его необходимо согласовать со временем отключения внешних КЗ.

2.6 Блокировка устройства при внешних КЗ

Устройство предназначено для блокирования быстродействующих защит, в том числе ДЗЛ. Необходимость блокировки возникает при протекании через трансформаторы тока двух выключателей сквозного тока внешнего КЗ (рисунок 1), вызывающего неодновременное насыщение трансформаторов и, как следствие, появление значительного небаланса, который может привести к неправильной работе защит.

Орган блокировки выполнен пофазным. Формирование сигнала блокировки происходит тогда, когда оба подводимых тока превышают заданную величину уставки, а угол между векторами этих токов находится в пределах $180 \pm 90^\circ$ (рисунок 19).

Для использования данного органа необходимо в пункте меню терминала выставить программируемую накладку **Блокировка при внешних КЗ / Логика работы / Блокировка при внешних КЗ** в положение предусмотрена или из программы мониторинга – **Блокировка при внешних КЗ / Логика работы / Блокировка при внешних КЗ | предусмотрена**.

Уставка срабатывания по току отстраивается от максимального сквозного тока нагрузки протекающего в нормальной и ремонтной схеме через ТТ двух выключателей (рисунок 1). Ремонтная схема (ремонтный режим) – схема присоединения ВЛ к шинам, в которой один или несколько элементов отключены для проведения планового ремонта. В случае большой разницы величин токов в нормальной и ремонтной схеме рекомендуется использовать отдельные группы уставок.

Если в ремонт выводится цепь с трансформатором тока, задействованным в блокировке, либо в ремонтной схеме через оба трансформатора тока протекает один и тот же ток, то блокировку следует вывести из работы переведя программную накладку в пункте меню терминала **Блокировка при внешних КЗ / Логика работы / Блокировка при внешних КЗ** в положение **не предусмотрена** или в программе мониторинга – **Блокировка при внешних КЗ / Логика работы / Блокировка при внешних КЗ | не предусмотрена**.

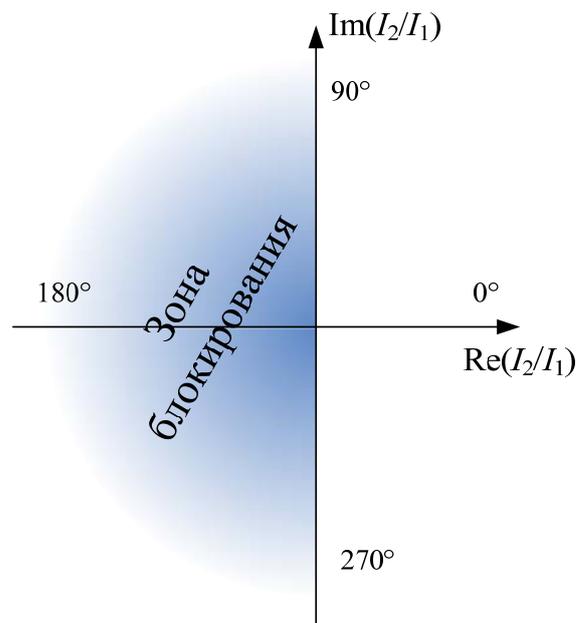


Рисунок 19 – Характеристика срабатывания органа блокировки

Уставка по времени блокировки выбирается исходя из времени отключения внешнего повреждения соответствующими защитами. Время блокировки задает выдержку времени для ограничителя длительности сигнала, поэтому в случае исчезновения условий срабатывания по модулю или углу тока, орган блокировки вернется в несработавшее состояние без задержки.

2.7 Совместная работа полукомплектов ДЗЛ различных серий

В случае, если на концах ВЛ установлены полукомплекты ДЗЛ различных серий х9х_2хх, х9х_3хх, х9х_4хх, необходимо обеспечение совместимости работы. Возможность обеспечения совместимости различных версий ПО должно быть обязательно согласовано в службе поддержки разработчика: www.ekra.ru, support@ekra.ru, ekra@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: х9х_2хх и х9х_3хх, или х9х_2хх и х9х_4хх программная накладка «совместная работа с пред. ДЗЛ», должна быть установлена в положение «предусмотрена».

2.8 Пример расчета

На линии 500 кВ ВЛ в качестве основной защиты установлена дифференциальная защита линии (рисунок 1 а). Исходные данные для расчета приведены в таблице 1.

Таблица 1

Группа параметров	Наименование параметра	Значение
Режим	Максимальный ток внешнего КЗ	50,5 кА
	Максимальный рабочий ток	1800 А
	Минимальный ток КЗ в зоне работы ДЗЛ	2,6 кА
	Ёмкостный ток	300 А
	Постоянная времени первичной цепи	50 мс
	Длина линии	200 км
Параметры ТТ	Коэффициент трансформации	2000/1
	Класс точности	10Р
	Номинальная предельная кратность	25
	Номинальная вторичная нагрузка	40 ВА
	Сопrotивление обмотки	0,4 Ом
	Сопrotивление нагрузки	30 Ом

Трансформаторы напряжения на ПС А и ПС Б одинаковые, установлены на шинах и имеют коэффициент трансформации для цепи «звезда» 500 кВ / 100 В в масштабе линейных величин или 289 кВ / 57 В в масштабе фазных величин. Для цепи «открытый треугольник», соответственно, коэффициент трансформации равен 500 кВ / 173 В в масштабе линейных величин или 289 кВ / 100 В в масштабе фазных величин.

Защита работает в режиме с торможением от суммы модулей векторов токов «кардиоида». Цифровые каналы связи организованы с применением мультиплексоров, при этом гарантированная асимметрия КС составляет 200 мкс.

Базисный ток

Базисный ток (14) выбираем как среднеарифметическое значение номинальных токов

ТТ:

$$I_B = \frac{I_{ТТ ПС А} + I_{ТТ ПС Б}}{2} = 2000 \text{ А.}$$

Базисный ток должен быть одинаковым для обоих полукомплектов в первичных величинах.

Ток срабатывания ДЗЛ

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

Определим по формулам (5) и (17) небаланс при несимметрии КС равной 200 мкс:

$$\begin{aligned} \varphi_{КС} &= \Delta t_{КС} \cdot 18 \cdot 10^{-3} = 200 \cdot 18 \cdot 10^{-3} = 3,6^\circ, \\ \delta_{КС} &= 2 \cdot \sin(\varphi_{КС}/2) = 2 \cdot \sin(1,8^\circ) = 0,063 \text{ о. е.} \end{aligned}$$

Общий небаланс от всех составляющих факторов, согласно (15), будет:

$$\begin{aligned} I_{НБ} &= \frac{1}{I_B} \cdot \left[(2 \cdot \varepsilon + 2 \cdot \varepsilon_{ИЗМ} + \delta_{КС}) \cdot I_{РАБ МАКС} + \sum I_{ОТВ} + \frac{I_{\dot{E}MK}}{2} \right] = \\ &= \frac{1}{2000} \cdot \left[(2 \cdot 0,03 + 2 \cdot 0,01 + 0,063) \cdot 2000 + 0 + \frac{300}{2} \right] = \\ &= 0,06 + 0,02 + 0,063 + 0,075 = 0,218 \text{ о. е.} \end{aligned}$$

Ток срабатывания (20) равен

$$I_{Д0} = \frac{K_{ОТС} \cdot I_{НБ}}{K_B} = \frac{2 \cdot 0,218}{0,9} = 0,484 \text{ о. е.}$$

Коэффициент чувствительности рассчитаем по формуле:

$$K_{Ч} = \frac{I_{КЗ МИН}}{I_{Д0} \cdot I_B} = \frac{2600 \text{ А}}{0,484 \text{ о. е.} \cdot 2000 \text{ А}} = 2,686.$$

Коэффициент чувствительности $K_{Ч} > 2$, поэтому ограничим его до $K_{Ч} = 2$.

$$I_{Д0} = \frac{I_{КЗ МИН}}{K_{Ч} \cdot I_B} = \frac{2600 \text{ А}}{2 \cdot 2000 \text{ А}} = 0,65 \text{ о. е.}$$

Ток контроля токовых цепей найдем исходя из формулы (35)

$$I_{ДКЦТ УСТ} = K_{ОТС} \cdot I_{НБ} = 1,5 \cdot 0,218 = 0,327 \text{ о. е.}$$

Дифференциальный ток отсечки

Определим значение K_S по рисунку 13 при $\tau = 50 \text{ мс}$, $I_{КЗ ВН МАКС} = 50,5 \text{ кА}$, $Z_H = Z_{Н НОМ}$, для этого определим ток КЗ в относительных единицах:

$$I_{КЗ}^* = \frac{I_{КЗ ВНЕШ МАКС}}{I_{НОМ ТТ}} = \frac{50,5 \text{ кА}}{2000 \text{ А}} = 25,25 \text{ о. е.}$$

Определим значение K_S , для чего по горизонтальной оси отложим значение 25,25 о.е. и проведем вертикальную линию (рисунок 20). На рисунке 20 на пересечении с кривыми при $Z_H = 1,0 \cdot Z_{Н НОМ}$ находим значения $K_S = 3,65$, $\Delta\varphi_S = 41,54^\circ$.

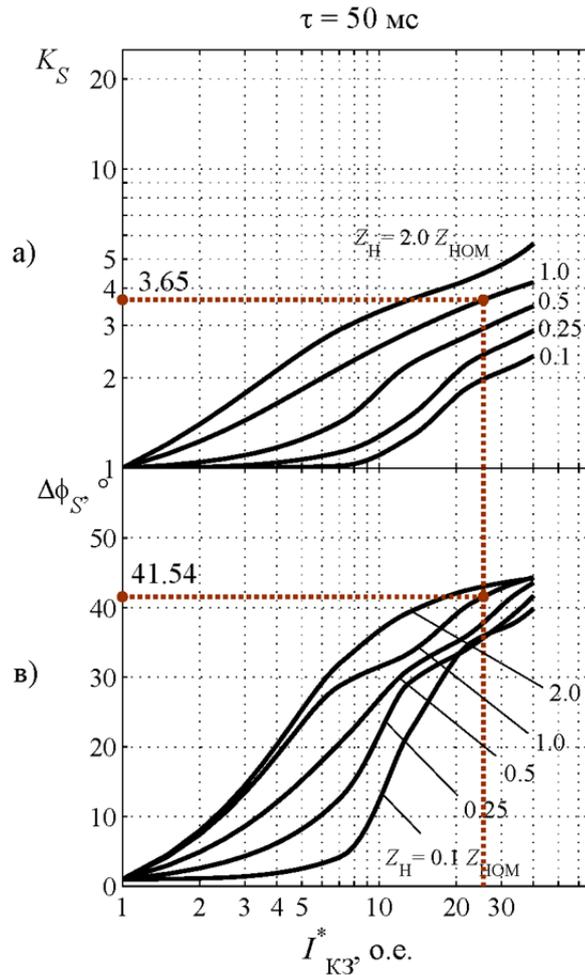


Рис. 20 – Определение значения коэффициента искажения K_S и отклонения угла $\Delta\varphi_S$ между векторами первичного и вторичного тока ТТ от тока КЗ для расчета уставки ДТО

Ток небаланса при внешнем КЗ с максимальным током КЗ согласно (31) равен

$$\begin{aligned}
 I_{\text{НБ КЗ ВНЕШ МАКС}} &= I_{\text{КЗ ВНЕШ МАКС}} \sqrt{1 + \frac{1}{K_S} \cdot \left(\frac{1}{K_S} - 2 \cdot \cos(\Delta\varphi_S) \right)} = \\
 &= 50500 \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{3,65} \cdot \left(\frac{1}{3,65} - 2 \cdot \cos(41,54^\circ) \right)} = 41180 \text{ А.}
 \end{aligned}$$

Ток срабатывания ДТО выбирается равным

$$I_{\text{Д ОТС}} = \frac{K_{\text{ОТС}} \cdot I_{\text{НБ КЗ ВНЕШ МАКС}}}{I_{\text{Б}}} = \frac{1,5 \cdot 41180 \text{ А}}{2000 \text{ А}} = 30,885 \text{ о. е.}$$

Выбор параметров наклонных участков характеристики срабатывания

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

Зададимся значением тока КЗ $I_{КЗ}^* = 8$ (примерно в 2 раза меньше тока внешнего КЗ). По рисунку 13 определим значение коэффициента искажения K_S , а также фазу тока $\Delta\varphi_S$. Вторичная нагрузка ТТ чуть меньше номинальной, следовательно принимаем расчетное значение $Z_H = Z_{H\text{НОМ}}$. По рисунку 21-1 получаем значения $K_S = 2,3$, $\Delta\varphi_S = 30^\circ$. Точка $A_1(2,3; 30)$ находится выше кривой $\Delta\varphi = f(K_S)$ (рисунок 22).

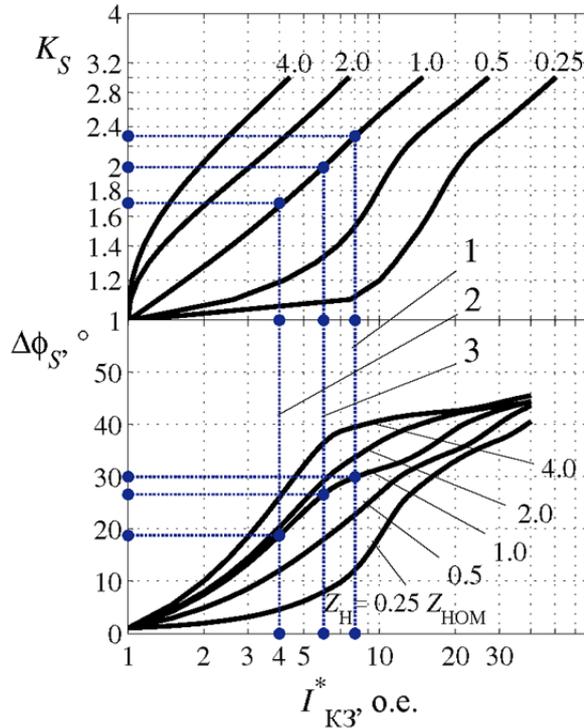


Рис. 21 – Итерационный подбор значения коэффициента искажения K_S и отклонения угла $\Delta\varphi_S$ между векторами первичного и вторичного тока ТТ от тока КЗ при $\tau = 50$ мс

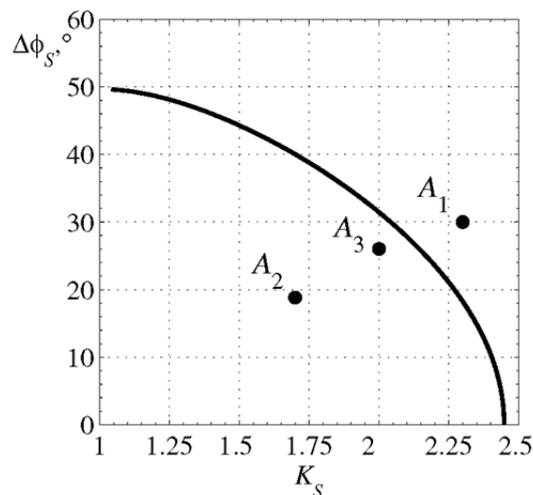


Рис. 22 – Зависимость предельного максимального отклонения угла $\Delta\varphi$ между векторами первичного и вторичного тока ТТ в зависимости от коэффициента искажения K_S при значении коэффициента торможения $k_{T1} = 0,5/1,2 = 0,417$.

Уменьшим исходное значение тока КЗ в 2 раза $I_{КЗ}^* = 4$, и повторим графические построения. По рисунку 21-2 получаем значения $K_S = 1,7$, $\Delta\phi_S = 18,5^\circ$. Полученная точка $A_2(1,7; 18,5)$ находится ниже кривой $\Delta\phi = f(K_S)$, но при этом удалена от границы предельных значений (рисунок 22).

Следовательно, увеличим значение тока КЗ в 1,5 раза $I_{КЗ}^* = 6$, и снова повторим графические построения. По рисунку 21-3 получаем значения $K_S = 2$, $\Delta\phi_S = 26^\circ$. Полученная точка $A_3(2; 26)$ находится ниже кривой $\Delta\phi = f(K_S)$, и при этом близко к границе предельных значений (рисунок 22).

Исходя из полученных итерационным подбором, данных определим коэффициент искажения тормозного тока $K_{СТ}$ по рисунку 17:

$$K_{СТ} = 1,5,$$

и находится эта точка ниже линии $k_T = 0,417$, тем самым обеспечивая необходимый запас по отстройке от насыщения ТТ (рисунок 23).

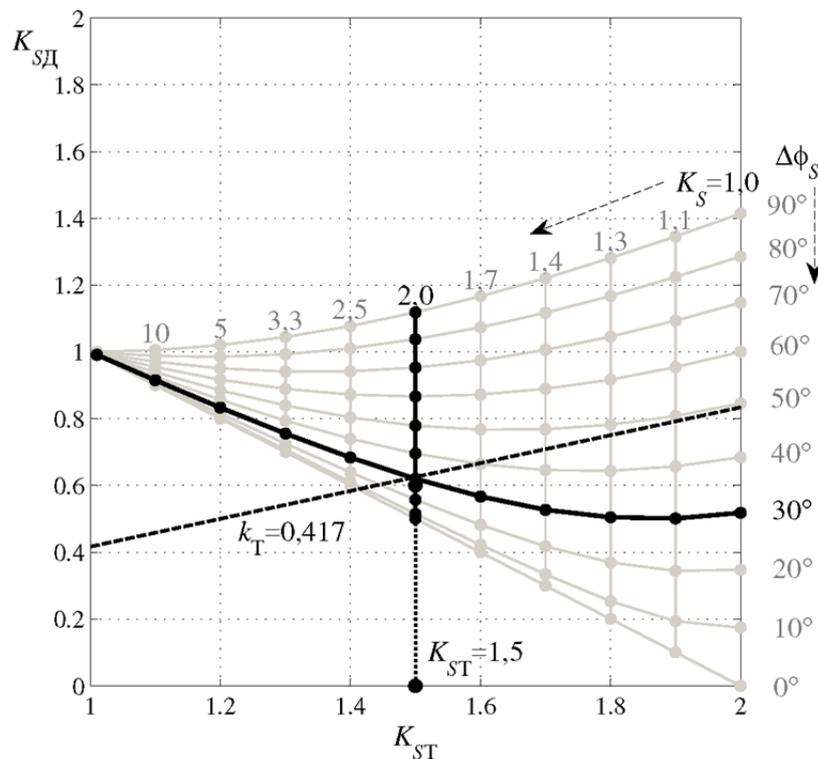


Рис. 23 – Определение коэффициента искажения тормозного тока

Определим ток начала торможения I_{S2} :

$$I_{S2} = \frac{K_{СТ} \cdot I_{КЗ}^* \cdot I_{НОМ\ ТТ}}{I_B} = \frac{1,5 \cdot 6 \cdot 2000}{2000} = 9 \text{ о. е.}$$

Определим коэффициент торможения $k_{ТЭ\ ОТС}$ по данным рисунка 20: $K_S = 3,65$, $\Delta\phi_S = 41,54^\circ$. Построения представлены на рисунке 24 - $k_{ТЭ\ ОТС} = 0,7$.

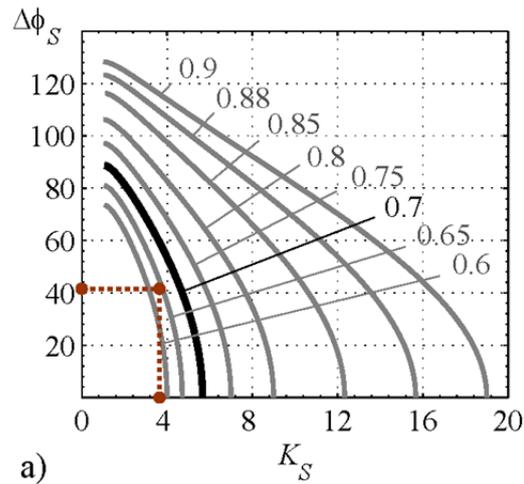


Рис. 24 – Взаимосвязь между максимумом отношения токов по концам защищаемой линии и предельным углом между ними, при котором происходит блокирование ДЗЛ, для характеристики «кардиоида»

Коэффициент торможения $k_{Т2}$ выбирается из диапазона от 0,3 до 3,0 о.е. и может быть оценен по формуле

$$k_{Т2} = \frac{k_{ТЭ\text{ отс}} - 0,5 \frac{I_{S2}}{I_{Т\text{ отс}}}}{1 - \frac{I_{S2}}{I_{Т\text{ отс}}}} = \frac{0,7 - 0,5 \frac{9}{44,121}}{1 - \frac{9}{44,121}} = \frac{0,7 - 0,102}{1 - 0,204} = 0,75,$$

при этом предельный тормозной ток равен

$$I_{Т\text{ отс}} = \frac{I_{Д\text{ отс}}}{0,7} = \frac{30,885}{0,7} = 44,121 \text{ о. е.}$$

Зададим уставки для полукомплекта ДЗЛ подстанции А согласно таблиц 2 и 3.

Таблица 2

Наименование величин	Значения
Первичная величина датчика аналогового входа Ia B1, А	2000
Вторичная величина датчика аналогового входа Ia B1, А	1
Первичная величина датчика аналогового входа Ia B2, А	2000
Вторичная величина датчика аналогового входа Ia B2, А	1
Первичная величина датчика аналогового входа Ua, кВ	500
Вторичная величина датчика аналогового входа Ua, В	100
Первичная величина датчика аналогового входа Уни, кВ	500
Вторичная величина датчика аналогового входа Уни, В	173,2

Таблица 3

Наименование величин	Значения
Базисный ток, А	2000
Характеристика торможения	кардиоида
Иср ПО ДЗЛ (Id0), о.е.	0,65
Коэффициент торможения дифф. защиты K1	0,5
Коэффициент торможения дифф. защиты K2	0,75
Ток начала торможения Is2, о.е.	9,0
Компенсация емкостного тока	Предусмотрена
Иср ПО ДТО, о.е.	30,9
Иср ПО контроля обрыва цепей тока, о.е.	0,33

Приложение А (рекомендуемое). Удельные параметры ВЛ

Таблица А.1

Марка провода	Число проводов в фазе	Удельная проводимость, мкСим	
		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

Список литературы

1 Шкаф дифференциальной защиты линии типа ШЭ2607 091. Руководство по эксплуатации. ЭКРА.656453.126 РЭ. [Текст] – Чебоксары: ООО НПП «ЭКРА», 2008.

2 Учёт переходных процессов при выборе параметров времяимпульсных дифференциальных защит трансформаторов. [Текст] / А.М. Дмитренко // Электричество. - 1995, №1. – С. 28 – 33.

3 Правила устройства электроустановок. Шестое издание, дополненное с исправлениями. [Текст]: ПУЭ: утв. М-вом энергетики Рос.Федерации 08.06.02: введ. в действие с 01.01.03.

4 Афанасьев В.В. Трансформаторы тока. [Текст] / В.В. Афанасьев. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 416 с.

5 Трансформаторы тока. Общие технические условия. [Текст]: ГОСТ 7746-2015. – Введ. 2017-03-01. – М.: Стандартинформ, 2016.

6 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.

7 Казанский В.Е. Трансформаторы тока в устройствах релейной защиты и автоматики. [Текст] / В.Е. Казанский – М.: Энергия, 1978. – 264 с.

8 Соединения контактные электрические. Классификация. Общие технические требования. [Текст]: ГОСТ 10434-82. – Введ. 83-01-01. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам. Издательство стандартов., 1982.

9 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.

10 Соединения контактные электрические. Приемка и методы испытаний. [Текст]: ГОСТ 17441-84. – Введ. 86-01-01. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам. Издательство стандартов., 1984.

11 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.

12 Методические указания по выбору параметров срабатывания дифференциально-фазной и высокочастотной микропроцессорных защит сетей 220 кВ и выше, устройств АПВ сетей 330 кВ и выше производства ООО НПП «ЭКРА». [Текст]: СТО 56947007-29.120.70.032-2009. – Изд. июнь. 2009. Введ. 04.06.2009.

Принятые сокращения

ВЛ – воздушная линия электропередачи;

ДЗЛ – дифференциальная защита линии;

ДТО – дифференциальная токовая отсечка;

ИО – измерительный орган (реагирует на несколько подведенных величин);

КЗ – короткое замыкание;

КС – канал связи;

ОВТ – отношение векторов тока;

ПО – пусковой орган (реагирует на одну подведенную величину);

ПС – подстанция;

ПУЭ – правила устройств электроустановок;

ТН – трансформатор напряжения;

ТТ – трансформатор тока;

ЭДС – электродвижущая сила.

