

Анализ мероприятий, исключающих неселективные действия дифференциальных защит сборных шин при внешних двухфазных коротких замыканиях с насыщением трансформаторов тока, включённых в неповреждённую фазу

- Кужеков С. Л.¹, доктор техн. наук, ООО НПФ “Квазар”, Новочеркасск
- Дегтярев А. А., канд. техн. наук, ООО НПФ “Квазар”, Новочеркасск
- Дони Н. А., канд. техн. наук, ООО НПФ “ЭКРА”, Чебоксары
- Костарев Л. Н., ООО НПФ “ЭКРА”, Чебоксары
- Федотов А. Ю., ООО НПФ “ЭКРА”, Чебоксары

Выполнен анализ неселективного срабатывания дифференциальной защиты сборных шин напряжением 110 кВ подстанции распределительной электрической сети в переходном режиме внешнего двухфазного короткого замыкания. Показано, что действие защиты обусловлено насыщением магнитопроводов трансформаторов тока класса Р, включённых в неповреждённых фазах. Проведён анализ способов обеспечения правильной работы защиты в рассмотренном режиме и предложены методики расчёта параметров защиты, при которых указанные способы работоспособны.

Ключевые слова: короткое замыкание, дифференциальная защита шин, трансформатор тока, переходный процесс, время до насыщения, неповреждённая фаза, нулевой проводник, выдержка времени.

Одними из основных источников информации для устройств релейной защиты и автоматики в электроэнергетической системе России являются электромагнитные трансформаторы тока (ТТ) класса Р, магнитопроводы которых не имеют немагнитного зазора. С появлением быстродействующих защит участились случаи неселективных действий дифференциальной защиты шин (ДЗШ), основных защит линий и быстродействующих ступеней резервных защит при коротких замыканиях (КЗ) на сборных шинах или вблизи сборных шин распределительных устройств крупных электростанций и подстанций сверхвысокого напряжения 330 – 750 кВ (СВН) по причине насыщения магнитопроводов ТТ. Указанные действия опасны по последствиям, так как они снижают запас динамической устойчивости электроэнергетической системы (ЭЭС) и уровень надёжности электроснабжения потребителей. Вследствие этого стандарты МЭК уделяют внимание условиям работы ТТ в переходных режимах [1, 2].

В [3] приведены результаты анализа неселективного действия ДЗШ при однофазном КЗ. Причиной неправильного срабатывания явилось насыщение магнитопроводов ТТ, включённых в цепь неповреждённой фазы, обусловленное напряжени-

ем на нулевых проводниках ТТ, соединённых в звезду. Указанное напряжение, приложенное к вторичной обмотке ТТ в неповреждённой фазе, может вызвать насыщение его магнитопровода. После насыщения последнего вторичный ток ТТ, включённого в цепь повреждённой фазы, распределяется между нулевым проводником и вторичной цепью ТТ в неповреждённой фазе. В результате возможно срабатывание пускового (ПО) и избирательных органов (ИО) ДЗШ.

Неселективное действие ДЗШ отмечено также в распределительной электрической сети напряжением 110 кВ в переходном режиме двухфазного КЗ вне зоны действия защиты. Причиной этого также явилось насыщение магнитопроводов ТТ, включённых в цепь неповреждённой фазы.

Целью статьи является анализ предложений по обеспечению правильного функционирования ДЗШ при насыщении ТТ класса Р, включённых в неповреждённую фазу, при внешних двухфазных КЗ присоединений, подключённых к разным системам или секциям шин.

Описание режима (рис. 1). Неселективное срабатывание ДЗШ напряжением 110 кВ подстанции (ПС) Геленджик произошло при схлёстывании проводов фазы С воздушной линии (ВЛ) Дивноморская (выключатель Q9) и фазы А ВЛ Прасковеевка (выключатель Q10). Фиксация ВЛ: Дивно-

¹ Кужеков Станислав Лукьянович: kuzhekov@mail.ru

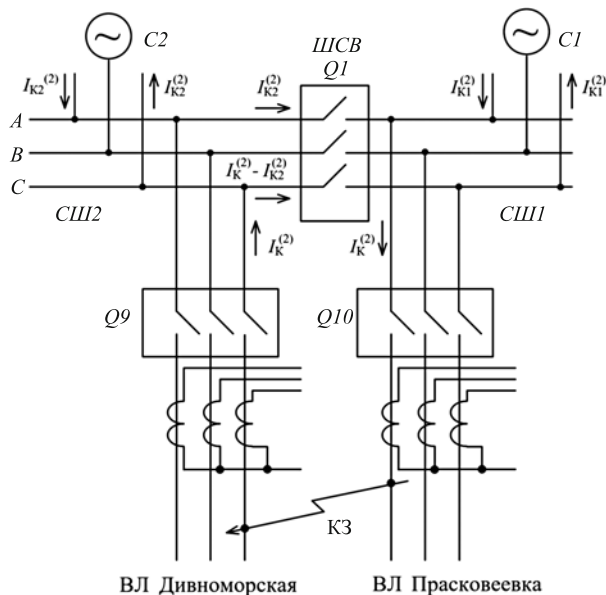


Рис. 1. Принципиальная схема распределительного устройства напряжением 110 кВ подстанции Геленджик

морская – СИИ2, Прасковеевка – СИИ1, т.е. линии подключены к разным системам шин. Схема распределительного устройства – двойная система шин (рис. 1). Шиносоединительный выключатель ШСВ включён, по его фазам А и С протекает ток КЗ. Защита шин подействовала на отключение второй системы шин СИИ2.

На рис. 2 показана осциллограмма напряжений и вторичных токов ТТ в цепи ВЛ Прасковеевка при рассматриваемом междуфазном КЗ. Вторичный ток ТТ в неповреждённой фазе В появляется позже, чем возникает ток в повреждённой фазе А. Причиной появления тока в неповреждённой фазе является насыщение магнитопровода ТТ фазы В и обусловленное этим уменьшение его входного сопротивления со стороны вторичных зажимов.

На рис. 3 изображена осциллограмма вторичных токов ТТ в неповреждённой фазе В в цепи ШСВ и ВЛ Прасковеевка (Q10) при двухфазном КЗ. Вторичные токи ТТ в цепи ШСВ, включённых в контуры избирательных органов ИО1 и ИО2 ДЗШ первой и второй систем шин, обозначены как Q1-1 и Q1-2, соответственно.

Неселективное действие ДЗШ второй системы шин в неповреждённой фазе В объясняется насыщением ТТ указанной фазы в цепи Q1-2 (что привело к срабатыванию ИО2) и насыщением ТТ фазы В в цепи ВЛ Прасковеевка (что привело к срабатыванию ПО). При этом другие ТТ, включённые в контур ИО2, не насыщались. Несрабатывание ДЗШ первой системы шин объясняется тем, что ТТ в цепи ШСВ Q1-1 насытился практически одновременно с ТТ в цепи ВЛ Прасковеевка Q10 и благодаря этому небаланс в фазе В был недостаточен для срабатывания ИО1. Медленнодей-

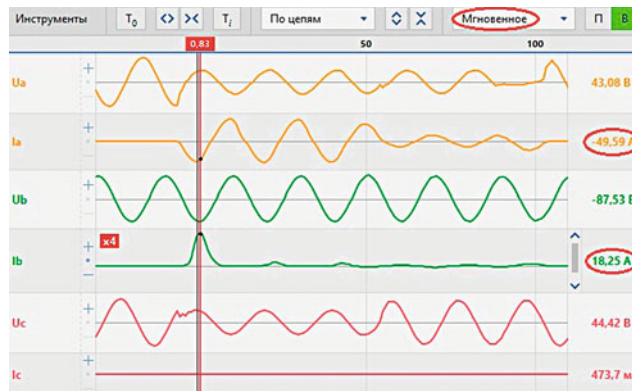


Рис. 2. Осциллограмма напряжений и вторичных токов в цепи ВЛ Прасковеевка при междуфазном КЗ фаз А и С

ствующие пусковой и избирательные органы в этих условиях не срабатывали.

Анализ режима и практических предложений. На рис. 1 показано распределение токов КЗ в цепях повреждённых ВЛ и ШСВ в рассматриваемом режиме. Видно, что суммарный ток двухфазного КЗ $I_K^{(2)}$ равен:

$$I_K^{(2)} = I_{K1}^{(2)} + I_{K2}^{(2)},$$

где $I_{K1}^{(2)}, I_{K2}^{(2)}$ – составляющие тока КЗ питающих систем С1 и С2.

По фазе А ШСВ проходит ток $I_{K2}^{(2)}$, а по фазе С – ток $I_{K1}^{(2)}$, причём указанные токи совпадают по фазе. Сумма этих токов равна суммарному току двухфазного КЗ. При этом по нулевому проводнику ТТ ШСВ, соединённых в звезду, до насыщения проходит ток, равный приведённому к вторичной цепи суммарному току КЗ $I_K^{(2)}$.

Таким образом, по нулевым проводникам соединённых в звезду ТТ повреждённых ВЛ и ШСВ при рассматриваемом КЗ протекают одинаковые аварийные составляющие токов.

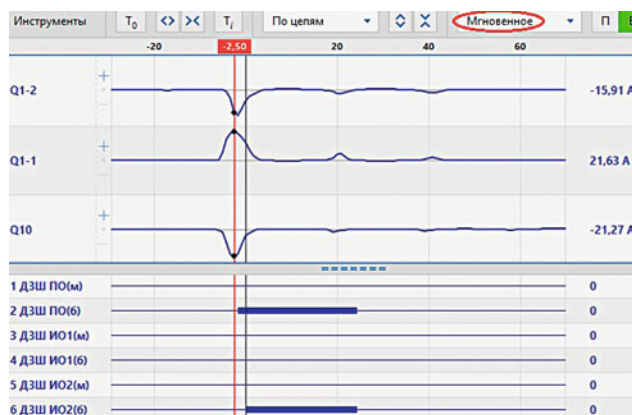


Рис. 3. Осциллограммы вторичных токов ТТ в неповреждённой фазе В в цепи ШСВ и ВЛ Прасковеевка при междуфазном КЗ фаз А и С

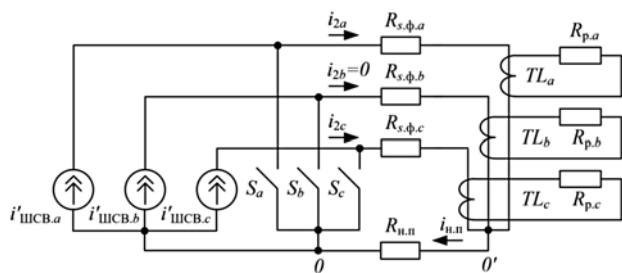


Рис. 4. Эквивалентная схема трёхфазной группы ТТ в цепи ШСВ, соединённой по схеме звезды с нулевым проводником

Процессы, происходящие в группах ТТ, анализируются в [4, 5]. Однако в них не приводятся практические рекомендации по исключению неселективных срабатываний защит при рассматриваемом виде внешнего КЗ. В [6, 7] описана возможность неселективной работы ДЗШ по причине насыщения ТТ в неповреждённой фазе и предложено подключать микропроцессорные устройства релейной защиты сборных шин к ТТ индивидуальными фазными и нулевыми проводниками. В [3] с целью исключения неселективного срабатывания защиты при внешних однофазных КЗ предложен второй вариант решения задачи – уменьшить сопротивление общего нулевого проводника в схеме ТТ, соединённых в звезду.

С учётом ранее изложенного возможны следующие варианты предотвращения случаев неселективного срабатывания ДЗШ при рассматриваемом виде внешнего двухфазного КЗ:

1. Подключение микропроцессорных ДЗШ к ТТ индивидуальными фазными и нулевыми проводниками.
2. Уменьшение сопротивления нулевых проводников во вторичных цепях ТТ, соединённых в звезду, путём подключения параллельно им дополнительных жил контрольного кабеля.
3. Увеличение коэффициента трансформации ТТ (например, применение вместо ТТ с номинальным вторичным током 5 А ТТ с тем же номинальным первичным током, но имеющих номинальный вторичный ток 1 А).
4. Введение выдержки времени на срабатывание ПО ДЗШ.

Достоинством первого варианта является его радикальность: исключается возможность насыщения ТТ в неповреждённых фазах, так как отсутствует общий нулевой проводник группы ТТ, соединённых в звезду. Реализация варианта возможна, если группа ТТ может быть подключена к токовым входам терминала защиты шестью проводниками. Мероприятие целесообразно при новом строительстве или реконструкции объектов электроэнергетики.

Второй вариант заключается в создании условий, при которых ТТ в повреждённых фазах насыщаются раньше, чем в неповреждённой. Благодаря

этому исключается возможность насыщения ТТ в неповреждённой фазе.

Качественный анализ процессов в схеме защиты шин при внешнем двухфазном КЗ удобно производить при аппроксимации характеристик намагничивания ТТ в цепях повреждённых присоединений и ШСВ прямоугольной характеристикой (ПХН).

Минимальное время до насыщения (первый момент насыщения) ТТ с ПХН в неповреждённой фазе в переходном режиме внешнего двухфазного КЗ можно вычислить по приложенной к вторичной обмотке ТТ периодической составляющей падения напряжения $U_{2,\sin}$ на нулевом проводнике схемы соединения ТТ в звезду, обусловленному протеканием по нему синусоидального тока и апериодической составляющей с заданной постоянной времени затухания. Кроме того, следует учитывать наличие в магнитопроводе ТТ остаточной магнитной индукции неблагоприятного знака [3].

На рис. 4 показана принципиальная схема вторичных цепей группы ТТ, относящихся к ШСВ, где приняты следующие обозначения: $i'_{\text{шсв.а}}$, $i'_{\text{шсв.б}}$, $i'_{\text{шсв.с}}$ – приведённые ко вторичной стороне токи КЗ, протекающие по первичным обмоткам ТТ в цепи ШСВ; S_a , S_b , S_c – ключи, имитирующие насыщение магнитопроводов ТТ; $R_{s,\phi,a}$, $R_{s,\phi,b}$, $R_{s,\phi,c}$ – суммы активных сопротивлений вторичных обмоток и соединительных проводников во вторичных цепях ТТ; $R_{p,a}$, $R_{p,b}$, $R_{p,c}$ – активные сопротивления устройств РЗА, подключённых через промежуточные трансформаторы тока TL_a , TL_b , TL_c ; $R_{n,\text{п}}$ – активное сопротивление нулевого проводника во вторичных цепях ТТ.

До насыщения ТТ в цепи ШСВ (замыкания ключей S_a , S_b , S_c) аварийная составляющая тока по вторичной обмотке ТТ в неповреждённой фазе B не протекает и к указанной обмотке приложено падение напряжения на нулевом проводнике $u_{n,\text{п}}$. Синусоидальная составляющая этого напряжения равна:

$$u_{2,b} = u_{n,\text{п}} = K_{\text{факт}} I_{2,\text{ном}} R_{n,\text{п}}, \quad (1)$$

где $K_{\text{факт}} = I_K^{(2)} / I_{1,\text{ном}}$ – фактическая кратность тока КЗ; $I_{1,\text{ном}}$, $I_{2,\text{ном}}$ – соответственно первичный и вторичный номинальный ток ТТ; $R_{n,\text{п}}$ – суммарное сопротивление ветви нулевого проводника.

В соответствии с рис. 4 для ТТ в повреждённой фазе в цепи ШСВ (с более высоким уровнем тока по сравнению с другой повреждённой фазой), с учётом сопротивления ветви нулевого проводника можно записать выражение для действующего значения периодической составляющей напряжения, приложенного к вторичной обмотке ТТ:

$$U_{2,\sin,\text{повр}} = K_{\text{факт}} (K_{\text{тр}} I_{2,\text{ном}} R_{s,\phi} + I_{2,\text{ном}} R_{n,\text{п}}), \quad (2)$$

где $K_{\text{тр}}$ – коэффициент токораспределения тока КЗ, т.е. доля тока КЗ, проходящего по упомянутой

фазе; $R_{с.ф}$ – суммарное сопротивление фазного проводника с учётом сопротивления вторичной обмотки и нагрузки.

Условие насыщения ТТ в повреждённой фазе раньше, чем в неповреждённой, имеет вид:

$$\frac{U_{2.нас}}{U_{2.син.неп}}(1-K_r) > \frac{U_{2.нас}}{U_{2.син.повр}}(1+K_r), \quad (3)$$

где $K_r = 0,75$ (в соответствии с [2]) – коэффициент остаточной магнитной индукции; $U_{2.син.неп}$ – напряжение, приложенное к вторичной обмотке ТТ в неповреждённой фазе; $U_{2.нас}$ – напряжение насыщения ТТ.

Значение напряжения $U_{2.нас}$ вычисляется по выражению:

$$U_{2.нас} = K_{ном} I_{2.ном} R_{с.ном}, \quad (4)$$

где $R_{с.ном}$ – номинальное сопротивление ветви вторичного тока ТТ с учётом сопротивления вторичной обмотки; $K_{ном}$ – номинальная предельная кратность.

После преобразования выражения (3) с учётом формул (1) и (2) получено выражение для требуемого сопротивления ветви нулевого проводника ТТ в цепи ШСВ:

$$R_{н.п.треб} < R_{с.ф} K_{тр} \frac{1-K_r}{2K_r}. \quad (5)$$

Анализ показал, что в качестве расчётного следует принять значение $K_{тр} = 0,5$.

Для ТТ в цепях повреждённых присоединений значение коэффициента токораспределения $K_{тр} = 1$, и выражение для сопротивления ветви нулевого проводника имеет вид:

$$R_{н.п} < R_{с.ф} \frac{1-K_r}{2K_r}. \quad (6)$$

Таким образом, выражение (6) справедливо для ТТ в цепях повреждённых присоединений как при внешних однофазных КЗ, так и в рассматриваемом случае двухфазного КЗ.

Пример расчёта. Исходные данные: сопротивление фазного проводника ТТ в цепи ШСВ и повреждённых присоединений с учётом нагрузки и вторичной обмотки ТТ $R_{с.ф} = 0,9$ Ом, нулевого проводника $R_{н.п} = 0,58$ Ом. Значение коэффициента токораспределения для цепи ШСВ принято равным 0,5, что соответствует наихудшим условиям выбора сопротивления нулевого проводника.

При значении коэффициента остаточной магнитной индукции $K_r = 0,75$ (по данным МЭК 60255-121:2014 [2]) требуемое сопротивление нулевого проводника в соответствии с выражением (5) равно:

$$R_{н.п.треб} < 0,9 \cdot 0,5 \cdot \frac{1-0,75}{2 \cdot 0,75} \approx 0,075 \text{ Ом},$$

что не всегда приемлемо.

Таким образом, в условиях данного примера можно гарантировать исключение неправильного срабатывания ДЗШ по причине насыщения ТТ в неповреждённой фазе, если параллельно нулевому проводнику ТТ в цепи ШСВ будут дополнительно подключены 7 жил контрольного кабеля, каждая из которых имеет сопротивление 0,58 Ом.

Для ТТ в цепях повреждённых присоединений требуемое сопротивление нулевого проводника в соответствии с выражением (6) равно:

$$R_{н.п} < 0,9 \cdot \frac{1-0,75}{2 \cdot 0,75} = 0,15 \text{ Ом}.$$

Таким образом, параллельно нулевому проводнику в цепях повреждённых присоединений необходимо дополнительно подключить 3 жилы контрольного кабеля, каждая из которых имеет сопротивление 0,58 Ом.

Очевидно, что подключение дополнительных жил контрольного кабеля технически не всегда целесообразно, особенно в цепи ШСВ.

Третий вариант базируется на том, что при уменьшении номинального вторичного тока ТТ с 5 до 1 А напряжение насыщения увеличивается в 5 раз.

До насыщения ТТ, включённого в неповреждённую фазу в цепи ШСВ, синусоидальная составляющая напряжения на нулевом проводнике $u_{н.п.син}$, приложенная к вторичной обмотке, описывается выражением (1).

Синусоидальная составляющая допустимого напряжения (напряжения насыщения), приложенного к вторичной обмотке ТТ, равняется

$$U_{неп.доп.син} = K_{ном} I_{2.ном} R_{с.ном} \frac{1-K_r}{K_{п.п}(t_{треб})}, \quad (7)$$

где $K_{п.п}(t_{треб})$ – коэффициент переходного режима в требуемый момент времени $t_{треб}$ по условию срабатывания при КЗ в зоне действия или несрабатывания при КЗ вне зоны действия ДЗШ.

На практике расчётным по требуемому значению времени, как правило, является режим КЗ вне зоны действия (время отключения внешних КЗ защитами смежных элементов). Значение $K_{п.п}(t_{треб})$ определяется по рис. 2 [8].

Путём преобразования формул (1) и (7) получено расчётное выражение для выбора ТТ по условию отсутствия его насыщения под действием напряжения на нулевом проводнике:

$$K_{ном} R_{с.ном} \geq K_{факт} R_{н.п} \frac{K_{п.п}(t_{треб})}{1-K_r}. \quad (8)$$

В выражении (8) ориентировочно можно принять, что сопротивление вторичной обмотки составляет 20% номинального сопротивления нагрузки [9]. Тогда

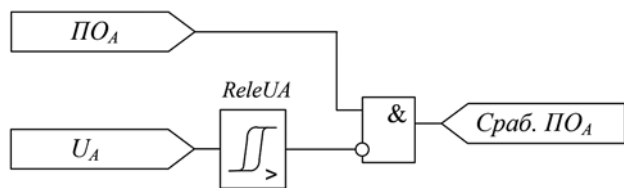


Рис. 5. Логическая схема выходной цепи сигнала срабатывания ПО ДЗШ фазы A с добавлением контроля уровня напряжения

$$R_{с.ном} = 1,2R_{н.ном}, \quad (9)$$

где $R_{н.ном}$ – номинальное сопротивление нагрузки на ТТ.

Реализация третьего варианта целесообразна при новом строительстве или реконструкции объектов электроэнергетики, так как в действующих электроустановках замена ТТ проблематична.

В условиях эксплуатации наиболее легко реализуемым мероприятием является введение выдержки времени на срабатывание ПО ДЗШ. Указанная выдержка времени должна быть не меньше, чем сумма времени срабатывания основных (или резервных, если оно больше) защит ВЛ, подключённых к СШ, и полного времени отключения выключателя с приводом. Время срабатывания большинства защит ВЛ ООО НПП “ЭКРА” не более 25 мс. Полное время отключения выключателя с приводом не более 35 мс. Таким образом, выдержка времени на срабатывание ПО ДЗШ должна быть не менее 60 мс.

Данное решение имеет один недостаток – замедление при КЗ в зоне действия ДЗШ на значении указанной выдержки времени 60 мс. Однако в случае удалённых КЗ возможно замедление в срабатывании защит ВЛ, соответственно, потребуется увеличение выдержки времени на срабатывание ПО ДЗШ.

Учитывая недостатки рассмотренных ранее решений, предложено использовать в ДЗШ дополнительный признак – контроль уровня напряжения неповреждённой фазы. На рис. 5 изображена логическая схема, позволяющая осуществить указанное предложение. Такая схема должна быть реализована в ДЗШ каждой фазы.

На рис. 5 приняты следующие обозначения: PO_A – сигнал срабатывания пускового органа ДЗШ фазы A ; U_A – текущий замер действующего значения напряжения в фазе A ; $ReleUA$ – реле (компаратор) напряжения фазы A . На выходе данного элемента появляется логический сигнал 1 (истина) при выполнении следующего неравенства:

$$U_A > 0,8U_{ном},$$

где $U_{ном}$ – действующее значение номинального напряжения в фазе A ; $Сраб. ПО_A$ – сигнал срабатывания пускового органа ДЗШ фазы A с учётом состояния реле $ReleUA$.

ДЗШ фазы A с предлагаемой схемой работает следующим образом.

При внешнем несимметричном КЗ возможно насыщение магнитопровода ТТ, включённого в цепь неповреждённой фазы A , в результате чего возникает сигнал небаланса дифференциальной защиты. Пусковой орган ПО срабатывает и на его выходе появляется сигнал 1. Однако напряжение в неповреждённой фазе A превышает порог срабатывания реле фазного напряжения $ReleUA$. Поэтому на выходе логического элемента И сигнал отсутствует и неселективное действие защиты не происходит.

При несимметричном КЗ на защищаемом объекте ПО в повреждённой фазе срабатывает, на его выходе появляется логический сигнал 1. Действующее значение напряжения в этой фазе снижается и становится ниже порога срабатывания реле фазного напряжения. На выходе указанного реле появляется логический сигнал 0. На выходе логического элемента И появляется логическая 1 и защита объекта срабатывает. Некоторая задержка в срабатывании защиты обусловлена временем возврата реле фазного напряжения, не превышающего 10 мс.

Апробация практических предложений с помощью моделирования. С целью апробации четырёх предложенных вариантов предотвращения неселективного срабатывания ДЗШ при рассматриваемом виде внешнего двухфазного КЗ и подтверждения достоверности расчётных выражений (5) – (12) с помощью программно-аппаратного комплекса RTDS проведено моделирование переходных процессов в группах ТТ, соединённых в звезду с общим нулевым проводником. При этом использовались специально разработанные модели группы ТТ, соединённых в звезду с общим нулевым проводником (далее модель группы ТТ). В указанных моделях применены однозначные характеристики намагничивания [10].

Для верификации разработанных моделей группы ТТ выполнено физическое моделирование. Методика физического моделирования одиночного ТТ разработана Институтом электродинамики АН УССР [11]. При физическом моделировании используются уменьшенные модели ТТ, параметры которых в определённом масштабе соответствуют реальным ТТ. Критерии подобия при моделировании без изменения частоты источника питания для установившегося режима ТТ с одинаковыми кривыми намагничивания приведены в [12]. Коэффициенты подобия (масштабы m) при использовании удельных величин одинаковы:

$$m_{I_{1уд}} = m_{I_{2уд}} = m_{R_{с.уд}} = m_{L_{с.уд}} = 1, \quad (13)$$

где $I_{1уд}$, $I_{2уд}$, $R_{с.уд}$, $L_{с.уд}$ – удельное значение соответственно первичного и вторичного тока, активного

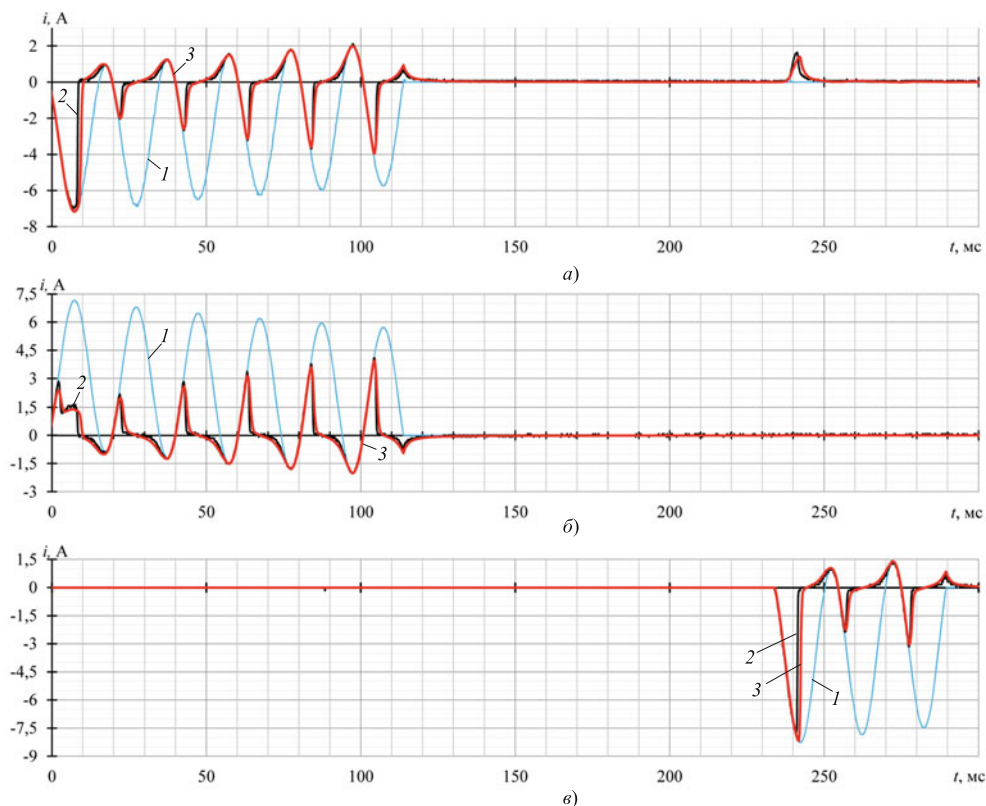


Рис. 6. Кривые сигналов токов группы ТТ, соединённых по схеме звезды:

a – фаза *A*; *b* – фаза *B*; *c* – фаза *C*; 1 – приведённый первичный ток ТТ фазы; 2 – вторичный ток фазы ТТ (физическая модель); 3 – вторичный ток фазы ТТ (математическая модель)

сопротивления и индуктивности вторичной ветви схемы замещения ТТ.

В качестве эталона принята группа из трёх образцов физических моделей трансформаторов тока типа SAS550/5G 2000/1 фирмы TRENCH, соединённых по схеме звезды. На входы указанной группы ТТ подавались первичные токи, соответствующие циклу АПВ (автоматическое повторное включение): двухфазное КЗ на фазах *A* и *B* одной линии – бестоковая пауза – однофазное КЗ в фазе *C*. Во время однофазного КЗ происходит насыщение ТТ не только в фазе *C*, но и ТТ в фазе *A*, в первичной обмотке которого ток КЗ отсутствует. В результате во вторичной цепи ТТ неповреждённой фазы *A* появляется импульс тока.

В качестве источника тока КЗ для физического моделирования использовался испытательный комплекс РЕТОМ-51, предоставленный ООО «НПП «Динамика» во временное безвозмездное пользование.

Этот же режим моделировался в RTDS с помощью разработанной математической модели группы ТТ. Результат верификации указанной модели приведён на рис. 6.

Как следует из проведённого анализа, расхождение результатов расчёта с использованием разработанной модели для RTDS и данных, полученных на физических моделях ТТ, относительно не-

велико. Пиковое кратковременное значение погрешности в течение 2 мс не превысило 15%. Это позволяет сделать вывод, что в моделях групп ТТ с достаточной для практики релейной защиты и автоматики точностью (при выполнении критерия применимости разработанной модели) допустимо использовать однозначную характеристику намагничивания.

На рис. 7, 8 приведены результаты апробации двух из указанных вариантов: второго и четвёртого. Исходные данные в опыте соответствуют приведённому примеру, а режим испытаний (вид КЗ и аварийные составляющие токов) максимально приближен к случаю на ПС Геленджик.

Из осциллограмм, изображённых на рис. 7, 8, видно, что уменьшение сопротивления нулевых проводников для групп ТТ позволяет снизить токи в неповреждённой фазе *B* до значений, при которых неправильная работа ПО ДЗШ исключена.

На рис. 7, 8 отмечены интервалы времени, в течение которых ток в неповреждённой фазе *B* превышает уровень срабатывания ПО ДЗШ. Видно, что выдержка времени на срабатывание ПО ДЗШ, равная 60 мс, принятая по условию отстройки от близких КЗ, превышает продолжительность указанных интервалов.

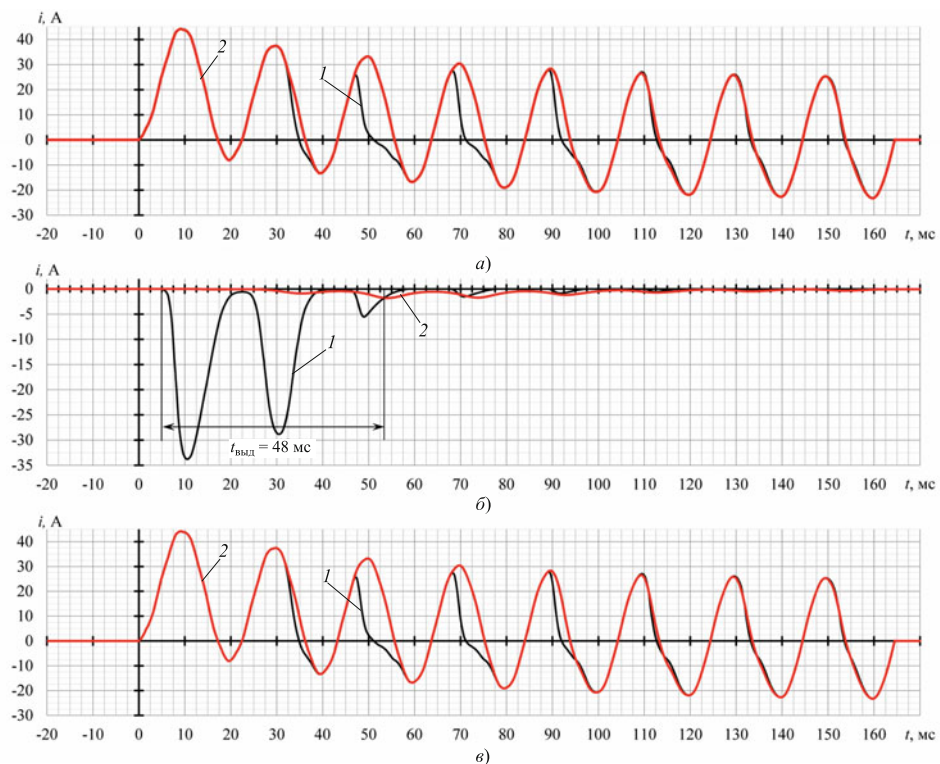


Рис. 7. Кривые сигналов токов для группы ТТ, установленных в цепи ШСВ, при уменьшении сопротивления нулевых проводников во вторичных цепях:

а – фаза *А*; *б* – фаза *В*; *в* – фаза *С*; *1* – исходный ток i_2 ТТ фазы; *2* – ток i_2 фазы ТТ при уменьшенном $R_{н.п}$

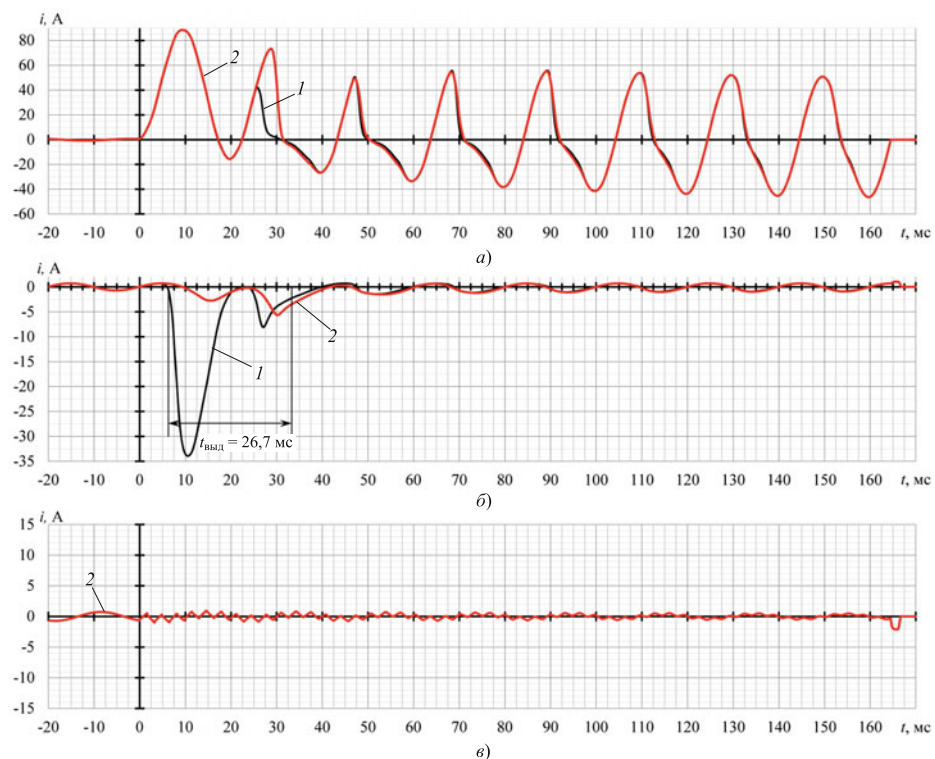


Рис. 8. Кривые сигналов токов для группы ТТ ВЛ Прасковеевка при уменьшенном сопротивлении нулевых проводников во вторичных цепях:

а – фаза *А*; *б* – фаза *В*; *в* – фаза *С*; *1* – исходный ток i_2 ТТ фазы; *2* – ток i_2 фазы ТТ при уменьшенном $R_{н.п}$

Выводы

1. Установлено, что причиной неселективных срабатываний ДЗШ со схемой соединения ТТ в звезду с общим нулевым проводником в переходных режимах внешних двухфазных КЗ присоединений, подключённых к разным секциям или системам сборных шин, является насыщение магнитопроводов ТТ в неповреждённых фазах.

2. В новых технических решениях с целью исключения неселективных срабатываний дифференциальных защит сборных шин по причине насыщения магнитопроводов ТТ в неповреждённых фазах как при указанных внешних двухфазных КЗ, так и при внешних однофазных КЗ целесообразно перейти от традиционной для ДЗШ схемы соединения ТТ в звезду с общим нулевым проводником к подключению ТТ фаз индивидуальными нулевыми проводниками.

3. Применительно к быстродействующим избирательным органам ДЗШ действующих электроустановок предложены выражения для расчёта допустимого сопротивления нулевых проводников в схемах ТТ, соединённых в звезду с общим нулевым проводником, в цепях повреждённых присоединений и ШСВ.

4. Предложено выражение для расчёта требуемых номинальных значений предельной кратности и сопротивления нагрузки ТТ, включённых в неповреждённую фазу, при которых исключается насыщение магнитопроводов последних.

5. Введение в ДЗШ выдержки времени является наиболее легко реализуемым мероприятием в условиях эксплуатации. Однако указанная выдержка времени может составить более 100 мс, что не всегда приемлемо по условиям динамической устойчивости электроэнергетической системы, а также по требованиям электро- и пожарной безопасности.

6. Предложено использовать в ДЗШ дополнительный признак – контроль уровня напряжения неповреждённой фазы.

7. В расчёте допустимого сопротивления нулевого проводника в схеме ТТ, соединённых в звезду с общим нулевым проводником, учитывая низкую вероятность совпадения относительного максимального содержания аperiodической составляющей в токе КЗ и предельных значений остаточных магнитных индукций разных знаков в магнитопроводах ТТ, целесообразно в соответствии с МЭК 60255-121:2014 принять значение коэффициента остаточной индукции в магнитопроводах ТТ, равным 0,75 от индукции насыщения, т.е. 1,5 Тл.

8. Моделирование с помощью программно-аппаратного комплекса RTDS переходного режима

внешнего двухфазного КЗ присоединений, подключённых к разным секциям или системам сборных шин, подтвердило достаточную для практики точность полученных результатов и обоснованность использования допущений, принятых при выполнении данной работы.

Список литературы

1. *Трансформаторы* измерительные. Часть 2. Дополнительные требования к трансформаторам тока [Электронный ресурс]: ГОСТ Р МЭК 61869-2-2015. – Введ. 2016-03-01. – ([http:// docs.cntd.ru](http://docs.cntd.ru)).
2. *Реле* измерительные и защитное оборудование. Часть 121. Функциональные требования к дистанционной защите [Электронный ресурс]: Стандарт МЭК 60255-121: 2014. – Введ. 2014-03-07. – (<http:// www.gostinfo.ru>).
3. *Кужеков, С. Л.* Анализ неселективных действий дифференциальных защит сборных шин при внешних однофазных коротких замыканиях с насыщением трансформатора тока в неповреждённой фазе [Текст] / С. Л. Кужеков, А. А. Дегтярев, Н. А. Дони, А. А. Шурупов, А. А. Петров, Л. Н. Костарев, И. А. Кошельков // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – № 1. – С. 28 – 36.
4. *Новаш, В. И.* Расчёт переходных процессов в токовых цепях многоплечевых дифференциальных защит [Текст] / В. И. Новаш, В. Х. Сопьяник // Электричество. – 1982. – № 7. – С. 74 – 76.
5. *Багинский, Л. В.* Особенности взаимодействия трансформаторов тока в цепях чувствительных быстродействующих защит [Текст] / Л. В. Багинский, Е. А. Беляев // Электричество. – 2003. – № 1. – С. 2 – 13.
6. *Кужеков, С. Л.* Об обеспечении необходимой точности работы защитных трансформаторов тока в переходных режимах [Текст] / С. Л. Кужеков, А. А. Дегтярёв, К. В. Чердиченко // Электрические станции. – 2015. – № 5. – С. 53 – 60.
7. *Кужеков, С. Л.* Обеспечение правильного функционирования дифференциальных защит сборных шин в условиях насыщения трансформаторов тока [Текст] / С. Л. Кужеков, А. А. Дегтярёв, Б. Б. Сербиновский // Известия вузов. Электромеханика. – 2017. – Т. 60. – № 4. – С. 76 – 83.
8. *Кужеков, С. Л.* Определение времени до насыщения трансформаторов тока в переходных режимах коротких замыканий [Текст] / С. Л. Кужеков, А. А. Дегтярев, В. С. Воробьёв, В. В. Москаленко // Электрические станции. – 2017. – № 1. – С. 42 – 47.
9. *Циглер, Г.* Цифровая дифференциальная защита. Принципы и область применения [Текст] / Г. Циглер; перевод с англ.; под ред. А. Ф. Дьякова. – М.: Знак, 2008. – 216 с.
10. *Кужеков, С. Л.* Математическое моделирование в реальном времени трансформаторов тока в режимах с учётом насыщения магнитопроводов [Текст] / С. Л. Кужеков, А. А. Дегтярев, Р. Forsyth, С. Peters, J. Zakonjsek, М. А. Шамис, Ф. А. Иванов // Оперативное управление в электроэнергетике: подготовка персонала и поддержание его квалификации. – 2015. – № 5. – С. 20 – 27.
11. *Сирота, И. М.* Переходные режимы работы трансформаторов тока [Текст] / И. М. Сирота. – Киев: Изд-во АН УССР, 1961. – 192 с.
12. *Королев, Е. П.* Расчёты допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты [Текст] / Е. П. Королев, Э. М. Либерзон. – М.: Энергия, 1980. – 208 с.