

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБОВ РЕАЛИЗАЦИИ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ СИСТЕМ СБОРНЫХ ШИН РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

В.В. Ниценко^{1*}, Д.А. Кулагин^{2**}

ГП НЭК «Укрэнерго» Днепропетровская ЭС,
ул. Плотинная, 2, Запорожье, Украина, 69096.

E-mail: nickenkovladimir@gmail.com

Запорожский национальный технический университет,
ул. Жуковского, 64, Запорожье, Украина, 69063.

E-mail: kulagindo@gmail.com

Проанализированы недостатки дифференциальной токовой защиты сборных шин и известных способов возможной реализации их дифференциально-фазной защиты. Разработаны более совершенные способы сравнения фаз токов дифференциально-фазной защиты шин (ДФЗШ), в частности, приведены логические выражения для каждого предложенного способа, включающие в себя проверочные условия, выполнение которых требуется для обеспечения надежного пуска и срабатывания защиты при идентификации аварийного режима повреждения защищаемой системы шин. Приведены иллюстрации действия защиты при использовании каждого из этих способов в режимах внутренних и внешних коротких замыканий. Выбор наиболее целесообразного способа сравнения фаз токов для последующей его реализации устройством ДФЗШ проведен на основании сопоставления их сравнительной характеристики по результатам теоретических и практических исследований действия защиты в аварийных режимах, сделаны выводы о преимуществах использования предложенного дифференциально-фазного алгоритма функционирования устройств релейной защиты сборных шин.

Библ. 10, рис. 5, табл. 1.

Ключевые слова: релейная защита, дифференциально-фазная защита шин, реле сравнения фаз, угол блокировки, сборные шины, способы сравнения фаз токов.

Введение. Сборные шины (СШ) распределительных установок электрических станций и подстанций являются одним из наиболее ответственных элементов электрических сетей (ЭС). К системам СШ, как правило, подключается большое количество присоединений, ввиду чего аварийные токи при повреждениях СШ могут достигать критических значений, а глубокое понижение напряжения на шинах, обусловленное протеканием сверхтоков, приводит как к нарушению нормальной работы потребителей электрической энергии, так и представляет угрозу нарушения динамической устойчивости энергосистемы.

В настоящее время для обеспечения релейной защиты (РЗ) СШ используются устройства, принцип действия которых основан на дифференциальном сравнении вторичных токов трансформаторов тока (ТТ) присоединений, подключенных к общей системе СШ – устройства дифференциальной токовой защиты шин (ДЗШ) [7, 9]. Опыт эксплуатации таких устройств [2, 5, 6] указывает на наличие недостатков, характерных указанному принципу действия РЗ СШ, среди них: трудности при расчетах уставок ДЗШ по условию обеспечения требуемой чувствительности в минимальных режимах внутренних (коротких замыканий) КЗ и надежной отстройки от установившихся и переходных токов небаланса при внешних КЗ; повышенные требования к характеристикам и условиям эксплуатации ТТ, ко вторичным цепям которых подключена защита, в частности, обеспечение их работы в пределах допустимых погрешностей в аварийных режимах [1, 2]. Современные микропроцессорные (МП) устройства ДЗШ являются более совершенными и имеют более гибкую логику действия, реализуя принцип процентного торможения защиты, используемый для более эффективной отстройки от установившихся и переходных токов небаланса при внешних КЗ [8, 9]. Стоит отметить, что недостатком таких устройств является сложность логических алгоритмов и расчетных методик их настройки (большой объем расчетных уставок), малейшая ошибка в которых может привести к неправильному действию защиты. К тому же, требования к точности функционирования ТТ в соответствии с инструкциями заводов-изготовителей МП устройств ДЗШ [8] остаются теми же, что и для аналогичных им электромеханических (полупроводниковых) защит. Определяющим фактором при выборе рабочих уставок ДЗШ являются токовые и угловые погрешности ТТ, которые зависят от кратности аварийного тока, наличия в нем затухающих периодических и аperiodических составля-

© Ниценко В.В., Кулагин Д.А., 2017

ORCID ID: *<http://orcid.org/0000-0002-3450-7649> ; ** <http://orcid.org/0000-0003-3610-4250>

ной особенностью данного способа от предложенных в [2] является проверка трех пусковых условий на протяжении одного периода тока, выполнение которых требуется для определения защитой внутреннего КЗ, чем обеспечивается более высокая ее надежность на несрабатывание при отсутствии повреждения на СШ, в частности, в переходных режимах внешних КЗ и при насыщении ТТ. В указанных режимах форма кривой вторичного тока одного или нескольких ТТ может искажаться из-за влияния свободной составляющей либо увеличения содержания высших гармоник во вторичном токе, вследствие чего возможно «ложное» выполнение одного или нескольких пусковых условий (кратковременно или длительно), что может послужить причиной излишнего срабатывания ДФЗШ. Проверка трех условий пуска снижает вероятность излишнего действия защиты.

Логическое выражение, соответствующее **способу 1**, имеет следующий вид:

$$F_1 = \left[\left([(S_{1+} \cap S_{2+} \cap S_{3+}) \cap (S_{1+} \cup S_{2+} \cup S_{3+})] \oplus (\bar{S}_{1+} \cap \bar{S}_{2+} \cap \bar{S}_{3+}) \right) \cup \left([(S_{1-} \cap S_{2-} \cap S_{3-}) \cap (S_{1-} \cup S_{2-} \cup S_{3-})] \oplus (\bar{S}_{1-} \cap \bar{S}_{2-} \cap \bar{S}_{3-}) \right) \right] D(t), \quad (1)$$

где S_{1+}, S_{2+}, S_{3+} – логические импульсы напряжения положительной полярности; S_{1-}, S_{2-}, S_{3-} – логические импульсы напряжения отрицательной полярности; $S_1 \cap S_2$ – логическая операция «И» (AND); $S_1 \cup S_2$ – логическая операция «ИЛИ» (OR); \bar{S} – логическая операция инверсии импульса «НЕ» (NOT); $S_1 \oplus S_2$ – логическая операция «Исключающее ИЛИ» (XOR); $D(t)$ – оператор времени проверки синфазности токов присоединений, которым обеспечивается замедление действия защиты на время, определяемое его параметром t , что необходимо для исключения вероятности ее излишнего действия при возникновении возмущений в ЭС, сопровождающихся кратковременным изменением соотношений между фазами токов присоединений, обусловленных реверсом мощности, а также для предотвращения ложного действия ДФЗШ при неисправности ее токовых цепей для обеспечения возможности своевременного вывода защиты из действия [2, 10].

Как показано на рис. 2, при внутренних (рис. 2, а) и внешних (рис. 2, б) КЗ обеспечивается измерение длительности интервала совпадения импульсов напряжения положительной и отрицательной полярностей t_{1+} (t_{1-}) (операция «И»), интервала их несовпадения t_{3+} (t_{3-}) (операция «ИЛИ-НЕ») и общая длительность существования сигнала t_{2+} (t_{2-}) (операция «ИЛИ») в промежутке между паузами. Все измерения осуществляются на протяжении одного периода тока, причем каждый последующий его период измеренные значения длительностей интервалов t_1, t_2, t_3 обновляются.

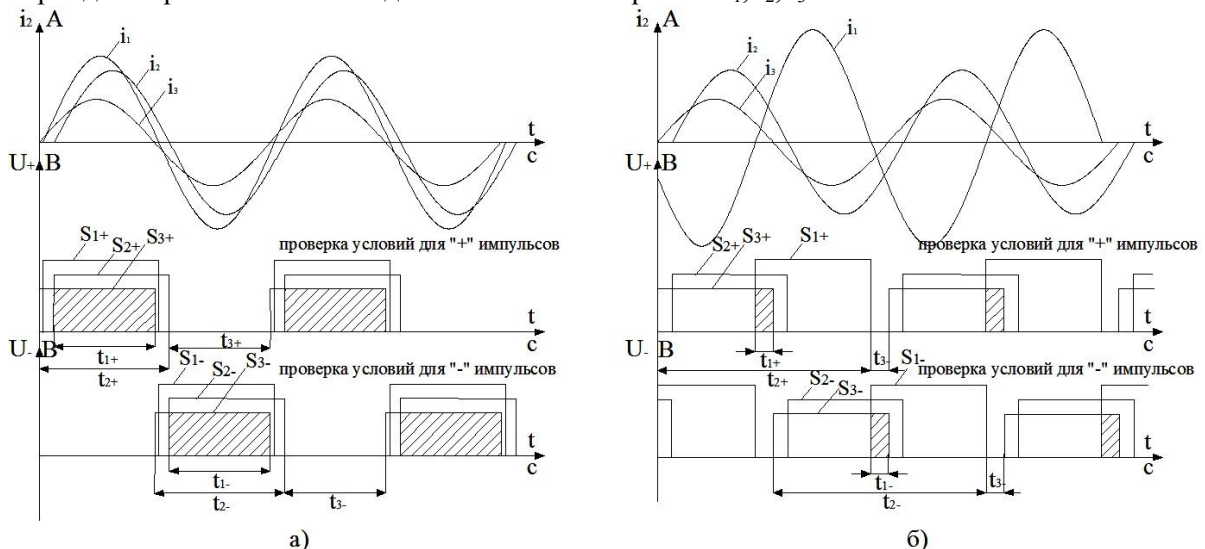


Рис. 2

Принципиально новым логическим элементом в выражении (1) (по сравнению с рассмотренными в [2]) является использование логической операции «Исключающее ИЛИ» (XOR), которая дает результат лишь при условии истинности одного выражения из тех, что объединены данной логической операцией, в противном случае, а именно, когда оба эти выражения одновременно справедливы или не справедливы, выходного результата (логической «1») от выполнения данной операции не получим. Для рассматриваемого способа согласно выражению (1) учитывается истинность логических

условий, выполняемых либо для совокупностей импульсов положительной (отрицательной) полярности, либо для пауз между этими импульсами. Для пуска и срабатывания ДФЗШ необходима справедливость выражения

$$(t_1 > T_1) \cap (t_2 < T_2) \cap (t_3 > T_3), \quad (2)$$

где T_1, T_2, T_3 – расчетные параметры защиты, способ действия которой выполнен согласно выражению (1).

Значения параметров T_1 и T_3 должны быть определены следующим образом, мс:

$$T_1 = T_3 = \frac{T_f}{2\pi} \cdot \varphi_{d\bar{e}}, \quad (3)$$

где T_f – период тока промышленной частоты, $T_f = 20$ мс; $\varphi_{\bar{o}l}$ – расчетная уставка угла блокировки защиты, выраженная в электрических градусах.

Угол блокировки защиты $\varphi_{\bar{o}l}$ представляет собой предельный угол расхождения векторов токов присоединений от 180° при внешних КЗ и в прочих режимах ЭС, при котором действие защиты должно быть надежно заблокировано [3]. Рекомендации по выбору уставки $\varphi_{\bar{o}l}$ ДФЗШ приведены в [2, 3]. При этом согласно приведенным в [3] результатам значение уставки $\varphi_{\bar{o}l}$ не должно превышать 90° для обеспечения абсолютной селективности действия ДФЗШ в аварийных режимах.

Расчетный параметр T_2 определяется из следующего выражения, мс:

$$T_2 = T_f - T_1. \quad (4)$$

В соответствии с [3], при выборе уставки $\varphi_{\bar{o}l}$, равной 90° , значения указанных параметров будут равны $T_1 = T_3 = 5$ мс, $T_2 = 15$ мс.

Измерение интервалов t_1, t_2, t_3 РСФ осуществляется непрерывно и отдельно для совокупностей разнополярных импульсов, что способствует повышению быстродействия ДФЗШ за счет обеспечения пуска и срабатывания защиты при справедливости логических условий из выражения (1) как на положительном, так и на отрицательном полупериодах тока.

Значение параметра t оператора времени $D(t)$ из выражения (1) здесь и далее принимается равным 20 мс, что соответствует одному периоду тока промышленной частоты. При пуске ДФЗШ вследствие выполнения всех условий согласно выражению (1), то есть $F_1 = "1"$, срабатывание защиты происходит лишь по истечении времени $t=20$ мс и с обязательной проверкой выполнения условия $F_1 = "1"$. Если же по истечении 20 мс после успешного пуска защиты выражение (1) теряет свою справедливость ($F_1 = "0"$), то есть имело место возмущение в ЭС, не связанное с повреждением СШ и сопровождающееся изменением соотношений между фазами токов присоединений, происходит возврат ДФЗШ, чем обеспечивается исключение ее неселективного действия. Такие возмущения, как правило, имеют кратковременный характер, поэтому выдержка времени $t=20$ мс не позволит защите сработать на возникшее внешнее возмущение, и только лишь при повреждении СШ синфазность токов питающих присоединений сохраняется длительно (до момента локализации КЗ), что приведет к срабатыванию ДФЗШ. Таким образом, обеспечивается выполнение требования к абсолютной селективности действия защиты, что при условии правильной настройки значения ее параметра $\varphi_{\bar{o}l}$ позволяет отказаться от использования дополнительных пусковых органов ДФЗШ таких, как дифференциальные токовые, дистанционные, напряженческие и т.п., как это предлагается в [2] (применение дифференциальных токовых пусковых органов).

Алгоритм действия ДФЗШ согласно **способу 2** основан на поочередном определении соотношений между фазами токов ТТ присоединений, подключенных к общей системе СШ, и фазой опорного сигнала, в качестве которого может быть использован вторичный ток любого питающего присоединения, находящегося под нагрузкой, либо же сгенерированный самим устройством ДФЗШ периодический опорный сигнал. Отличительной особенностью данного способа является применение дополнительного «опорного сигнала», о котором не упоминается в [2], с опорной фазой которого поочередно происходит сравнение фаз токов ТТ всех присоединений, чем обеспечивается повышение селективности и надежности ДФЗШ при внутренних КЗ, так как реагирующий орган защиты получает более точную информацию о фазе каждого из вторичных токов по отношению к опорному сигналу, сравнивая в последующем эти соотношения с настроенной уставкой $\varphi_{\bar{o}l}$, не формируя при этом

различного рода совокупностей сигналов, что предусматривается для остальных способов. Принципиально новым логическим элементом, по сравнению с рассмотренными в [2], для данного способа реализации алгоритма РСФ является использование логической операции «Исключающее ИЛИ» (XOR).

Логическое выражение, соответствующее **способу 2**, имеет следующий вид:

$$F_2 = \left[\left([S_{1+} \oplus S_{i1+}] \cap [S_{2+} \oplus S_{i2+}] \cap [S_{3+} \oplus S_{i3+}] \right) \cup \left([S_{1-} \oplus S_{i1-}] \cap [S_{2-} \oplus S_{i2-}] \cap [S_{3-} \oplus S_{i3-}] \right) \right] D(t), \quad (5)$$

где $S_{оп+}$, $S_{оп-}$ – положительные и отрицательные импульсы, формируемые из опорного тока.

На рис. 3 показаны иллюстрации действия ДФЗШ, алгоритм которой выполнен согласно способу 2 при внутренних (рис. 3, а) и внешних (рис. 3, б) КЗ, где в качестве опорного сигнала $i_{оп}$ используется фазный ток одного из питающих присоединений i_3 .

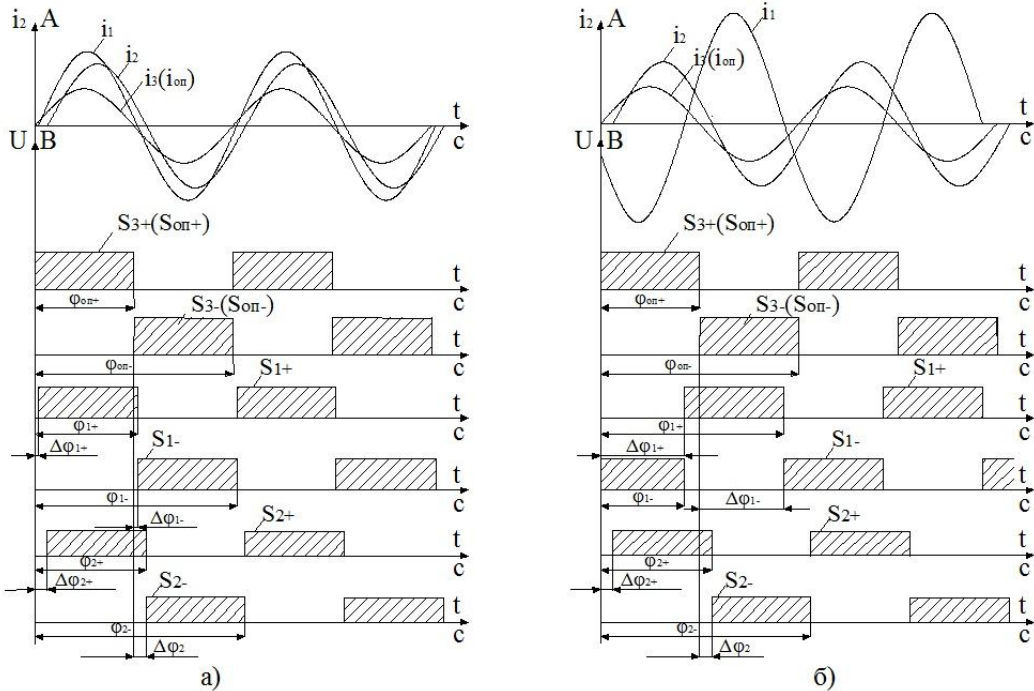


Рис. 3

Как показано на рис. 3, сравнение фаз токов происходит путем нахождения разности между фазой каждого из вторичных токов присоединений и фазой опорного тока $\Delta\varphi_n$, что в последующем сопоставляется с уставкой $\varphi_{бл}$, которая по условию обеспечения селективности действия ДФЗШ не должна превышать 90° .

Для пуска и срабатывания ДФЗШ необходима справедливость выражения

$$\begin{cases} \Delta\varphi_1 = |\varphi_{i1} - \varphi_1| > \varphi_{\dot{a}\ddot{e}}, \\ \Delta\varphi_2 = |\varphi_{i2} - \varphi_2| > \varphi_{\dot{a}\ddot{e}}, \end{cases} \cup \begin{cases} \Delta\varphi_1 = |\varphi_{i1} - \varphi_1| < \varphi_{\dot{a}\ddot{e}}, \\ \Delta\varphi_2 = |\varphi_{i2} - \varphi_2| < \varphi_{\dot{a}\ddot{e}}. \end{cases} \quad (6)$$

Каждое из подмодульных выражений из (6) представляет собою угол расхождения между фазой опорного сигнала и фазой каждого из токов присоединения. Выражение (6) имеет две формы записи, объединенные условием «ИЛИ», что объясняется возможностью использования сгенерированного внутреннего опорного сигнала. При этом все аварийные токи в питающих присоединениях при КЗ на СШ могут находиться как в одной фазе со сгенерированным опорным сигналом, так и в противофазе к нему. Для приведенного на рис. 3, а случая при внутреннем КЗ аварийные токи i_1 и i_2 находятся в одной фазе с опорным током i_3 . При этом модули расхождения фаз между токами присоединений и опорным током $\Delta\varphi_1$ и $\Delta\varphi_2$ не превышают уставку $\varphi_{бл}$.

Условие пуска и срабатывания защиты выполняется $(\Delta\varphi_1 < 90^\circ) \cap (\Delta\varphi_2 < 90^\circ) \rightarrow F_2 = "1"$.

При внешнем КЗ, как показано на рис. 3, б, ток в поврежденном присоединении i_1 оказывается в противофазе к опорному сигналу, в то время как ток i_2 не изменяет своей фазы по отношению к нему, следовательно, условие пуска защиты не выполняется:

$$(\Delta\varphi_1 > 90^0) \cap (\Delta\varphi_2 < 90^0) \rightarrow F_2 = "0".$$

Повышение быстродействия ДФЗШ согласно рассматриваемому способу ее реализации, подобно способу 1, обеспечивается путем использования для сравнения фаз токов как положительных, так и отрицательных их полувольт.

Алгоритм действия ДФЗШ согласно **способу 3** основан на определении длительности интервала совпадения импульсов напряжения положительной и отрицательной полярностей, сформированных из вторичных токов присоединений и их дифференциального тока. Отличием указанного способа по сравнению с рассмотренными в [2] является использование дополнительной информации о фазе дифференциального тока, что способствует повышению селективности и надежности действия защиты, сравнение фаз токов в которой осуществляется посредством определения длительности интервала совпадения разнополярных импульсов, сформированных из вторичных токов.

Логическое выражение соответствующее **способу 3** имеет следующий вид:

$$F_3 = \left[(S_{1+} \cap S_{2+} \cap S_{3+} \cap S_{dif+}) \cup (S_{1-} \cap S_{2-} \cap S_{3-} \cap S_{dif-}) \right] D(t), \quad (7)$$

где S_{dif+} , S_{dif-} – импульсы положительной и отрицательной полярностей, сформированные из соответствующих им полувольт дифференциального тока, который в «идеальном» случае (ТТ не имеют погрешностей) имеет место только лишь при внутренних КЗ.

Как показано на рис. 4, сравнение фаз токов согласно способу 3 осуществляется путем определения длительности интервала совпадения импульсов t_{s+} (t_{s-}), сформированных из полувольт токов i_1 - i_3 и их дифференциального тока i_{dif} . Измерение длительности интервала t_{s+} (t_{s-}) осуществляется на протяжении одного периода тока и каждый последующий его период измеренные значения указанного интервала обновляются.

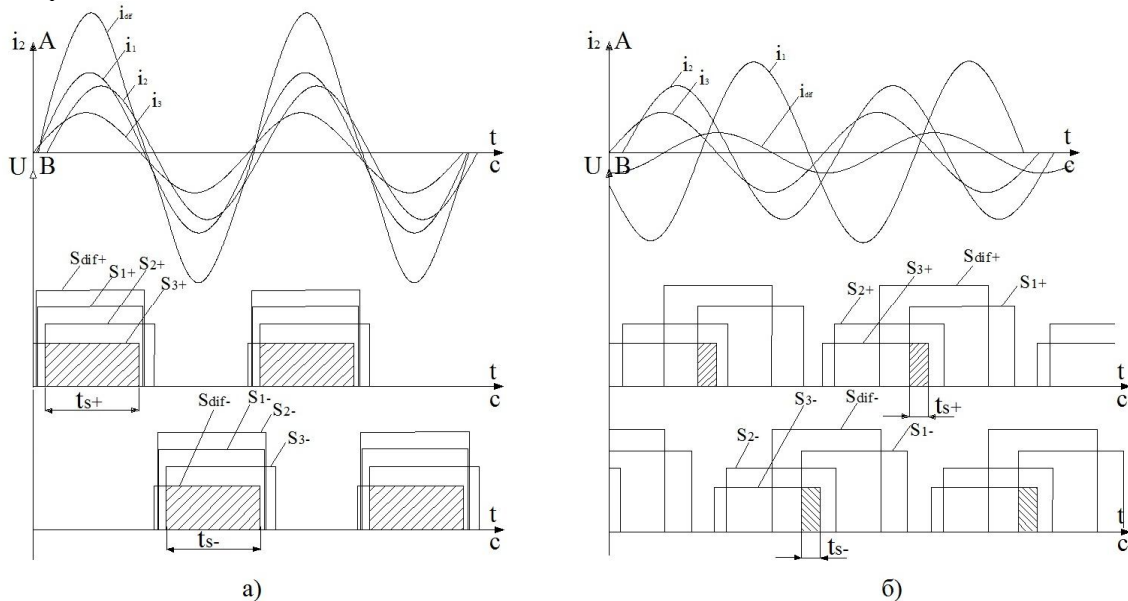


Рис. 4

При внутренних КЗ (рис. 4, а) дифференциальный ток имеет некоторое максимальное значение, его фаза совпадает с фазами токов всех питающих КЗ присоединений, при этом длительность измеренного интервала t_{s+} (t_{s-}) является также максимальной и превышает уставку срабатывания ДФЗШ. При внешних КЗ (рис. 4, б) ток в поврежденном присоединении изменяет свою фазу на противоположную, при этом в дифференциальной цепи защиты имеется некий небаланс токов i_{dif} , обусловленный преимущественно разностью погрешностей ТТ разных присоединений, фаза которого занимает некоторое промежуточное значение между фазами противоположно направленных токов, чем создается дополнительное блокирующее действие защиты при внешних КЗ. Длительность интервала t_{s+} (t_{s-}) при этом значительно сокращается и не превышает уставки срабатывания ДФЗШ.

Для пуска и срабатывания ДФЗШ требуется справедливость выражения

$$t_s > T_s, \quad (8)$$

где T_S – расчетный параметр, значение которого соответствует принятой уставке $\varphi_{\text{от}}$, выраженной в единицах измерения времени (мс).

Следовательно, при выборе уставки $\varphi_{\text{от}}$, равной 90° или же 5 мс, согласно рекомендациям [3], при внутренних КЗ будет выполняться условие $t_S > 5$ мс.

Алгоритм действия ДФЗШ согласно **способу 4** основан на определении длительности пауз в совокупностях разнополярных импульсов напряжения, сформированных из вторичных токов присоединений, и их последующем сравнении между собой. Отличием указанного способа действия ДФЗШ от ранее рассмотренных, а также предложенных в [2], является использование дополнительной информации о разности длительностей этих пауз путем применения логической операции «Равнозначность» («Эквивалентность»), что позволяет повысить селективность ДФЗШ в переходных режимах, в частности, исключить вероятность ее излишнего срабатывания из-за влияния свободной затухающей составляющей аварийного тока, приводящей к его несимметрии относительно оси времени и, как следствие, к появлению отличий между длительностями пауз в совокупностях разнополярных импульсов.

Логическое выражение, соответствующее **способу 4**, имеет следующий вид:

$$F_4 = \left[\left((\bar{S}_{1+} \cap \bar{S}_{2+} \cap \bar{S}_{3+}) \cup (\bar{S}_{1-} \cap \bar{S}_{2-} \cap \bar{S}_{3-}) \right) \cap \right. \\ \left. \cap \left((\bar{S}_{1+} \cap \bar{S}_{2+} \cap \bar{S}_{3+}) \equiv (\bar{S}_{1-} \cap \bar{S}_{2-} \cap \bar{S}_{3-}) \right) \right] D(t), \quad (9)$$

где $S_1 \equiv S_2$ – логическая операция равнозначности (эквивалентности).

Для пуска и срабатывания ДФЗШ требуется справедливость выражения

$$\begin{cases} T_{p+} > T_p \cup T_{p-} > T_p, \\ |T_{p+} - T_{p-}| \leq \Delta T_p, \end{cases} \quad (10)$$

где T_{p+}, T_{p-} – длительность пауз в совокупностях импульсов положительной и отрицательной полярностей, мс; T_p – расчетный параметр защиты, значение которого соответствует принятой уставке $\varphi_{\text{от}}$, выраженной в единицах измерения времени (мс); ΔT_p – предельно допустимая разность между длительностями пауз в совокупностях разнополярных импульсов, по превышению которой защита должна блокироваться.

Функционирование ДФЗШ согласно **способу 4** показано на рис. 5. Измерение длительности пауз T_{p+} и T_{p-} осуществляется на протяжении одного периода тока и каждый последующий его период измеренные значения этих интервалов обновляются. В установившихся режимах КЗ выполняется условие $T_{p+} = T_{p-}$, что не приводит к блокированию защиты. При КЗ на СШ (рис. 5, а) длительность пауз в совокупностях положительных T_{p+} и отрицательных T_{p-} импульсов является максимальной и превышает уставку срабатывания защиты T_p . При внешних КЗ (рис. 5, б) длительность указанных пауз значительно сокращается и не превышает уставки защиты.

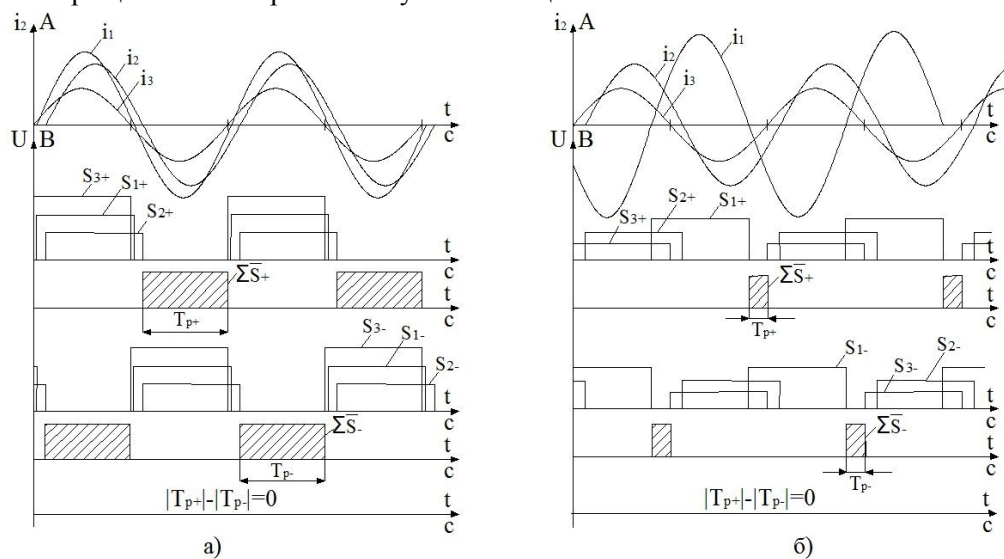


Рис. 5

Устройство ДФЗШ, алгоритм действия которого выполнен согласно предложенным авторами способам, при симметричных и несимметричных КЗ функционирует аналогично, поскольку в измерительных цепях защиты предусматривается раздельное сравнение фаз токов присоединений с использованием для этой цели трех РСФ. Приведенные в статье иллюстрации и анализ действия ДФЗШ являются характерными как для симметричных, так и для несимметричных аварийных режимов. При внутренних и внешних КЗ, независимо от их вида, соотношения между фазами векторов токов разных присоединений, которыми осуществляется подпитка КЗ, будут разными: при внутренних КЗ аварийные токи, протекающие поврежденными фазами по всем присоединениям, подключенным к поврежденной системе шин, находятся в одной фазе (имеют одинаковое направление – «к шинам»), а следовательно, в «идеальном» случае угол сдвига между фазами этих токов будет равен 0^0 (в действительности за счет влияния угловых погрешностей ТТ и прочих факторов, указанных в [2, 3], этот угол отличается от 0^0), что приведет к срабатыванию ДФЗШ. При внешних КЗ угол сдвига между фазами аварийных токов составит 180^0 , поскольку эти токи в поврежденном и в неповрежденных присоединениях находятся в противофазе, что не приводит к срабатыванию ДФЗШ.

Учет влияния токов нагрузки является неотъемлемой частью общего анализа и оценки поведения устройств РЗ в аварийных и прочих эксплуатационных режимах, в частности, устройств, имеющих абсолютную селективность действия. К таким устройствам относится и рассматриваемая в статье ДФЗШ, область применения которой не ограничивается конкретным типом защищаемой электроустановки и конфигурацией схемы ее первичных электрических соединений. При анализе этого влияния учитывается состав и характер нагрузки, ее удаленность от места повреждения, вид КЗ и прочие факторы, которые могут повлиять на селективность и надежность действия защиты [4]. Мощные синхронные и асинхронные электродвигатели (ЭД), входящие в состав подключенной к СШ нагрузки, можно рассматривать в качестве источников подпитки КЗ, которые оказывают аналогичное влияние на поведение ДФЗШ в этих режимах, что и синхронные генераторы. При повреждении защищаемой системы СШ аварийные токи от всех питающих место КЗ присоединений, в том числе токи подпитки от мощных ЭД нагрузки, будут иметь одинаковое направление – к поврежденным шинам подстанции, что не приведет к нарушению селективности защиты. Несколько иное влияние на поведение ДФЗШ в аварийных режимах могут оказывать тупиковые присоединения, в состав нагрузки которых входят асинхронные ЭД относительно небольшой мощности или же достаточно удаленные от шин, которые не способны длительно подпитывать возникшее на шинах подстанции КЗ из-за невозможности по принципу своего действия и конструктивным особенностям перехода в устойчивый генераторный режим. В связи с этим подпитка КЗ на шинах от указанных ЭД, то есть их кратковременный переход в генераторный режим, возможна только в начальный момент КЗ, а именно на протяжении нескольких периодов тока, после чего подпитка КЗ резко сменяется потреблением тока из сети [2, 4]. В рассматриваемых режимах из-за влияния токов нагрузки в зависимости от метода выполнения измерительных цепей ДФЗШ возможна неправильная работа защиты, о чем сказано в [2]. Более подробные результаты проведенного анализа влияния нагрузки на функционирование ДФЗШ в аварийных режимах приведены в [4].

Для анализа эффективности использования каждого из усовершенствованных авторами способов сравнения фаз токов реагирующим органом ДФЗШ проведены исследования путем имитационного моделирования действия защиты в установившихся и переходных режимах КЗ, анализ полученных результатов которого приведен в [10]. Выбор наиболее целесообразного способа сравнения фаз токов осуществлен на основании составления их сравнительной характеристики. В качестве критериев оценки были приняты следующие: быстродействие РСФ в установившихся и переходных режимах КЗ; селективность действия; устойчивость функционирования РСФ в переходных режимах КЗ; надежность действия; простота способа.

Полученные результаты были проанализированы и обобщены в таблице.

Преимущества предложенных авторами способов сравнения фаз токов в ДФЗШ следующие.

1. *Перед применяемыми в настоящее время устройствами ДЗШ [5, 7, 9]:*

– более надежная отстройка от установившихся и переходных токов небаланса при внешних КЗ ввиду отсутствия пусковых органов, реагирующих на абсолютные значения токов;

– более высокая чувствительность благодаря использованию единого принципа сравнения фаз токов для идентификации внутренних КЗ независимо от кратности аварийного тока и наличия в нем апериодических составляющих;

– снижение требований к характеристикам и условиям эксплуатации ТТ, ко вторичным цепям которых подключена ДФЗШ, за счет исключения влияния на защиту токовых погрешностей ТТ.

№	Критерий сравнения	Обобщенные результаты исследований			
		Способ F ₁	Способ F ₂	Способ F ₃	Способ F ₄
1	Быстродействие, мс установившийся р-м переходный р-м	25 36	35 40	27 29	25 37
2	Селективность	Не нарушается в установившихся и переходных режимах КЗ			
3	Надежность функционирования	Высокая надежность на несрабатывание достигается проверкой трех пусковых условий согласно выражению (1)	Высокая надежность на срабатывание за счет очередного сравнения фаз каждого из токов с фазой опорного сигнала, но потеря этого сигнала может привести к неправильному действию защиты	Высокая надежность достигается определением фазы дифференциального тока и ее последующим сравнением с фазами токов каждого присоединения	Менее надежный. Для повышения надежности на несрабатывание в переходных режимах внешних КЗ производится сравнение длительностей пауз в совокупностях разнополярных импульсов
4	Устойчивость в переходных режимах КЗ	Нарушается ввиду существенного увеличения времени отключения КЗ (более чем на 10 мс)	Не нарушается, КЗ отключается практически с тем же быстродействием, что и в установившихся режимах КЗ (отличие во времени не превышает 10 мс)		Нарушается ввиду существенного увеличения времени отключения КЗ, (более чем на 10 мс)
5	Простота реализации способа	Усложнен наличием трех проверочных условий пуска защиты, согласно выражению (1)	Относительно прост ввиду очередного сравнения фаз каждого из токов присоединений с фазой опорного сигнала	Наиболее сложен, так как дополнительно требуется вычисление дифференциального тока с последующим определением его фазы	Наиболее прост ввиду проверки одного условия пуска ДФЗШ согласно выражению (9) – длительности пауз в совокупностях разнополярных импульсов; сравнение длительностей пауз является доп. условием

2. Перед известными способами реализации действия ДФЗШ [2]:

– более высокая надежность защиты на несрабатывание при отсутствии повреждения СШ благодаря использованию дополнительных проверочных условий, выполнение которых требуется для пуска и срабатывания ДФЗШ;

– более высокая селективность действия защиты за счет реализации дополнительных логических условий, позволяющих обеспечить надежное блокирование защиты при внешних КЗ, в частности, в переходных режимах, и ее срабатывание при внутренних КЗ.

Выводы. Авторами проанализированы недостатки существующих защит СШ и предложены решения по усовершенствованию способов выполнения их дифференциально-фазной защиты, для каждого из которых приведены логические выражения и иллюстрации действия защиты при внешних и внутренних КЗ. Приведенные в статье результаты получены при несколько идеализированных условиях, в частности, не учитывались факторы, влияющие на отличие угла сдвига между аварийными токами от 0° – при внутренних КЗ и от 180° – при внешних КЗ. Последующее проведение опытов лабораторного образца устройства ДФЗШ позволит уточнить полученные результаты, качественные особенности каждого из предложенных способов сравнения фаз токов, выбранные уставки защиты и эффективность ее применения.

На основании сравнительной характеристики делаем вывод, что наиболее целесообразным к применению является **способ 3**, который основан на использовании совокупностей разнополярных импульсов напряжения, сформированных из полуволн вторичных токов присоединений и их диффе-

ренциального тока, благодаря следующим преимуществам: высокой надежности, которая достигается путем дополнительного определения фазы дифференциального тока и ее последующего сравнения с фазами токов ТТ присоединений, подключенных к общей СШ; достаточно высокому быстродействию защиты, не превышающее 30 мс в установившихся и переходных режимах внутренних КЗ; абсолютной селективности и устойчивости защиты в переходных режимах КЗ при наличии в аварийном токе апериодической составляющей.

Несмотря на некоторую сложность реализации ДФЗШ согласно способу 3 по сравнению с другими способами, он является наиболее целесообразным для применения при разработке МП устройств ДФЗШ, т.к. улучшаются основные показатели РЗ СШ – надежность, селективность и чувствительность.

1. Афанасьев В.В., Адоньев Н.М., Жалалис Л.В., Сирота И.М., Стогний Б.С. Трансформаторы тока. – Л: Энергия, 1980. – 344 с.
2. Кужиков С.Л., Синельников В.Я. Защита шин электростанций и подстанций. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 184 с.
3. Ниценко В.В., Кулагин Д.А., Махлин П.В., Климко А.Н. Исследование основных расчетных параметров дифференциально-фазной защиты сборных шин энергообъектов и факторов электрической сети, оказывающих влияние на их выбор // Электротехника та електроенергетика. – 2015. – Вип. 2/2015. – С. 87–94. Режим доступа: [http://journal.zntu.edu.ua/et/files/ET22015/ET\(2\)_2015.pdf](http://journal.zntu.edu.ua/et/files/ET22015/ET(2)_2015.pdf)
4. Ніценко В.В., Кулагин Д.О. Дослідження методів реалізації вимірювальних кіл диференційно-фазного захисту збірних шин // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2017. – Вип. 24 (100). – С. 28–38. Режим доступу: <http://www.etks.opu.ua/?fetch=articles&with=topic&id=24>.
5. Правила устройства электроустановок: Глава 3.2. Релейная защита. – Х: Форт, 2009. – 704 с.
6. Сборник директивных материалов главтехуправления Минэнерго СССР: Электротехническая часть. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.
7. Технічна політика ДП «НЕК «Укренерго» у сфері розвитку та експлуатації магістральних та міждержавних електричних мереж : СОУ НЕК 20.261:2017. – К.: ДП «НЕК «Укренерго», 2017. – 76 с.
8. Distributed busbar protection REB500 including line and transformer protection: Operating instruction. – Baden: ABB Switzerland Ltd, 2011. – 65 p.
9. Gajic Zoran., Hamdy Faramawy, Li He, Klass Koppari, Lee Max. Modern design principles for numerical busbar differential protection // Relay protection and automation for electric power systems, April 25–28, 2017. – Saint-Petersburg, 2017. – Pp. 1–16.
10. Nitsenko V.V., Kulagin D.O. Investigation of operation of differential-phase protection of busbars system voltage of 110-750 kV // Scientific Bulletin of National Mining University. – 2017. – No 4. – Pp. 60–67.

ВДОСКОНАЛЕННЯ СПОСОБІВ РЕАЛІЗАЦІЇ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ СИСТЕМ ЗБІРНИХ ШИН РОЗПОДІЛЬЧИХ УСТАНОВОК

В.В. Ніценко¹, Д.О. Кулагін²

¹- ДП «НЕК «Укренерго» Дніпровська ЕС,
вул. Гребельна, 2, Запоріжжя, 69096, Україна.

E-mail: nicenkovladimir@gmail.com

²- Запорізький національний технічний університет,
вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, Україна, 69063.

E-mail: kulagindo@gmail.com

Проаналізовано недоліки диференційного струмового захисту збірних шин і відомих способів можливої реалізації їхнього диференційно-фазного захисту. Розроблено більш досконалі способи порівняння фаз струмів диференційно-фазним захистом шин (ДФЗШ), зокрема наведено логічні вирази для кожного запропонованого способу, що містять перевірочні умови, виконання яких необхідне для забезпечення надійного пуску і спрацювання захисту у разі ідентифікації аварійного режиму пошкодження системи шин, що захищається. Наведено ілюстрації дії захисту при використанні кожного з цих способів у режимах внутрішніх і зовнішніх коротких замикань. Вибір найбільш доцільного способу порівняння фаз струмів для подальшої його реалізації пристроєм ДФЗШ зроблений на підставі складання їхньої порівняльної характеристики за результатами теоретичних і практичних досліджень дії захисту в аварійних режимах. Зроблено висновки щодо переваг застосування запропонованого диференційно-фазного алгоритму функціонування пристроїв релейного захисту збірних шин.

Бібл. 10, рис. 5, табл. 1.

Ключові слова: релейний захист, диференційно-фазний захист шин, реле порівняння фаз, кут блокування, збірні шини, способи порівняння фаз струмів.

IMPROVEMENT IMPLEMENTATION METHODS OF RELAY BUSBARS PROTECTION OF SWITCHGEARS

V. Nitsenko¹, D. Kulagin²

¹- GP "NEC "Ukrenergo" Dnipro ES,
str. Hrebelna, 2, Zaporizhzhia, 69096, Ukraine.

E-mail: nickenkovladimir@gmail.com

²- Zaporozhye National Technical University,
str. Zhukovskoho, 64, Zaporizhzhia, 69063, Ukraine.

E-mail: kulagindo@gmail.com

The article analyzes all disadvantages of differential busbar protection and known methods of possible realization of their phase-differential protection. The authors improved more advanced methods for comparing current phases by phase-differential busbar protection, in particular, logical operations for each proposed method are given, including verification conditions that are required to ensure reliable start and trip from protection when identifying the emergency condition of internal fault, and also illustrations of the protection operation are given when using each of these methods in case of internal and external faults. The choice of the most expedient method for comparing the currents phases for its subsequent implementation by the phase-differential protection device was made on the basis of building their comparative characteristics based on the results of theoretical and practical studies of the protection operation in emergency conditions. Conclusions were made about the advantages of using the proposed phase-differential algorithm of relay busbar protection operation. References 10, figures 5, table 1.

Keywords: relay protection, phase-differential busbar protection, phase comparison relay, block angle, methods of comparison currents phases.

1. Afanasiev V.V., Adoniev N.M., Galalis L.V., Sirota I.M., Stogniy B.S. Current transformers. – Leningrad: Energiia, 1980. – 344 p.
2. Kuzhekov S.L., Sinelnikov V.Y. Busbar protection powerstation and substation. – Moskva: Energoatomizdat, 1983. – 184 p. (Rus)
3. Nitsenko V.V., Kulagin D.O., Makhlin P.V., Klimko A.N. Investigations of main counted parametrs of differential-phase busbars protection and factors of power grid, which influences for its setting // *Elektrotekhnika i Elektroenergetika*. – 2015. – Vypusk 2. – Pp. 87–94. (Rus)
Available at: [http://journal.zntu.edu.ua/et/files/ET22015/ET\(2\)_2015.pdf](http://journal.zntu.edu.ua/et/files/ET22015/ET(2)_2015.pdf)
4. Nitsenko V.V., Kulagin D.O. Investigation methods of implementation measurement circuits of busbar's protection system // *Elektrotekhnichni ta kompiuterni systemy*. – 2017. – Vypusk 24 (100). – Pp. 28–38. (Ukr)
Available at: <http://www.etks.opu.ua/?fetch=articles&with=topic&id=24>.
5. The rules of electrical. Head 3.2. Relays protections. – Kharkov: Fort, 2009. – 704 p. (Rus)
6. Collection of guidance materials main technical management USSR Ministry of Energy. – Moskva: Energoatomizdat, 1985. – 304 p. (Rus)
7. Technical policy of SE "NEC" Ukrenergo" in the field of development and operation of trunk and interstate electric networks. – Kyiv: Ukrenerho, 2017. – 76 p. (Ukr)
8. Distributed busbar protection REB500 including line and transformer protection: Operating instruction. – Baden: ABB Switzerland Ltd, 2011. – 65 p.
9. Gajic Zoran, Hamdy Faramawy, Li He, Klass Koppari, Lee Max. Modern design principles for numerical busbar differential protection // *Relay protection and automation for electric power systems*, April 25–28, 2017, Saint-Petersburg, Russia. – Saint-Petersburg, 2017. – Pp. 1–16.
10. Nitsenko V.V., Kulagin D.O. Investigation of operation of differential-phase protection of busbars system voltage of 110–750 kV // *Scientific Bulletin of National Mining University*. – 2017. – No 4. – Pp. 60–67.

Надійшла 28.10.2015
Остаточний варіант 30.08.2017