

УДК 621.316.925

Ниценко В. В.<sup>1</sup>, Кулагин Д. А.<sup>2</sup>, Махлин П. В.<sup>3</sup>, Клишко А. Н.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Инж. оперативно-расчетной службы релейной защиты и противоаварийной автоматики ГП «НЭК «Укрэнерго»  
Днепропетровская ЭС, аспирант кафедры ЭПП, Запорожский национальный технический университет, Украина

<sup>2</sup>Канд. техн. наук, профессор кафедры ЭПП, Запорожский национальный технический университет, Украина

<sup>3</sup>Канд. техн. наук, доцент кафедры ЭПП, Запорожский национальный технический университет, Украина

<sup>4</sup>Кандидат технических наук, доцент кафедры ЭПП ЗНТУ, Запорожский национальный технический университет,  
Украина

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ РАСЧЕТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ФАЗНОЙ ЗАЩИТЫ СБОРНЫХ ШИН ЭНЕРГООБЪЕКТОВ И ФАКТОРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ, ОКАЗЫВАЮЩИХ ВЛИЯНИЕ НА ИХ ВЫБОР

В статье рассмотрены вопросы о возможности применения релейной защиты систем сборных шин распределительных устройств напряжением 110–750 кВ электрических станций и подстанций, выполненной с использованием дифференциально-фазного принципа ее действия в качестве основного и единственного. Материалы исследований направлены, прежде всего, на устранение имеющихся недостатков продольной дифференциальной защиты шин, эксплуатирующейся в настоящее время. Определены основные расчетные параметры дифференциально-фазной защиты, выбором которых обеспечивается ее селективная и надежная работа во всех возможных режимах энергосистемы. Приведена поясняющая структурная схема и рабочая характеристика защиты. Исследованы факторы, оказывающие непосредственное влияние на погрешность определения реагирующим органом защиты соотношений между фазами токов, циркулирующих по присоединениям, подключенным к системе сборных шин. Определена степень влияния каждого из этих факторов, а также возможные способы отстройки защиты от этого влияния. Проанализирована возможность применения дифференциально-фазного принципа для защиты сборных шин исходя из условия обеспечения ее селективности и достаточной чувствительности в нормальном режиме при внешних коротких замыканиях на отходящих от шин присоединениях и при повреждениях в зоне действия защиты. Руководствуясь принятыми допущениями при выполнении приближенного расчета угловых погрешностей трансформаторов тока в переходных режимах энергосистемы, была получена характеристика, которая позволяет установить зависимость изменения величин этих погрешностей от времени существования переходного процесса в электрической сети. В заключении, на основании полученных от проведенных исследований результатов, разработана методика по выбору параметров срабатывания дифференциально-фазной защиты, которая отличается от методики по расчету подобной ей по типу релейной защиты линий электропередач и учитывает все особенности применения дифференциально-фазного принципа для защиты сборных шин, рассмотренные в статье.

**Ключевые слова:** релейная защита, сборные шины, дифференциально-фазная защита, орган сравнения фаз токов, фазная характеристика, угол блокировки, уровень формирования импульсов.

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее ответственных элементов электрических сетей являются сборные шины распределительных устройств электростанций и подстанций. На шины электростанций происходит выдача генерируемой ими энергии в электрическую сеть, через шины крупных подстанций энергосистемы непрерывно осуществляется транзит выработанной станциями энергии, ее распределение и потребление. К шинам подключается большое количество присоединений, ввиду чего аварийные токи при повреждениях на шинах могут достигать критических для электрического оборудования значений, [5]. Кроме того, вследствие протекания сверхтоков, длительное понижение напряжения на шинах ниже 60% от номинального значения может привести к нарушению нормальной работы потребителей, а также к нарушению устойчивой работы энергосистемы и, как правило, для электростанций и крупных подстанций не допускается, [5]. Таким образом, сборные шины должны быть надеж-

но защищены от всех видов, возникающих на них повреждений и нарушений нормальных режимов работы.

**Актуальность.** Используемая в настоящее время продольная дифференциальная токовая защита шин имеет ряд принципиальных недостатков, подробно рассмотренных в [4], которые при определенных условиях могут привести к неправильному действию защиты и, как следствие, к возникновению технологического нарушения (возникновению аварии либо ее развитию). Эти недостатки могут быть устранены путем использования для защиты сборных шин дифференциально-фазного принципа ее действия, описание которого приведено в [6]. В настоящее время устройства дифференциально-фазной защиты используются в качестве основной защиты протяженных линий электропередач напряжением 110–750 кВ, как с ответвлениями, так и без них. Данный принцип не имеет существенных недостатков и может быть также использован в качестве основного в комплекте защиты сборных шин, тем самым повысив основные показатели эффективности его работы и устранив недостатки,

характерные дифференциальным защитами шин, [4]. Дифференциально-фазный принцип имеет некоторые особенности при его применении в качестве основного для защиты сборных шин, которые главным образом определяются наличием ряда факторов, оказывающих влияние на селективную работу защиты и определяющих возможность использования дифференциально-фазного принципа в данном случае. Все эти факторы, а также мероприятия по отстройке защиты от их влияния будут рассмотрены в данной статье.

**Цель работы** – исследование влияния погрешностей измерения токов присоединений на реагирующий орган дифференциально-фазной защиты сборных шин.

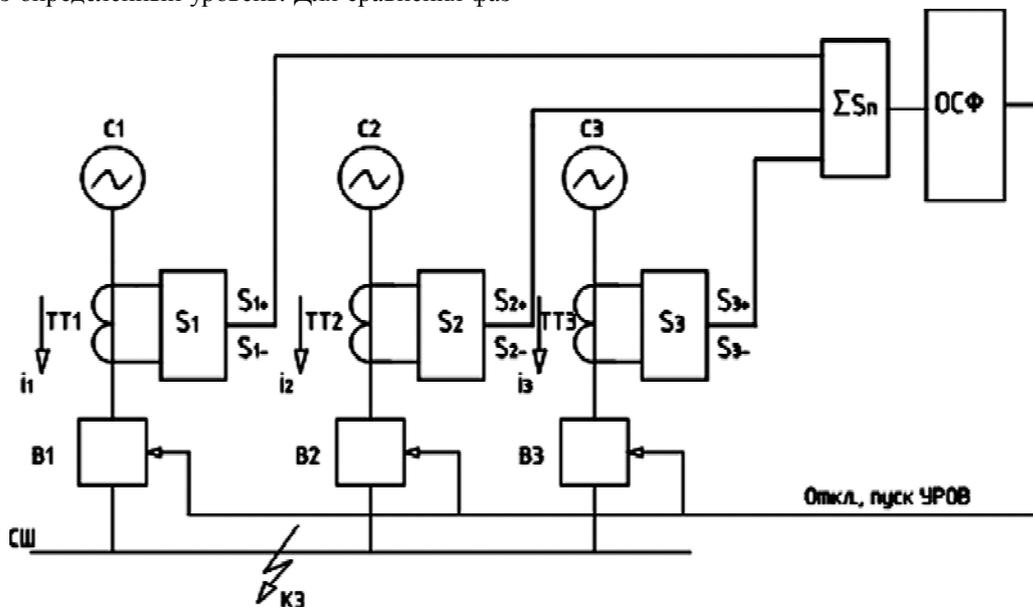
**Материалы исследований.** Принцип действия дифференциально-фазной защиты систем сборных шин, отличается от продольной дифференциальной токовой защиты. Ее принцип действия основан на непрерывном сравнении фаз (угловых соотношений) токов промышленной частоты, протекающих по концам защищаемой зоны, ограниченной комплектами трансформаторов тока, к вторичным цепям которых подключена защита.

Поясняющая структурная схема организации цепей дифференциально-фазной защиты шин представлена на рисунке 1, ее рабочая фазная характеристика на рисунке 2. Сравнение фаз токов всех присоединений, подключенных к одной системе шин, осуществляется посредством использования формирователей прямоугольных импульсов напряжения положительной и отрицательной полярности (двухполупериодная схема сравнения фаз токов) в момент перехода синусоиды тока через нуль либо через определенный уровень. Для сравнения фаз

токов может быть использован комбинированный сигнал прямой и обратной последовательности  $I_1 + kI_2$  (подобно сигналу манипуляции ВЧ передатчиком дифференциально-фазной защиты воздушных линий 11–750 кВ), вычисленный из трех фазных токов  $I_A, I_B, I_C$ , и в то же время может быть использован сигнал тока каждой отдельной фазы (обеспечить пофазное сравнение фаз токов). Получение комбинированного сигнала позволяет значительно уменьшить количество измерительно-преобразовательных трактов защиты и частично разгрузить ЦПУ устройства, а также позволяет исключить вероятность ложной работы защиты по причине обрыва фазы одного из плеч ее токовых цепей. Фаза преобразованного прямоугольного сигнала с определенной долей погрешности преобразования совпадает с фазой синусоидального сигнала тока. Основным реагирующим органом защиты является орган сравнения фаз токов, который формирует реакцию защиты на возмущения, возникающие в электрической сети, путем определения соотношений между фазами сигналов, преобразованных формирователями.

К основным расчетным параметрам дифференциально-фазной защиты шин относятся:

- 1) Уровень формирования прямоугольных импульсов напряжения из полуволн синусоиды, используемого для сравнения фаз токов сигнала (комбинированного тока  $I_1 + kI_2$ , либо фазного тока),  $\pm i_y$ .
- 2) Угол блокировки действия защиты,  $\pm \phi_{бл}$ .



**Рисунок 1** – Упрощенная структурная схема организации цепей дифференциально-фазной защиты одной системы шин:  $C1 \div C3$  – питающие энергосистемы;  $B1 \div B3$  – линейные выключатели  $TT1 \div TT3$  – трансформаторы тока присоединений;  $S1, S2, S3$  – формирователи прямоугольных импульсов;  $\Sigma S_n$  – сумматор; ОСФ – орган сравнения фаз токов;  $i_1 - i_3$  – токи присоединений;  $S_{1+}, S_{2+}, S_{3+}$  – прямоугольные импульсы положительной полярности;  $S_{1-}, S_{2-}, S_{3-}$  – прямоугольные импульсы отрицательной полярности.

Параметр  $\pm i_1$ , определяет минимальное мгновенное значение тока, по превышении которого из полуволн синусоидального сигнала  $I_1 + kI_2$  (либо фазного тока  $I_A, I_B, I_C$ ) формируются прямоугольные импульсы напряжения соответствующей полярности. Использование данного параметра может оказаться необходимым для исключения возможного блокирования защиты токами нагрузки тупиковых присоединений при несимметричных повреждениях на системе шин, [2].

Углом блокировки защиты  $\pm\varphi_{\text{бл}}$  определяется предельный угол расхождения фаз токов присоединений, подключенных к одной системе шин, от  $180^\circ$  при внешних КЗ и в нормальном режиме работы электрической сети при котором действие защиты должно надежно блокироваться. Выбором  $\pm\varphi_{\text{бл}}$  обеспечивается селективность действия защиты, исключается вероятность ее излишнего действия при работе трансформаторов тока с повышенными погрешностями в переходных режимах и при влиянии прочих факторов.

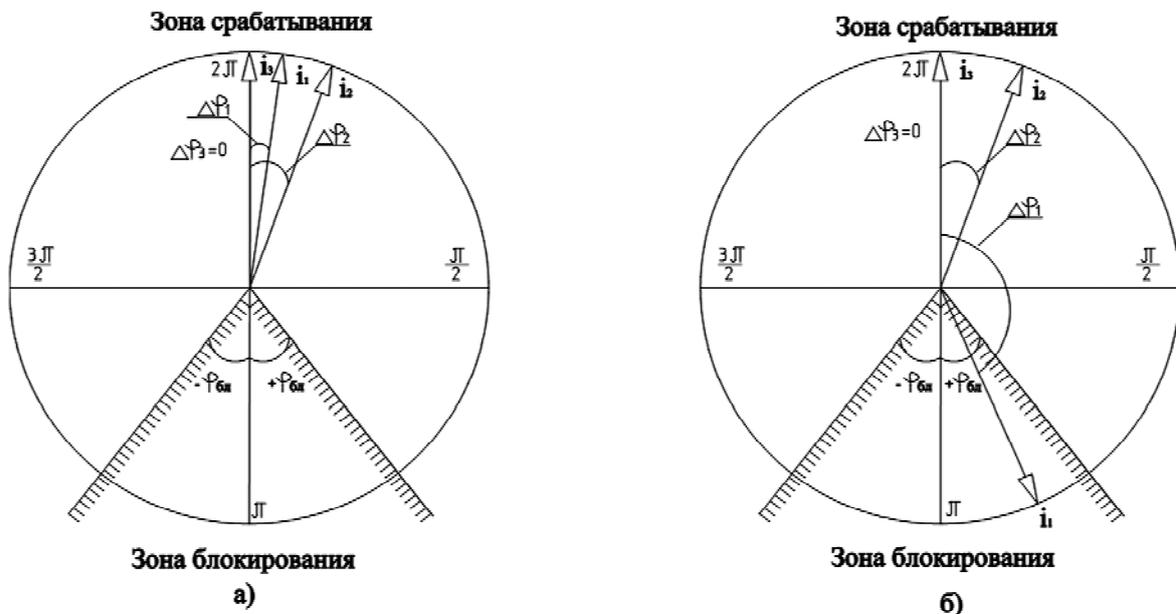
К основным факторам, определяющим выбор угла блокировки защиты  $\pm\varphi_{\text{бл}}$ , относятся, [1, 2]:

- 1) Углы расхождения векторов ЭДС генераторов энергосистем питающих присоединений в момент возникновения КЗ.
- 2) Углы сопротивления воздушных линий.
- 3) Токи нагрузки при несимметричных КЗ на системе шин и внешних КЗ.
- 4) Угловые погрешности измерительных трансформаторов тока.

Углы расхождения векторов ЭДС генераторов питающих энергосистем  $\Delta\delta_{\Gamma}$  при относительно малых временах локализации КЗ (не превышающих 2–3 периодов) оказываются незначительными и существенно не влияют на соотношения между фазами токов, а следовательно и на выбор значения угла блокировки защиты. При этом следует учесть, что в момент замыкания электрической связи между раздельно работающими энергосистемами, при отсутствии включенных между ними обходных связей, угол  $\Delta\delta_{\Gamma}$  по условию сохранения устойчивости параллельной работы этих энергосистем при их объединении, согласно [2], не должен превышать  $\pm 60^\circ$ . Это обеспечивается применением цепей автоматической синхронизации в схемах управления выключателями.

Различие углов сопротивления питающих ЛЭП, а также токи нагрузки при несимметричных КЗ при достаточно высоком быстродействии дифференциально-фазной защиты также не оказывают существенного влияния на процесс измерения органом сравнения фаз соотношений между фазами токов. Учет их влияния не обязателен при выборе значения угла блокировки защиты  $\pm\varphi_{\text{бл}}$ , так как он должен учитывать только максимальные углы расхождения векторов входящих и исходящих токов присоединений от  $180^\circ$  в нормальном режиме и при внешних КЗ.

Угловая погрешность измерительных трансформаторов тока  $\Delta\delta_{\Gamma\Gamma}$  достигает максимальных значений в переходных режимах электрической сети. Поскольку защи-



**Рисунок 2** – Фазная характеристика дифференциально-фазной защиты шин: а – КЗ в зоне действия защиты; б – внешнее КЗ;  $i_1, i_2, i_3$  – токи присоединений;  $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2, \Delta\varphi_3$  – угловое смещение векторов токов  $i_1, i_2, i_3$  от «условного» 0 градусов фазной характеристики защиты;  $\pm\varphi_{\text{бл}}$  – угол блокировки защиты

та не отстроена по времени от этих режимов (время действия защиты оказывается меньшим времени затухания апериодической составляющей первичного тока  $T_1$ ), угловая погрешность трансформаторов тока в переходных режимах является определяющим фактором при выборе угла блокировки защиты. Угловые погрешности изменяются в меньшей мере, чем токовые [2], и при максимальном содержании апериодической составляющей в первичном токе с постоянной времени затухания  $T_1 \rightarrow \infty$ , угловая погрешность в пределе может достигать  $90^\circ$  при следующих допущениях, [3]:

– апериодическая составляющая первичного тока КЗ полностью трансформируется во вторичную обмотку одного из комплектов трансформаторов тока за счет бесконечно большого индуктивного сопротивления ветви намагничивания;

– во вторичном токе другого комплекта трансформаторов тока апериодическая составляющая и высшие гармоники отсутствуют, вследствие чего синусоидальная форма вторичного тока практически не искажена, начальная фаза вторичного тока равна нулю;

– на протяжении одного полупериода промышленной частоты апериодическая составляющая тока, трансформируемая во вторичную обмотку трансформатора тока, не затухает, следовательно, является постоянной величиной.

Используя принятые допущения, закон изменения вторичного тока обоих комплектов трансформаторов тока для одного полупериода промышленной частоты можно выразить системой уравнений:

$$\begin{cases} y(t) = i_2(t) = I_1' \sin(\omega t); \\ y(t) = I_1' e^{-\frac{t}{T_1}}. \end{cases} \quad (1)$$

Приравняв правые части уравнений системы, получаем следующий результат:

$$I_1' \sin(\omega t) = I_1' e^{-\frac{t}{T_1}}. \quad (2)$$

Угловая погрешность в данном случае определяется параметром  $t$ , который представляет фактический угол расхождения кривых первичного тока, приведенного ко вторичной обмотке, и вторичного тока за счет влияния апериодической составляющей, трансформируемой во вторичную обмотку трансформатора тока. Из (2) следует выражение для определения угловой погрешности трансформатора тока:

$$\delta_{TT} = t = \frac{1}{\omega} \arcsin \left( \frac{I_1' e^{-\frac{t}{T_1}}}{I_1'} \right). \quad (3)$$

Выражение (3) запишем следующим образом:

$$\delta_{TT} = \frac{1}{\omega} \arcsin \left( e^{-\frac{t}{T_1}} \right). \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что угловая погрешность трансформаторов тока в переходных режимах зависит от постоянной времени затухания первичной цепи  $T_1$ . Зависимость изменения величины угловой погрешности трансформаторов тока от параметра  $T_1$  ( $\Delta\delta_{TT} = f(T_1)$ ) представлена на рисунке 3, при  $T_1 = (0,01 \div 0,3)c$ .

Функция  $\Delta\delta_{TT} = f(T_1)$  имеет нелинейный характер. Угловая погрешность трансформаторов тока в переходных режимах стремительно растет с увеличением постоянной времени затухания первичной цепи  $T_1$  на интервале  $T_1 \in [0; 0,1]c$  и в дальнейшем продолжает плавно увеличиваться, достигая своих предельных значений. Постоянная времени  $T_1$ , прежде всего, определяется параметрами электрической сети, а именно соотношением ее эквивалентного индуктивного и активного сопротивлений в момент возникновения КЗ,  $T_1 = \frac{x_1}{\eta}$ .

В случае, если эквивалентное активное сопротивление короткозамкнутой электрической цепи пренебрежимо мало по сравнению с ее индуктивностью  $\eta \ll x_1$ , пренебрегая  $\eta$  можно считать, что переходный процесс затухает с постоянной времени  $T_1 \rightarrow \infty$ . При этом  $\Delta\delta_{TT}$  достигает своего максимального значения, которое определяется из выражения:

$$\delta_{TT} = \lim_{T_1 \rightarrow \infty} \arcsin(e^{-\frac{t}{T_1}}) = \arcsin(1) = 90^\circ. \quad (5)$$

При разработке методики выбора основных параметров защиты следует руководствоваться тем, что защита будет обладать высоким быстродействием и будет производить сравнение соотношений между фазами токов по их первым гармоникам.

При выборе  $\pm\varphi_{\delta l}$  следует учитывать, что в нормальном режиме работы и при внешних КЗ действие защиты должно быть надежно заблокировано, что обуславливает необходимость иметь как можно большее значение данного параметра.

Как было отмечено ранее, при внешних КЗ наибольшую опасность нарушению селективной работы защиты представляют угловые погрешности трансформаторов тока; в нормальном режиме работы электрической сети  $\pm\varphi_{\delta l}$  преимущественно определяется допустимым углом несинхронного замыкания электрической связи

между отдельно работающими энергосистемами, который по условию сохранения устойчивости энергосистемы, не должен превышать  $60^{\circ}$ :

$$\begin{cases} \pm \varphi_{\text{бл}} \geq (\Delta\delta_{TT} = 90^{\circ}); \\ \pm \varphi_{\text{бл}} \geq (\Delta\delta_{\Gamma} = 60^{\circ}). \end{cases} \quad (6)$$

Таким образом, по условию обеспечения надежного блокирования защиты при внешних КЗ и в нормальном режиме работы, минимально необходимое значение угла блокировки защиты должно составлять  $\pm \varphi_{\text{бл}} = 90^{\circ}$ . При этом зона блокирования действия защиты должна быть не менее  $2\varphi_{\text{бл}} = 180^{\circ}$ .

При КЗ на системе шин целесообразно иметь сравнительно узкую зону блокирования, для обеспечения надежного отключения поврежденных защитой. Здесь необходим комплексный учет влияния факторов, которые в этом режиме могут оказывать блокирующее действие на защиту. Учитывая различие углов сопротивления линий  $\Delta\delta_C \leq 30^{\circ}$  и угловую погрешность трансформаторов тока  $\Delta\delta_{TT} \leq 90^{\circ}$  максимальная ширина зоны блокирования действия защиты при КЗ в зоне ее действия не должна превышать:

$$2\varphi_{\text{бл}} \leq 2\pi - \Delta\delta_{TT} - \Delta\delta_C, \quad (7)$$

$$2\varphi_{\text{бл}} = 360^{\circ} - 90^{\circ} - 30^{\circ} = 240^{\circ}.$$

Таким образом, в режиме внутреннего КЗ для ис-

ключения блокирования защиты необходимо иметь  $\varphi_{\text{бл}} \leq 120^{\circ}$ .

Для одновременного выполнения условий (6) и (7) значение  $\pm\varphi_{\text{бл}}$  следует принять равным наименьшему значению из интервала  $\varphi_{\text{бл}} \in [90^{\circ}, 120^{\circ}]$ ,  $\varphi_{\text{бл}} = 90^{\circ}$ . Эта уставка угла блокировки защиты может быть скорректирована в меньшую сторону ( $\varphi_{\text{бл}} < 90^{\circ}$ ), что может оказаться необходимым для повышения чувствительности защиты к КЗ на системе шин. При этом должно обязательно выполняться первое условие. Уменьшение значения уставки  $\pm\varphi_{\text{бл}}$  должно подтверждаться расчетами для каждого конкретного энергообъекта с учетом особенностей схемы его электроснабжения, главной схемы электрических соединений распределительного устройства и параметров прилегающей к нему электросети.

Рекомендации по выбору уровня формирования прямоугольных импульсов  $\pm i_y$  для дифференциально-фазных защит шин приведены в [2]. Согласно [2], в начальный момент возникновения несимметричного КЗ на системе шин, будет иметь место подпитка КЗ асинхронными электродвигателями нагрузки тупииковых присоединений, которая продолжается несколько периодов, что способствует правильной работе защиты. По мере затухания переходного процесса подпитка КЗ сменяется потреблением тока из сети, что приводит к возрастанию сдвигов между фазами аварийных токов питающих присоединений и токов нагрузки, протекающих по непов-

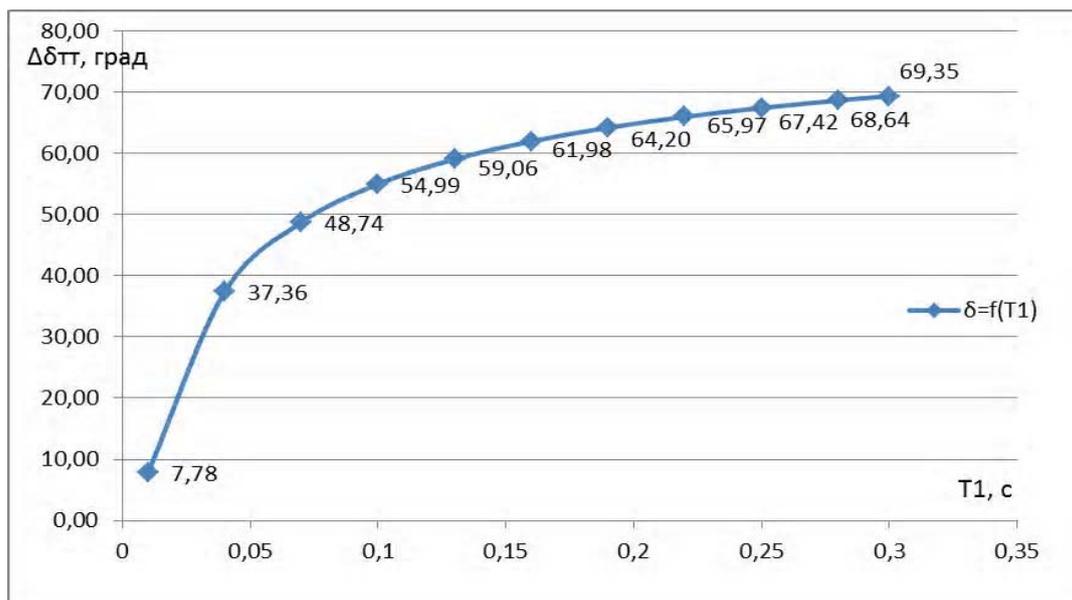


Рисунок 3 – Характер изменения угловой погрешности трансформаторов тока в переходных режимах в зависимости от постоянной времени затухания первичной цепи  $T_1$ .

режденным фазам тупиковых присоединений. Токи нагрузки тупиковых присоединений в этом случае могут оказывать блокирующее действие на защиту после смены подпитки режимом потребления тока из сети, так как они оказываются в противофазе к аварийному току, что является условием для блокирования защиты. В том случае, когда защита имеет достаточно высокое быстродействие, которое не превышает времени существования подпитки КЗ от нагрузки тупиковых присоединений, влияние токов нагрузки на работу защиты можно не учитывать и уровень формирования принять равным нулю. В тех случаях, когда время отключения защитой КЗ превышает время существования его подпитки от нагрузки и в некоторых других случаях, [2], выбор уставки уровня формирования является обязательным мероприятием и определяется следующими условиями:

- 1) Исключением блокирующего действия токов нагрузки при несимметричных КЗ на системе шин.
- 2) Отстройкой от погрешностей трансформаторов тока в переходных режимах КЗ.

По первому из них выбор  $\pm i_y$  следует производить в том случае, если защита действует со значительным замедлением либо же если возможен режим КЗ на шинах, при котором защита отключает только питающие присоединения, а тупиковые при этом остаются включенными. В случае неуспешного АПВ шин аварийный ток в поврежденной фазе (фазах) опробующего присоединения находится в противофазе с пусковыми токами нагрузки неповрежденных фаз (фазы) тупиковых присоединений. Такой же режим будет иметь место и при ручном включении выключателя питающего присоединения на устойчивое несимметричное КЗ при наличии подключенных к системе шин тупиковых присоединений. Уровень формирования в этом случае должен быть отстроен от пускового тока наиболее нагруженного тупикового присоединения. При наличии подключенных к тупиковым присоединениям трансформаторов с заземленными нейтралью уровень формирования определяется следующим выражением:

$$i_y = K_n \cdot (\overline{K_n \cdot I_\phi} - \overline{I_0}), \quad (8)$$

где  $\overline{I_\phi}$  – номинальный фазный ток нагрузки;  $K_n$  – коэффициент кратности пускового тока к номинальному,  $K_n = (2,5 \div 3) I_\phi$ ;  $\overline{I_0}$  – ток нулевой последовательности при несимметричном КЗ на системе шин.

При активно-индуктивной нагрузке, когда  $I_0 > I_\phi$ , токи нагрузки не оказывают блокирующего действия и уровень формирования можно принять равным нулю.

Однако указанная методика оказывается не пригодной к применению в случае использования комбинационного тока  $I_1 + kI_2$  в качестве сигнала для сравнения фаз. К формирователям импульсов не попадает ток ну-

левой последовательности, который присутствует в формуле (8). Из этого следует, что токи нагрузки в неповрежденных фазах тупиковых присоединений при несимметричных КЗ на системе шин будут оказывать блокирующее действие на защиту, если не принять должных мер по исключению этого воздействия. Также следует учесть, что выбор уровня формирования приведет к снижению чувствительности органа сравнения фаз токов к внешним отдаленным КЗ с малыми по величине аварийными токами, что может явиться причиной излишней работы защиты, а также приводит к появлению дополнительной угловой погрешности измерений фаз токов по переходу через  $\pm i_y$ .

Рассмотрим следующие варианты решения проблемы выбора  $\pm i_y$ :

- 1) Определение уровня формирования прямоугольных импульсов из комбинационного сигнала тока  $I_1 + kI_2$ , подключенных к системе шин присоединений по условию отстройки от максимальных значений токов самозапуска нагрузки и токов послеаварийных режимов.

- 2) Использование для сравнения фаз токов иного сочетания симметричных составляющих токов в комбинационном сигнале, в котором бы присутствовал ток нулевой последовательности.

Согласно первому из них, уровень формирования определяется исходя из отстройки от максимально возможного расчетного нагрузочного тока присоединения:

$$i_{y1} = K_n \cdot I_{нагр. макс.}, \quad (9)$$

где  $I_{нагр. макс.}$  – максимальное расчетное значение нагрузочного тока присоединения.

Данное выражение отличается от выражения (8) тем, что в нем не используется составляющая тока нулевой последовательности, которая отсутствует в комбинационном сигнале на выходе фильтра. Таким образом, отстройка производится только от максимально возможного тока нагрузки. Погрешность по переходу тока через  $\pm i_y$  не существенна и находится в пределах зоны, ограниченной значениями  $\pm \phi_{\text{дл}}$ .

Для второго варианта решения проблемы необходимо выделить из общего сигнала тока составляющей нулевой последовательности, которая имеет место лишь при КЗ с «землей». При двухфазных замыканиях, а также в случае, если нейтраль подключенного к тупиковому присоединению трансформатора окажется разземленной, формула для определения уровня формирования (8) преобразуется в выражение (9) и вышеуказанная проблема не будет решена.

Таким образом, при возникновении необходимости выбора уровня формирования для обеспечения правильного функционирования защиты, целесообразно использовать первый вариант решения данной проблемы при

условии подтверждения расчетом справедливости неравенства  $I_{КЗ.внеш.мин.} > K_H \cdot I_{нагр.макс.}$ , либо выполнения дополнительных мероприятий по повышению чувствительности органа сравнения фаз токов защиты к внешним удаленным КЗ. При этом угловая погрешность, обусловленная переходом тока через определенный уровень формирования, не оказывает влияние на селективность защиты при выборе максимального угла ее блокировки.

## ВЫВОДЫ

В статье рассмотрены основные факторы, учет которых необходим при выборе параметров срабатывания дифференциально-фазной защиты сборных шин, и выполнена оценка степени влияния каждого из них на работу защиты в нормальном режиме в условиях внешнего КЗ и КЗ в зоне действия защиты.

На основании полученных результатов разработана методика по выбору параметров срабатывания дифференциально-фазной защиты, которая отличается от методики по расчету подобной ей по типу релейной защиты линий электропередач и учитывает все особенности применения дифференциально-фазного принципа для защиты сборных шин, рассмотренные в статье.

Выбором угла блокировки защиты  $\pm\varphi_{бл}$ , прежде всего, обеспечивается ее селективная работа во всех возможных режимах электрической сети. Предельный угол расхождения фаз токов питающих присоединений определяется допустимым углом несинхронного замыкания транзитной связи между двумя питающими энергосистемами, который по условию сохранения устойчивости составляет  $\pm 60^0$ . При внешних КЗ на отходящих от шин распределительного устройства присоединениях этот угол определяется преимущественно угловыми погрешностями измерений трансформаторами тока, которые стремительно возрастают в переходных режимах КЗ и при самых неблагоприятных условиях могут достигать значений близких к  $90^0$ .

Выбором уровня формирования прямоугольных импульсов напряжения положительной и отрицательной полярности из комбинированного сигнала токов  $I_1 + kI_2$  обеспечивается отстройка защиты от возможного блокирующего действия токов нагрузки тупиковых присоединений при несимметричных КЗ на шинах. Этот параметр должен выбираться исходя из необходимости ис-

ключения возможности отказа защиты при таких условиях и, как правило, для каждого присоединения должен выбираться индивидуально с учетом отстройки от максимального нагрузочного тока для обеспечения надежного формирования импульсов из полуволн вторичного тока только в условиях возникновения аварийных режимов.

При решении вопроса выбора уставки параметра уровня формирования импульсов напряжения из полуволн токов каждого из присоединений необходимо также руководствоваться следующим:

- для повышения чувствительности защиты к КЗ в пределах защищаемой зоны и исключения ее излишнего действия при внешних отдаленных КЗ с незначительными по величине токами подпитки значение уровня формирования следует выбирать минимально возможным;
- в случае отсутствия присоединений, которые не подпитывают КЗ на шинах в первый момент времени переходного процесса, не использовать уставку уровня формирования (принять ее равной нулю).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кужеков С. Л. Дифференциальные защиты сборных шин: Электрические станции, выпуск №9 / Минэнерго СССР; С. Л. Кужеков, Б. Т. Грызлов, В. Г. Кудин и др. – Москва: 1978, с.51–58.
2. Кужеков С. Л. Защита шин электростанций и подстанций: / С. Л. Кужеков, В. Я. Синельников. – Москва: Энергоатомиздат, 1983. – 184 с.
3. Бобин Д. Н. Исследование и разработка методов выполнения защит шин на перспективной микропроцессорной базе: дис. ... кандидата техн. наук : 05.14.02 / Бобин Дмитрий Николаевич. – М., 1999. – 211 с.
4. Ниценко В. В. Перспективы использования дифференциально-фазного принципа для защиты систем сборных шин распределительных устройств 110–750 кВ: Электромеханические и энергосберегающие системы, выпуск №3 / КрНУ; В. В. Ниценко, Д. А. Кулагин. – Кременчуг: 2015, 9 с.
5. Правила устройства электроустановок: Глава 3.2. Релейная защита / Минэнерго Украины. – 7-е изд., перераб. и доп. – Харьков: Форт, 2009. – 704 с.
6. Федосеев А. М. Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей: учебное пособие для вузов / А. М. Федосеев. – Москва: Энергоатомиздат, 1984. – 520 с.

*Статья поступила в редакцию 12.12.2015*

Ниценко В. В.<sup>1</sup>, Кулагин Д. О.<sup>2</sup>, Махлин П. В.<sup>3</sup>, Клишко О. М.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Инженер ДП «НЕК «Укрэнерго» Дніпровська ЕС, асп. каф. ЕПП, Запорізький національний технічний університет, Україна

<sup>2</sup>Канд. техн. наук, профессор кафедры ЕПП, Запорізький національний технічний університет, Україна

<sup>3</sup>Канд. техн. наук, доцент кафедры ЕПП, Запорізький національний технічний університет, Україна

<sup>4</sup>Канд. техн. наук, доцент кафедры ЕПП, Запорізький національний технічний університет, Україна

### **ДОСЛІДЖЕННЯ ОСНОВНИХ РОЗРАХУНКОВИХ ПАРАМЕТРІВ ДИФЕРЕНЦІЙНО-ФАЗНОГО ЗАХИСТУ ЗБІРНИХ ШИН ЕНЕРГООБ'ЄКТІВ ТА ФАКТОРІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ЇХ ВИБІР**

*У статті розглянуті питання щодо можливості застосування релейного захисту систем збірних шин розподільчих пристроїв напругою 110–750 кВ електричних станцій та підстанцій виконаного з використанням*

диференційно-фазного принципу його дії у якості основного та єдиного. Матеріали досліджень у першу чергу направлені на усунення недоліків, що має поздовжній диференційний захист шин, що експлуатується в теперішній час. Визначені основні розрахункові параметри диференційно-фазного захисту систем збірних шин, вибором яких забезпечується його селективна та надійна робота у всіх можливих режимах енергосистеми. Наведена пояснювальна структурна схема та робоча характеристика захисту. Визначені фактори, що здійснюють безпосередній вплив на похибку визначення реагуючим органом захисту відношень між фазами струмів, що циркулюють приєднаннями, підключеними до системи шин. Визначена інтенсивність впливу кожного з цих факторів, а також можливі способи відлаштування захисту від цього впливу. Проаналізована можливість використання диференційно-фазного принципу для захисту збірних шин виходячи з умови забезпечення його селективності та достатньої чутливості в нормальному режимі, при зовнішніх коротких замиканнях на приєднаннях підключених до шин та при пошкодженнях в зоні дії захисту. Керуючись прийнятими припущеннями при виконанні приблизного розрахунку куткових похибок трансформаторів струму в перехідних режимах енергосистеми, була отримана характеристика, що дозволяє встановити залежність зміни величин даних похибок від часу існування перехідного процесу в електричній мережі. У підсумку, на основі отриманих від проведених досліджень результатів, розроблена методика з вибору параметрів спрацювання диференційно-фазного захисту, що відрізняється від методики з розрахунку подібного йому за типом захисту ліній електропередач та враховує всі особливості застосування диференційно-фазного принципу для захисту збірних шин, що розглянуті у статті.

**Ключові слова:** релейний захист, збірні шини, диференційно-фазний захист, орган порівняння фаз струмів, фазна характеристика, кут блокування захисту, рівень формування імпульсів.

Nicenko V. V.<sup>1</sup>, Kulagin D. A.<sup>2</sup>, Mahlin P.V.<sup>3</sup>, Klimko A. N.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Engineer for relays protection and automatic GP «NEC «Ukrenergo» Dneprovskaya ES, Postgraduate student of the department «Electrosupply of the industrial enterprises», ZNTU, Ukraine

<sup>2</sup>Ph.D., Professor of the department «Electrosupply of the industrial enterprises», ZNTU, Ukraine

<sup>3</sup>Ph.D., Associate Professor of the department «Electrosupply of the industrial enterprises», ZNTU, Ukraine

<sup>4</sup>Ph.D., Associate Professor of the department «Electrosupply of the industrial enterprises», ZNTU, Ukraine

#### **STUDY OF KEY DESIGN PARAMETERS OF DIFFERENTIAL-PHASE PROTECTION OF BUSBARS OF POWER FACILITIES AND FACTORS OF TLCTRICAL NETWORKS AFFECTING THEIR CHOICE**

The article deals with questions concerning to the main design parameters of differential-phase busbar protection switchgear with voltage 110–750 Kv of electric power stations and substations, the choice of which is provided by its selective and reliable operation in all possible power system conditions. Article contains the block diagram and operating characteristic of protection. The factors that have a direct impact on the determination error by the reacting body to protect the relationship between the phases of the currents circulating connections that are connected to the busbar system are determined. The influence degree of these factors as well as possible ways to tune away from its impact protection are given. Possibility of the differential-phase principle application for busbars protection on the basis of conditions for ensuring its sufficient sensitivity and selectivity in normal mode was analysed, when the external short circuit on the connections of the busbars and for faults in the protection zone of action. Guided by the assumptions made in carrying out an approximate calculation of the angular errors of the current transformers in the power system transient modes the characteristic which allows to set the dependence of the values of these errors on the lifetime of the transitional process in the electrical network is built.

**Keywords:** relays protection, differential-phase busbar protection, phase compare relay, phase characteristic, impulse formation level, protection block angle.

#### **REFERENCES**

1. Kuzhekov S. L., Gryzlov, V. G. Kudin B. T. Differential busbar protection, *Elektricheskie stantsiy*, 1978, Vol. 9, pp. 172–177.
2. Kuzhekov S. L., Sinelnikov V. Y. Zachita shin electrostantsiy i podstantsiy. Energoatomizdat, Moscow, USSR, 1983.
3. Bobin D. N. Research and development methods of performance busbar protection prospectively based microprocessor, dissertation of Cand. Sci. (Tech.), 05.14.02, 1999.
4. Nicenko V. V. Prospects differential-phase principle to protect busbar system switchgears 110–750 kV, *Electromechanicheskie i energosberigaushie sistemi*, 2015. Vol. 3, pp. 158–166.
5. Pravila ustroystva electrostanovok. Glava 3.2. Releynaya zachita [The rules of electrical. Head 3.2. Relays protections], 2009, Fort, Kharkov, Ukraine.
6. Fedoseyev A. M. Releynaya zachita elektroenergeticheskikh sistem. Releynaya zachita setey [Relay protection of electric power systems. Relay protection networks], 1984, Energoatomizdat, Moscow, USSR.