

УДК 621.316.925

### ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ФАЗНОГО ПРИНЦИПА ДЛЯ ЗАЩИТЫ СИСТЕМ СБОРНЫХ ШИН РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ 110–750 КВ

**В. В. Ниценко**

Государственное предприятие «Национальная энергетическая компания «Укрэнерго» Днепровская электроэнергетическая система»

ул. Плотинная, 2, г. Запорожье, 69096, Украина. E-mail: nicenkovladimir@gmail.com

**Д. А. Кулагин**

Запорожский национальный технический университет

ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, Украина, 69063. E-mail: kulagindo@gmail.com

Рассмотрен вопрос о необходимости усовершенствования используемой в настоящее время релейной защиты систем сборных шин напряжением 110–750 кВ на объектах энергосистем с точки зрения возможности и целесообразности ее принципиального исполнения посредством непрерывного сравнения фаз первичных токов, циркулирующих по присоединениям, подключенным к системе сборных шин. Освещены проблемные вопросы, касающиеся некоторых особенностей проектирования и технической эксплуатации продольных дифференциальных защит шин и возможные пути их решения. Даны техническое описание и общая оценка дифференциально-фазной защиты шин, представлены ее фазные характеристики, проиллюстрирован принцип действия защиты в аварийных ситуациях при повреждении на участке защищаемой зоны и за ее пределами. Сформулированы дальнейшие перспективы развития дифференциально-фазного принципа применительно к защите шин путем его реализации с использованием современных микропроцессорных систем релейной защиты, обладающих явными преимуществами по сравнению со своими предшественниками. По результатам исследований сделаны выводы, указывающие на преимущества использования дифференциально-фазного принципа для защиты систем сборных шин, внедрение которого будет способствовать повышению эффективности функционирования защиты и устранению выявленных при эксплуатации продольных дифференциальных защит недостатков.

**Ключевые слова:** дифференциально-фазная защита шин, микропроцессорное устройство релейной защиты, система сборных шин, распределительное устройство, орган сравнения фаз.

### ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНО-ФАЗНОГО ПРИНЦИПУ ДЛЯ ЗАХИСТУ СИСТЕМ ЗБІРНИХ ШИН РОЗПОДІЛЬЧИХ ПРИСТРОЇВ 110–750 КВ

**В. В. Ніценко**

Державне підприємство «Національна енергетична компанія «Укрэнерго» Дніпровська електроенергетична система»

вул. Гребельна, 2, м. Запоріжжя, 69096, Україна. E-mail: nicenkovladimir@gmail.com

**Д. О. Кулагін**

Запорізький національний технічний університет

вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063, Україна, E-mail: kulagindo@gmail.com

Розглянуто питання щодо необхідності вдосконалення релейного захисту систем збірних шин напругою 110–750 кВ, встановленого на об'єктах енергосистем з точки зору можливості й доцільності його принципового виконання шляхом безперервного порівняння фаз первинних струмів, циркулюючих приєднаннями, що підключені до системи збірних шин. Висвітлені проблемні питання стосовно деяких особливостей проектування й технічної експлуатації поздовжнього диференціального захисту шин і можливі шляхи їх вирішення. Подано технічний опис та загальна оцінка диференціально-фазного захисту шин, надано його фазні характеристики, проілюстровано принцип дії захисту в аварійних ситуаціях при пошкодженні на ділянці зони, що захищається ним, та за її межами. Сформульовано подальші перспективи розвитку диференціально-фазного принципу стосовно захисту шин шляхом його реалізації з використанням сучасних мікропроцесорних систем релейного захисту, що мають явні переваги порівняно зі своїми попередниками. За результатами досліджень зроблено висновки, що вказують на переваги використання диференціально-фазного принципу для захисту систем збірних шин, упровадження якого сприятиме підвищенню ефективності функціонування захисту й усуненню виявлених за час експлуатації поздовжнього диференціального захисту недоліків.

**Ключові слова:** диференціально-фазний захист шин, мікропроцесорний пристрій релейного захисту, система збірних шин, розподільчий пристрій, орган порівняння фаз.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** В электроэнергетических системах стран евроазиатского континента в качестве основной защиты систем сборных шин напряжением 110–750 кВ преимущественно используется продольная дифференциальная токовая защита, принцип действия

которой основан на геометрическом суммировании векторов входящих и исходящих токов присоединений, подключенных к системе сборных шин. Многолетний опыт эксплуатации дифференциальных защит шин [1–5] показал, что они имеют некоторые принципиальные недостатки, подтверж-

даемые зафиксированными технологическими нарушениями, связанными с неправильной работой защиты шин. К этим недостаткам можно отнести следующие:

- вероятность ложного срабатывания защиты при обрыве соединительных проводов цепей переменного тока на участке прохождения трассы кабельной линии от трансформаторов тока до места установки защиты либо места суммирования векторных величин токов присоединений [1–4];

- ошибочные действия либо бездействия релейного и оперативного персонала в процессе выполнения операций по расчету, установке и изменению параметров срабатывания защиты, при оперировании с переключающими устройствами во вторичных цепях защиты [1–4];

- возникновение трудностей при расчете уставок и выборе тормозных характеристик дифференциальной защиты, исходя из условия обеспечения требуемой чувствительности в минимальных режимах работы электрической сети и отстройки от максимальных токов небаланса в дифференциальной цепи защиты при внешних КЗ. При изменении режимов либо схемы электроснабжения энергообъекта возникает необходимость пересмотра расчетных уставок защиты, что является достаточно трудоемким процессом, [2, 6, 8];

- повышенные требования к трансформаторам тока в части обеспечения точности их работы в заданном классе при соблюдении допустимой загрузки вторичных цепей. При использовании трансформаторов тока с неодинаковыми коэффициентами трансформации возникает необходимость в применении промежуточных преобразователей или других мероприятий для балансировки токов в плечах дифференциальной защиты, что во многих случаях приводит к дополнительным погрешностям измерительного тракта и большему отклонению величин измеряемых токов от своих фактических значений [1, 5, 6].

Ведущая роль в возникновении случаев отказа или ложной работы защиты шин принадлежит человеческому фактору, о чем гласит статистика случаев неправильной работы защиты шин, составленная на основе анализа и обобщения противоаварийных циркуляров и информационных писем предприятий электроэнергетики, насчитывающая свыше 60 % случаев, произошедших по вине персонала. Минимизация доли участия человека при проектировании и эксплуатации защиты шин позволит избежать возникновения ряда неблагоприятных случаев, связанных с нарушением электроснабжения потребителей и транзита мощности через шины распределительного устройства, а также обеспечит возможность перехода на более совершенный уровень развития устройств релейной микропроцессорной техники, конечной целью которого является максимальная автоматизации

производственного процесса выдачи и распределения электрической энергии [2–5, 8].

В 60–80-х годах прошлого века ведущими отечественными и зарубежными институтами неоднократно проводились исследования в области разработки и внедрения в эксплуатацию дифференциально-фазных защит шин [1, 5, 7]. В настоящее время существует только лишь одно цифровое реле защиты шин типа REB500 производства шведского концерна АВВ, внутренняя логика которого построена на основе синтеза продольного дифференциального и дифференциально-фазного принципов [11]. Данное устройство является полным аналогом предшествующих ему микроэлектронных реле серии INX2 (INX5) того же производителя [12]. Пуск защиты в устройстве REB500 осуществляется по превышению вычисленным значением дифференциального тока заданной уставки, подобно устройствам защиты, работающим по дифференциальному принципу. Принцип сравнения фаз токов используется в качестве вспомогательного для повышения чувствительности реагирования защиты шин на повреждения в пределах защищаемой зоны и обеспечения надежного ее блокирования при внешних замыканиях. Таким образом, он не является единственным звеном, определяющим работу цифрового реле REB500, ввиду чего реле может иметь характерные для продольной дифференциальной защиты недостатки [1–6, 8].

Цель работы – рассмотреть вопрос о возможности применения дифференциально-фазного принципа для защиты сборных шин распределительных устройств 110–750 кВ в качестве единственного и основного, что позволит устранить принципиальные недостатки, характерные для продольных дифференциальных токовых защит, а также улучшить такие основные свойства защиты шин, как чувствительность и селективность, снизить предъявляемые требования к используемым в схеме защиты трансформаторам тока.

#### МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

В технике релейной защиты, так же как и в остальных узкоспециализированных технических направлениях, прослеживается тенденция к поэтапному переходу всех видов устройств на микропроцессорную базу. Большинство ведущих мировых производителей устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) приостановило выпуск защит на электромеханических и полупроводниковых реле, что объясняется наличием ряда существенных преимуществ микропроцессорных защит по сравнению с их предшественниками.

Микропроцессорная система позволяет интегрировать все подключенные к общей информационной шине устройства в единую автоматизированную систему сбора и обработки информации о текущих процессах, представляя ее в доступном для восприятия виде. Использование микропроцессорного устройства для реализации

дифференціально-фазної захисти шин має багато переваг, серед яких значуща роль належить практично неограниченим можливостям сучасних мікроконтролерів, завдяки їх високій продуктивності при читанні, обробці та представленні інформації, а також гнучкому налаштуванню та програмуванню їх внутрішньої логіки по розробленим алгоритмам будь-якого рівня складності. Крім того, мікропроцесорні пристрої мають мале споживання потужності во вторичних ланках вимірних трансформаторів струму (0,1–0,5 ВА), що є важливим фактором для зменшення похибки трансформаторів первинного струму та зменшення її впливу на роботу захисти.

Далі більш детально розглянемо принцип дії дифференціально-фазної захисти та особливості (специфіку) її застосування застосовано до захисти збірних шин. Принцип дії дифференціально-фазної захисти шин оснований на безперервному порівнянні фаз (кутових співвідношень) струмів промислової частоти, протікаючих по кінцях захищеної зони, обмеженої комплектами трансформаторів струму, до вторичних ланок яких вона підключена. Захист має абсолютну селективність та достатньо високу швидкість дії, складаючи не більше ніж 2–3 періодів, що допустимо за умови збереження стійкості енергосистеми. Специфіка застосування дифференціально-фазного принципу для захисти збірних шин в першу чергу обумовлена значущим кількістю підключень, підключаються до шин, з живленням та без живлення, що призводить до необхідності врахування розподілу по підключенням во всіх режимах роботи прилеглої електричної мережі. Для забезпечення селективної роботи захисти шин кожне з підключень, незалежно від наявності живлення, повинно бути введено в зону її дії, в зв'язі з чим виникає необхідність у порівнянні фаз струмів не двох підключень, як це має місце при використанні дифференціально-фазної захисти на лініях електропередач (ЛЕП) з двохстороннім живленням, а кількох, що призводить до ускладнення вимірної та логічної частини захисти, а також до необхідності врахування повної похибки від кількох вимірних-перетворювальних трактов. Відповідно до вимог [6] до організації захисти шин, слід також врахувати, що кожне підключення повинно бути зафіксовано до вторичних ланок за однієї з систем збірних шин в нормальному режимі роботи (в разі використання захисти для подвійної системи шин з можливістю оперативної перефіксації підключень з однієї системи шин на іншу). В цьому разі також повинна бути передбачена можливість оперативної (автоматичної) перефіксації підключень за другою

системою шин при зміні конфігурації схеми первинної комутації розподільного пристрою. Так як збірні шини зосереджені в межах одного розподільного пристрою, дифференціально-фазна захиста шин може складатися з одного комплексу, забезпечуючого селективну захисту кількох систем шин та до якого підключаються ланки вторинних обмоток трансформаторів струму від всіх підключень, введених в зону дії захисти. Крім того, виключається необхідність організації протяжених ланок зв'язі для обміну інформацією о фазах струмів від кількох трансформаторів струму, канал може бути організований з використанням з'єднувачів кабелів (контрольних кабелів) або оптоволоконних ліній зв'язі в межах одного об'єкта. Для захисти кожної з систем шин може бути використаний та окремий підкомплект дифференціально-фазної захисти, що спрощує її принципову схему, але в той же час призводить до значущого збільшення вартості проекту.

Відмінною рисою дифференціально-фазної захисти шин є відносна простота її реалізації порівняно з дифференціально-фазною захистом ЛЕП, яка вимагає організації високочастотної (ВЧ) обробки по одній з фаз лінії та, як наслідок, використання високочастотного обладнання, що ускладнює схему захисти та збільшує ймовірність апаратного збою обладнання при КЗ в зоні або виникнення несправності, спроможної привести до її ложного або надлишкового дію. До того ж відмінність від дифференціально-фазних захистів, використовуваних для захисти протяжених реактивованих ЛЕП, відсутність необхідності застосування органів компенсації ємностей струмів, обумовлених їх ємністю провідності, оскільки її значення для збірних шин є незначущим, що також спрощує схему захисти. Як свідчить практика [3, 4], дифференціально-фазна захиста повністю відповідає всім сучасним вимогам, пред'являемым до основних захистів елементів електричної мережі та не має суттєвих принципових недоліків, широко застосовується як для захисти протяжених ЛЕП з двохстороннім живленням, так і на ЛЕП з багатостороннім живленням, а, відповідно, може бути застосована та для захисти збірних шин, до яких в переважному разі підключаються кілька джерел живлення.

Основною перевагою принципової реалізації порівняно з дифференціальним струмовим є незалежність функціонування захисти від співвідношень амплітудних значень фазних струмів, вимірюваних трансформаторами струму, за рахунок чого до них зменшуються вимоги, що стосуються точності трансформації первинного струму, та допускається більший розброс їх параметрів,

в частности, использования для подключения защиты разнотипных трансформаторов тока, имеющих разные коэффициенты трансформации. На защиту оказывает влияние лишь угловая погрешность трансформации, которая в переходных режимах, согласно [5], обычно не превышает  $46^\circ$ , в то время как максимальная токовая погрешность может дости-

гать 81%. Функционально защита состоит из следующих основных взаимодействующих между собой частей: измерительной, вычислительной, преобразовательной, арифметической, логической и исполнительной. Функциональная структурная схема устройства дифференциально-фазной защиты шин приведена на рис. 1.

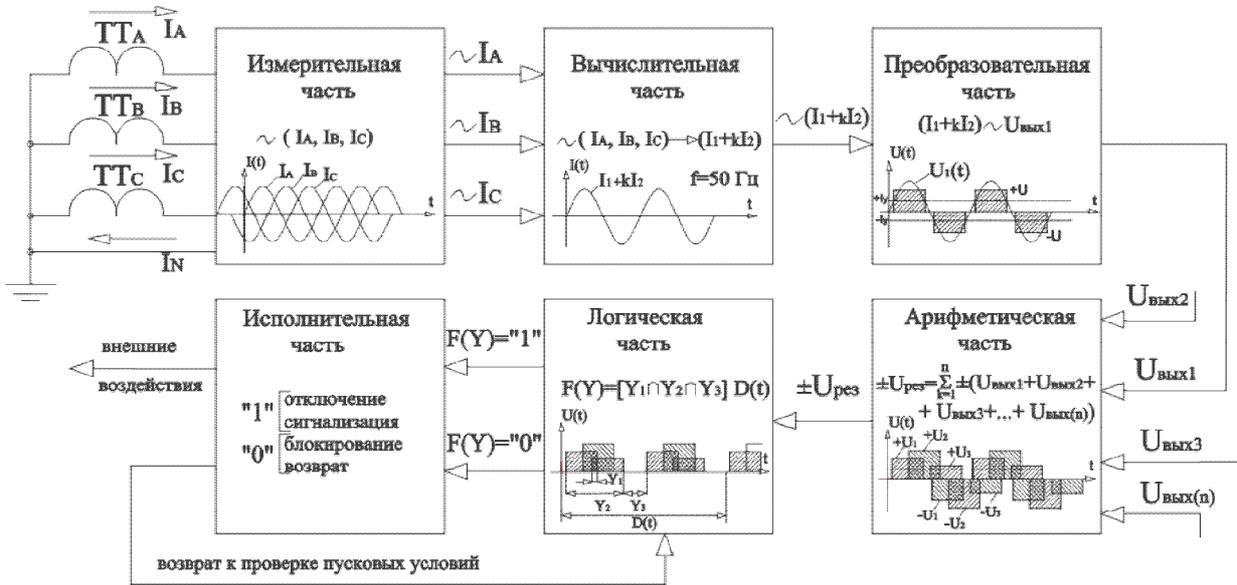


Рисунок 1 – Структурная схема устройства дифференциально-фазной защиты шин

В измерительной части посредством первичных и промежуточных преобразователей осуществляется измерение мгновенных значений токов  $I_A, I_B, I_C$  с определенным шагом дискретизации сигнала по времени и его квантование по уровню, что необходимо для согласования формы представления сигналов, поступающих от трансформаторов тока и обрабатываемых микропроцессорным устройством [9]. Данный процесс оцифровывания аналоговых сигналов носит название импульсно-кодовой модуляции. Шагом дискретизации задается темп поступления информации на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) устройства, в конечном итоге определяющий его быстродействие, уровнем квантования определяется точность представления значений входных величин в бинарном коде, что задает длину разрядной сетки АЦП, от которой также зависит его быстродействие.

Вычислительная часть представляет собой математический механизм, где путем выполнения математических операций происходит предварительная обработка информации путем ее цифровой частотной фильтрации с выделением синусоиды тока промышленной частоты, а также вычисления комбинированного сигнала  $(I_1 + kI_2)$  из трех фазных величин  $3I_\phi$ , что необходимо в последующем для уменьшения количества информационных преобразовательных трактов и частичной разгрузки ЦП микропроцессорного устройства.

Поступающий на преобразовательную часть схемы сигнал поддается преобразованию с получением выходного сигнала, представленного в виде прямоугольных импульсов напряжения определенной полярности, амплитуды, ширины и скважности. Принцип процесса преобразования входного сигнала заключается в том, что при прохождении синусоиды тока через опорные значения, определяемые положительным и отрицательным уровнем формирования  $\pm i_y$ , формируются прямоугольные импульсы, пропорциональные амплитудному значению входного сигнала тока [10].

В арифметической части реализован алгоритм нахождения суммарного сигнала из поступающей на ее входной контур информации от всех трансформаторов тока и позиционирования этого сигнала на одной измерительной оси раздельно для каждой из систем шин.

Логическая часть включает в себя орган сравнения фаз токов, а также набор функциональных алгоритмов, необходимых для взаимодействия всех элементов схемы между собой и реализации дополнительных функциональных возможностей устройства, для непрерывного мониторинга текущего режима электрической сети, пуска, срабатывания, возврата и блокирования защиты. Упрощенная структурная схема алгоритма функционирования логической части (органа сравнения фаз) дифференциально-фазной защиты шин представлена на рис. 2.



Рисунок 2 – Алгоритм функционирования органа сравнения фаз токов дифференциально-фазной защиты шин

Исполнительная часть формирует выходные воздействия защиты в случае определения повреждения на системе шин, а также обеспечивает подачу сигнализации о срабатывании защиты.

Логические формулы способов сравнения фаз включают в себя характерные условия для определения фазных соотношений в зависимости от места повреждения [1] и с использованием аппарата алгебры логики, первую из них можно записать следующим образом:

$$F_1 = [(Y_1 \cap Y_2 \cap Y_3)D(t)] \cup [(Y_4 \cap Y_5 \cap Y_6)D(t)] = [((S_{1+} \cap S_{2+} \cap S_{3+} \cap \dots \cap S_{n+}) \cap (S_{1-} \cup S_{2-} \cup S_{3-} \cup \dots \cup S_{n-})) \cap (\bar{S}_{1+} \cap \bar{S}_{2+} \cap \bar{S}_{3+} \cap \dots \cap \bar{S}_{n+}))D(t)] \cup [((S_{1-} \cap S_{2-} \cap S_{3-} \cap \dots \cap S_{n-}) \cap (S_{1+} \cup S_{2+} \cup S_{3+} \cup \dots \cup S_{n+})) \cap (\bar{S}_{1-} \cap \bar{S}_{2-} \cap \bar{S}_{3-} \cap \dots \cap \bar{S}_{n-}))D(t)] \quad (1)$$

где  $Y_1 \dots Y_6$  – условия пуска и срабатывания защиты;  $S_{1+}, S_{2+}, S_{3+} \dots S_{n+}$  – прямоугольные импульсы, сформированные из полуволн токов положительной полярности;  $S_{1-}, S_{2-}, S_{3-} \dots S_{n-}$  – прямоугольные импульсы, сформированные из полуволн токов отрицательной полярности;  $D(t)$  – оператор замедления действия защиты на время, определяемое параметром  $t$ , необходимое для отстройки от неблагоприятных факторов, оказывающих влияние на работу защиты в нормальных и аварийных режимах.

Логическая формула состояния органа сравнения фаз может принимать два состояния: «1» – в случае определения повреждения на системе шин либо «0», характеризующее нормальный режим работы электрической сети и внешние КЗ. Первое (четвертое) условие  $Y_1(Y_4)$  из выражения (1) представляет собою интервал времени совпадения сигналов положительной (отрицательной) полярности; второе (пятое)  $Y_2(Y_5)$  и третье (шестое)  $Y_3(Y_6)$  – длительность существования сигнала положительной (отрицательной) полярности и ширина паузы между ними соответственно за измерительный период.

Для пуска и срабатывания защиты необходимо выполнение всех условий  $Y_1 \dots Y_3(Y_4 \dots Y_6)$ , указанных в выражении (1) и в табл. 1.

Таблица 1 – Возможные состояния, которые могут приобретать условия  $Y_1 \dots Y_6$ , составляющие логическое выражение (1), и сама функция  $F_1$  в зависимости от состояния условий, входящих в ее состав

Режим	Сравнение с уставкой	$Y_1(Y_4)$	$Y_2(Y_5)$	$Y_3(Y_6)$	$F_1$
КЗ в зоне	$t_1 > T_1$	1	1	1	1
	$t_2 < T_2$	1	1	1	1
	$t_3 > T_3$	1	1	1	1
Внешнее КЗ или нормальный режим		0	0	0	0
	$t_1 > T_1$	1	0	0	0
	$t_2 < T_2$	0	1	0	0
	$t_3 > T_3$	0	0	1	0
	$t_1 > T_1$ $t_2 < T_2$	1	1	0	0
	$t_1 > T_1$ $t_3 > T_3$	1	0	1	0
	$t_3 > T_3$ $t_2 < T_2$	0	1	1	0

В случае, когда хотя бы одно из них оказывается ложным, например  $Y_1 = 0$ , обеспечивается блокирование действия защиты; при выполнении всех пусковых условий  $Y_1 = Y_2 = Y_3 = 1$ , но несохранении их подлинности в течение времени, определяемого оператором  $D(t)$ , будет обеспечен возврат защиты после ее пуска. Справедливость того или иного условия определяется путем сравнения измеренного интервала времени совпадения положительных (отрицательных) импульсов  $t_1$ , интервала их непрерывности  $t_2$  и ширины паузы между ними  $t_3$  с соответствующими им уставками времени защиты  $T_1, T_2, T_3$  за

измерительный период. Органом сравнения фаз определяется повреждение на защищаемой системе шин в случае, когда  $F_1 = 1$ , в остальных случаях, при  $F_1 = 0$ , повреждение определяется внешним либо вовсе отсутствует.

Поясняющая схема принципа действия защиты при использовании в органе сравнения фаз логической формулы (1), а также ее фазная характеристика в режимах внутреннего и внешнего КЗ представлены на рис. 3, 4 (уровень формирования импульсов для иллюстрации принципа действия защиты не учитывается,  $\pm i_y = 0$ ).

Вторую логическую формулу органа сравнения фаз токов посредством инструментария алгебры логики можно записать следующим образом:

$$F_2 = [(Y_1)D(t)] \cup [(Y_2)D(t)] = [(S_{1+}(\Delta\phi_1) \cap S_{2+}(\Delta\phi_2) \cap S_{3+}(\Delta\phi_3) \cap \dots \cap S_{n+}(\Delta\phi_n))D(t)] \cup [(S_{1-}(\Delta\phi_1) \cap S_{2-}(\Delta\phi_2) \cap \dots \cap S_{n-}(\Delta\phi_n))D(t)],$$

где  $Y_1, Y_2$  – условия пуска и срабатывания защиты;  $\Delta\phi_1, \Delta\phi_2, \Delta\phi_3 \dots \Delta\phi_n$  – угол смещения фазы преобразованного сигнала  $S_1, S_2, S_3 \dots S_n$  от опорного значения  $\phi_{on}$  (опорной фазы);  $\Delta\phi_{1..n} = |\phi_{1..n} - \phi_{on}|$ .

Логическая функция (2) и составляющие ее условия  $Y_1(Y_2)$ , подобно выражению (1), могут находиться в двух состояниях: «1» – в случае их справедливости либо «0» – если они не выполняются (табл. 2).

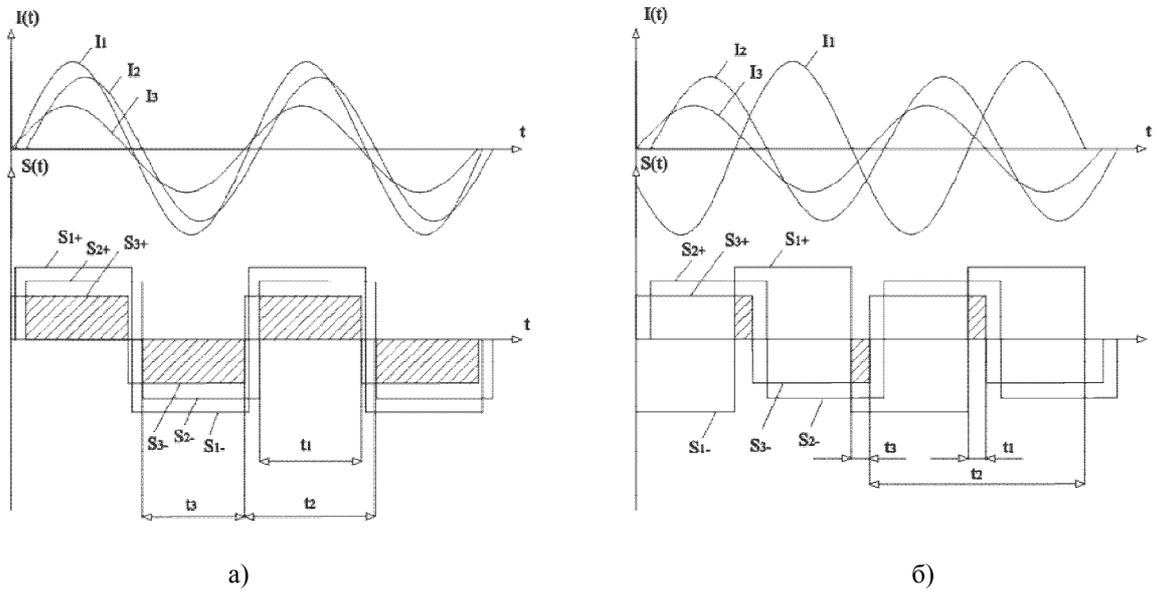


Рисунок 3 – Иллюстрация принципа действия дифференциально-фазной защиты шин, согласно выражению (1): а) КЗ в зоне действия; б) КЗ вне зоны действия;  $I_1, I_2, I_3$  – токи присоединений;  $S_1, S_2, S_3$  – сигналы, сформированные из токов  $I_1, I_2, I_3$

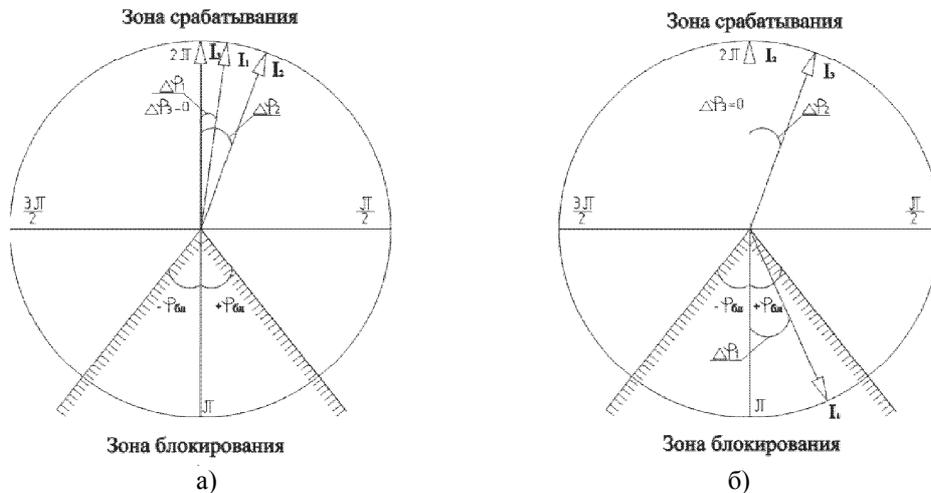


Рисунок 4 – Фазная характеристика дифференциально-фазной защиты шин: а) при КЗ в зоне действия; б) при внешних КЗ;  $I_1, I_2, I_3$  – токи присоединений;  $\Delta\phi_1, \Delta\phi_2, \Delta\phi_3$  – угловое смещение векторов токов  $I_1, I_2, I_3$  от «условного» 0 градусов фазной характеристики защиты;  $\pm\phi_{bl}$  – угол блокировки защиты

Таблиця 2 – Возможные состояния, которые могут приобретать условия  $Y_1, Y_2$ , составляющие логическое выражение (2), и сама функция  $F_2$  в зависимости от состояния условий, входящих в ее состав

Режим	Сравнение с уставкой	$Y_1(Y_2)$	$F_2$
КЗ в зоне	$\Delta\varphi_{1...n} \in [0, \varphi_{пред}]$	1	1
Внешнее КЗ или нормальный режим	$\Delta\varphi_{1...n} \in (\varphi_{пред}, 180]$	0	0

Способ сравнения фаз, описанный выражением (2), обеспечивает пуск (срабатывание) защиты в том случае, когда углы смещения фаз всех преобразованных из токов присоединений сигналов находятся в диапазоне от  $0$  до  $\varphi_{пред}$  включительно и ее блокирование (возврат) при справедливости выражения  $\varphi_{пред} < \varphi_{1...n} \leq 180^\circ$ . Угол  $\varphi_{пред}$  в данном случае определяется расчетным значением угла блокировки защиты  $\pm\varphi_{\delta l}$ , выраженным в электрических градусах.

Поясняющая схема принципа действия защиты при использовании в органе сравнения фаз логической формулы (2) в режимах внутреннего и внешнего КЗ представлена на рис. 5.

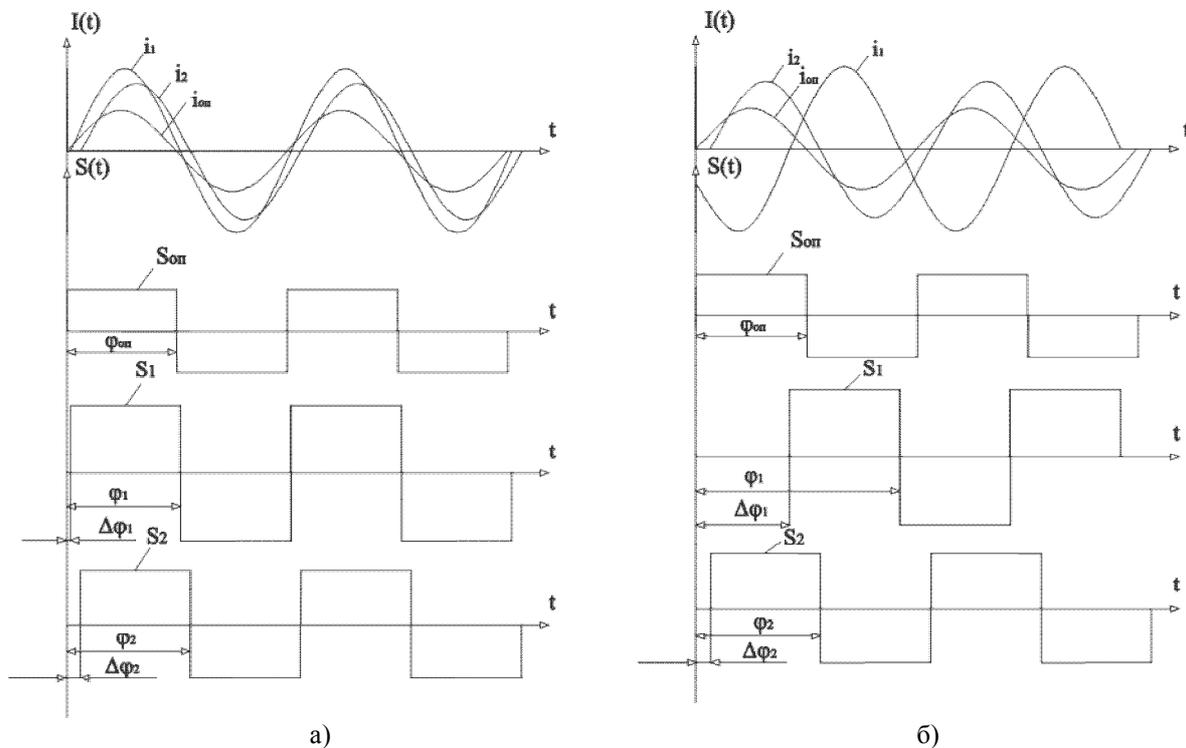


Рисунок 5 – Иллюстрация принципа действия дифференциально-фазной защиты шин, согласно выражению (2):

а) КЗ в зоне действия; б) КЗ вне зоны действия;  $I_1, I_2$  – токи присоединений;  $I_{он}$  – опорный ток;  $S_1, S_2$  – сигналы, сформированные из токов  $I_1, I_2$ ;  $S_{он}$  – опорный сигнал

**ВЫВОДЫ.** Вопрос о возможности использования дифференциально-фазного принципа для защиты систем сборных шин распределительных устройств 110–750 кВ подстанций и электростанций в настоящее время в условиях стремительного развития микропроцессорных систем РЗА является актуальным и перспективным. Дифференциально-фазная защита (ДФЗ–201, ДФЗ–504, БЭ2704, ДФЗ «Диамант» L030(L031), ДФЗ «ЭКРА», General Electric L60) положительно зарекомендовала себя на ЛЭП 110–750 кВ и обладает следующими преимуществами по сравнению с продольной дифферен-

циальной токовой защитой при использовании ее в качестве основной защиты сборных шин:

– защита по своему принципу действия реагирует только на фазные соотношения измеряемых токов и не использует в своей работе их амплитудные значения, что позволяет снизить требования к точности работы измерительных трансформаторов тока и допускает больший разброс их параметров, в том числе и применение трансформаторов тока с неодинаковыми коэффициентами трансформации;

– высокая чувствительность по сравнению с продольной дифференциальной защитой, что обеспечивается сравнением фазных величин токов во всех режимах работы электрической сети, независимо от их амплитудных значений;

– высокая селективность действия защиты благодаря проверке органом сравнения фаз выполнения всех требуемых условий для определения повреждения на защищаемой системе шин, которые учитывают долю влияния всех возможных факторов на отличие фаз токов присоединений от  $180^{\circ}$  при внешних коротких замыканиях, в нормальном режиме работы системы сборных шин и при ремонтных схемах распределительных устройств.

Дифференциально-фазная защита шин состоит из нескольких функциональных частей, обеспечивающих выполнение полного цикла вычислительно-логических операций с момента измерения поступающих на входы устройства гармонических сигналов вторичных токов до определения фазных соотношений между ними и формирования соответствующих управляющих команд. Основным реагирующим элементом защиты является орган сравнения фаз токов, который использует одно или несколько логических выражений, определяющих условия, необходимые для оценки текущего режима работы электрической сети и определения повреждения на системе шин. Орган сравнения фаз обеспечивает пуск и срабатывание защиты при справедливости всех логических условий, возврат и блокирование защиты – при их невыполнении. Направленность действия органа сравнения фаз определяется его фазной характеристикой. При повреждении на одной из систем шин вектора токов всех подключенных к ней присоединений располагаются на характеристике в одной плоскости в пределах обозначенной зоны срабатывания защиты. Длина зоны несрабатывания защиты, выраженная в электрических градусах, на фазной характеристике определяется значением заданного угла блокировки  $\pm\varphi_{\text{бл}}$ , который учитывает предельные значения угла расхождения фаз токов от  $180^{\circ}$  в нормальном режиме и при внешних КЗ. Селективное действие защиты во всех режимах обеспечивается выбором ее основных параметров: угла блокировки  $\pm\varphi_{\text{бл}}$  и уровня формирования прямоугольных сигналов  $\pm i_y$ .

Учитывая явные преимущества микропроцессорных реле по сравнению со своими предшественниками и высокий уровень их развития, на сегодня нецелесообразно продолжать заниматься разработкой и совершенствованием дифференциально-фазной защиты шин на электро-механической или микроэлектронной платформе.

Применение микропроцессорных технологий дает возможность построения сложных вычислительных и логических алгоритмов для выполнения дифференциально-фазной защиты шин с целью обеспечения ее правильной работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кужиков С.Л., Грызлов Б.Т., Кудин В.Г. и др. Дифференциальные защиты сборных шин. Электрические станции. – М.: Минэнерго СССР, 1978. – Вып. 9. – С. 51–58.
2. Таубес И.Р. Дифференциальная защита шин 110–220 кВ: библиотека электромонтера. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – Вып. 560. – 96 с.
3. Сборник директивных материалов по эксплуатации энергосистем: электротехническая часть. – М.: Энергоиздат, 1981. – 632 с.
4. Сборник директивных материалов главного технического управления Министерства энергетики СССР: электротехническая часть. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.
5. Кужиков С.Л., Синельников В.Я. Защита шин электростанций и подстанций. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 184 с.
6. Правила устройства электроустановок: релейная защита / Минэнерго Украины. – Харьков: Форт, 2009. – 704 с.
7. Багинский Л.В. К выбору принципа работы быстродействующей защиты основных электрических станций и подстанций: электрические станции. – М.: Минэнерго СССР, 1978. – Вып. 5. – С. 11–45.
8. Федосеев А.М. Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей: учебное пособие для высших учебных заведений. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 520 с.
9. Михайлов В.В., Кириевский Е.В., Ульяницкий Е.М. Микропроцессорные гибкие системы релейной защиты. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
10. Алексеев В.В. Характеристики дифференциальной защиты шин ПДЭ–2006: энергетика. – М.: Минэнерго СССР, 1991. – Вып. 8. – С. 30–34.
11. Distributed busbar protection REB500 including line and transformer protection: Operating instruction / ABB Switzerland Ltd. – Baden: ABB Switzerland Ltd, 2011. – Iss. 9. – 65 p.
12. ABB Group – Automation and Power Technologies “A great achievement: 2000 busbar protection systems including 500 numerical REB500 systems delivered”. – 2002. – Available at: <https://library.e.abb.com/public/6ff1ca95f3c73f15c1256ce50053a43a/Newsletter%202-8%20BBP%20achievements.pdf> (accessed June 30, 2015).

**PROSPECTS DIFFERENTIAL-PHASE PRINCIPLE TO PROTECT BUSBAR SYSTEM  
SWITCHGEARS 110–750 KV**

**V. Nicenko**

State Enterprise "National Power Company UKRENERGO" Dnipro ES  
vul. Plotinnaya, 2, Zaporozhye, 69096, Ukraine. E-mail: nicenkovladimir@gmail.com

**D. Kulagin**

Zaporizhzhya National Technical University  
ul. Zhukovskogo, 64, Zaporozhye, 69063, Ukraine. E-mail: kulagindo@gmail.com

This article discusses the need for improvement of the currently used relay protection busbar voltage of 110-750 kV power system facilities in terms of the feasibility and advisability of its fundamental performance by continuously comparing the phase primary currents circulating on connections that are connected to the busbars. Problem questions concerning some of the features of design and technical operation of the longitudinal differential protection of the tires and possible solutions. Given the technical description and an overall assessment of the differential-phase busbar protection, presented its phase characteristics, illustrates the principle of protection in emergency situations in case of damage in the area protected area and beyond. Provide further prospects for the development of the phase-principle with regard to protection of the tire through its implementation using modern microprocessor relay protection systems, have clear advantages in comparison with its predecessors. According to the research conclusions, pointing to the advantages of using differential-phase principle for the protection of busbar systems, the implementation of which will contribute to improving the functioning of protection and address identified in the operation of longitudinal differential protection deficiencies.

**Key words:** differential-phase busbar protection, microprocessor protection relays, busbar system, switchgears phase comparison relays.

REFERENCES

1. Kuzhekov, S.L., Gryzlov, V.G., Kudin, B.T. et al. (1978), *Differentsialnyye zashchity sbornykh shin, Electricheknie stantsiy* [Differential busbar protection, electric power stations], Vol. 9, pp. 172–177. (in Russian)
2. Taubes I.R. (1984), *Differentsialnaya zashita sbornih shin 110–220 kV* [Differential busbar protection 110–220 kV], Energoatomizdat, Moscow. (in Russian)
3. *Sbornik direktivnih materialov po ekspluatatsii energosistem* [Collection of guidance materials for operation of power systems], (1981), Energoizdat, Moscow. (in Russian)
4. *Sbornik direktivnih materialov glavtehpripravleniya minenergo SSSR* [Collection of guidance materials main technical management USSR Ministry of Energy], (1985), Energoatomizdat, Moscow. (in Russian)
5. Kuzhekov, S.L. and Sinelnikov, V.Y. (1983), *Zashita shin electrostantsiy i podstantsiy* [Busbar protection powerstation and substation], Energoatomizdat, Moscow. (in Russian)
6. *Pravila ustroystva electroustanovok. Releynaya zashita* [The rules of electrical. Relays protections], (2009), Fort, Kharkov. (in Russian)
7. Baginski, L.V. (1978), *K vyboru printsipa raboty bystrodeystvuyushchey zashchity osnovnykh elektricheskikh stantsiy i podstantsiy: elektricheskiiye stantsii* [By the choice of the operating principle of high-speed protection of the fundamental power stations and substations, electric power stations], Vol. 5, pp. 11–45. (in Russian)
8. Fedoseyev, A.M. (1984), *Releynaya zashita electroenergeticheskikh sistem. Releynaya zashita setey* [Relay protection of electric power systems. Relay protection networks], Energoatomizdat, Moscow. (in Russian)
9. Mikhailov, V.V., Kirievsky, E.V. and Ulianitsky, E.M. (1988), *Microprotsessornie gibkie sistemy releynoy zashchity* [Microprocessor flexible system of relay protection], Energoatomizdat, Moscow. (in Russian)
10. Alekseev, V.V. (1991), *Kharakteristiki differentsialnoy zashchity shin PDE–2006: energetika* [Features of the differential busbar protection PDE–2006], Vol. 8, pp. 30–34. Energia, Moscow. (in Russian)
11. Distributed busbar protection REB500 including line and transformer protection: Operating instruction (2011), ABB Switzerland Ltd, Baden, Switzerland.
12. ABB Group – Automation and Power Technologies (2002), “A great achievement: 2000 busbar protection systems including 500 numerical REB500 systems delivered”, Available at: <https://library.e.abb.com/public/6ff1ca95f3c73f15c1256ce50053a43a/Newsletter%202-8%20BBP%20achievements.pdf> (accessed June 30, 2015).

Стаття надійшла 28.07.2015.