

УДК 621.316.925

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЛИНИЯХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ В ОБЪЕМЕ ФУНКЦИЙ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ ТОКОВЫХ ЗАЩИТ

Докт. техн. наук, проф. РОМАНЮК Ф. А.,  
канд. техн. наук, доц. ТИШЕЧКИН А. А., инж. ГУРЬЯНЧИК О. А.

*Белорусский национальный технический университет*

Наиболее массовыми защитами линий 6–35 кВ распределительных сетей от коротких замыканий (КЗ) являются токовые, контролирующие протекающий по ним ток, а при необходимости и направление мощности КЗ. К существенным недостаткам защит этого класса следует отнести ограниченность зоны мгновенного отключения КЗ и значительное количество измерительных органов.

С целью совершенствования токовых защит линий в [1] предложено в объеме их функций дополнительно определять расстояние до места КЗ  $l_{кз}$  и сравнивать его с длиной защищаемой линии  $l_{л}$ . Если КЗ находится в пределах линии  $l_{кз} \leq l_{л}$ , то при выполнении других условий ее отключение необходимо производить без выдержки времени. Если КЗ расположено за пределами линии  $l_{кз} > l_{л}$ , то ее следует отключать с выдержкой времени.

Рассмотренный принцип наиболее просто может быть реализован в токовых защитах линий 6–35 кВ, выполненных на основе средств микропроцессорной техники. При этом будут обеспечены расширение зоны мгновенного отключения КЗ и сокращение числа измерительных органов за счет оптимизации их функций.

Следует обратить внимание на то, что расстояние до места КЗ  $l_{кз}$  не может быть определено достаточно точно. Из-за погрешностей в определении указанного расстояния для обеспечения достоверного установления места КЗ сравнение  $l_{кз}$  нужно производить не с фактической длиной линии  $l_{л}$ , а с ее скорректированным значением  $K_{к}l_{л}$ . Корректирующий коэффициент  $K_{к}$  может быть больше или меньше единицы в зависимости от уровня и знака погрешности определения  $l_{кз}$ , на которую оказывают влияние ряд

факторов. Такими факторами являются: погрешности измерительных трансформаторов, погрешности расчета расстояния, наличие переходных сопротивлений в месте КЗ, наличие подпиток места КЗ и т. д.

Определение места короткого замыкания (ОМКЗ) в объеме функций микропроцессорных токовых защит предполагает выполнение расчетов расстояния  $l_{кз}$  на основе использования информации о токах и напряжениях в месте установки защиты. Возникающие искажения замеров на линиях с двусторонним питанием, а также в случае КЗ через переходное сопротивление могут быть уменьшены путем соответствующих алгоритмов вычислений.

Это вполне осуществимо для относительно коротких участков линий 10–35 кВ, когда распределенными параметрами линии можно пренебречь.

Для получения наиболее достоверных значений расчеты  $l_{кз}$  необходимо производить в зависимости от вида повреждения. Так, при трехфазных КЗ вычисление следует выполнять для всех петель повреждения  $l_{AB}$ ,  $l_{BC}$ ,  $l_{CA}$ , а расстояние до места КЗ определять путем усреднения полученных значений

$$l_{кз} = \frac{1}{3}(l_{AB} + l_{BC} + l_{CA}). \quad (1)$$

В случае двухфазных КЗ  $l_{кз}$  рассчитывается путем проведения операций с токами и напряжениями поврежденных фаз. При этом их селекция осуществляется на основе анализа величин фазных токов и междуфазных напряжений.

Текущие значения  $l_{кз}$  даже в установившемся режиме будут неодинаковыми. Поэтому должна проводиться их фильтрация путем отбрасывания крайних значений и усреднения с целью получения наиболее правильных результатов.

Вид КЗ с достаточной степенью достоверности можно определить по относительной несимметрии токов [2]

$$\Delta I = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max}}, \quad (2)$$

где  $I_{\max}$ ,  $I_{\min}$  – соответственно наибольший и наименьший из фазных токов.

Если  $\Delta I > 0,6$ , то КЗ является двухфазным, в противном случае – трехфазным.

Для ОМКЗ наиболее широко используется дистанционный принцип измерения составляющих комплексного сопротивления поврежденной петли [3]. С целью снижения влияния переходного сопротивления на расчетную удаленность до места КЗ в петле  $l_{ij}$  искомое расстояние следует вычислять по значению реактивной составляющей  $X_{ij}$  входного сопротивления

$$l_{ij} = \frac{X_{ij}}{X_{уд}}, \quad (3)$$

где  $X_{уд}$  – удельное реактивное сопротивление.

При неоднородной линии должна быть задана информация по длине отрезков и удельному реактивному сопротивлению каждого из них. Этого достаточно для получения расстояния до места КЗ при известном общем значении  $X_{ij}$ .

К алгоритму ОМКЗ предъявляются высокие требования в части быстродействия, поскольку оно во многом определяет быстродействие самой защиты. При этом достижение высокой точности  $l_{кз}$  в большинстве случаев не требуется, так как функцией ОМКЗ является фиксация места повреждения в том смысле, возникло оно на защищаемой линии или за ее пределами. Исключения составляют отрезки, расположенные по концам защищаемой линии или вблизи на смежных участках. Большие погрешности определения  $l_{кз}$  в указанных местах могут явиться причиной, приводящей к сокращению зоны мгновенного отключения КЗ или неселективной работы защиты.

Для получения реактивной составляющей входного сопротивления  $X_{ij}$  соответствующей петли предполагается использовать информацию о токах и напряжениях, на основе которой реализуется алгоритм функционирования защиты. В микропроцессорных защитах такой информацией, как правило, являются ортогональные составляющие (ОС) входных токов и напряжений, полученные в результате их цифровой фильтрации. По этим значениям могут быть вычислены все величины, необходимые для определения соответствующей петли КЗ.

При известных ОС токов  $i_{sij}$ ,  $i_{cij}$  и напряжений  $u_{sij}$ ,  $u_{cij}$  петли КЗ реактивная составляющая входного сопротивления вычисляется как [4]

$$X_{ij} = \frac{u_{sij}i_{cij} - u_{cij}i_{sij}}{i_{sij}^2 + i_{cij}^2}. \quad (4)$$

В дальнейшем выражение (4) будем называть алгоритмом ОС. Этот алгоритм вполне приемлем для ОМКЗ, а его несущественным недостатком является относительно большое количество вычислительных операций и чувствительность к отклонениям частоты сигналов от номинального значения.

В основу определения  $X_{ij}$  может быть положено дифференциальное уравнение линии. Если известны отсчеты мгновенных значений тока  $i_{ij}$  и напряжения  $u_{ij}$  в петле КЗ для трех последовательных моментов времени  $t_{(n-2)}$ ,  $t_{(n-1)}$ ,  $t_{(n)}$ , то выражение для  $X_{ij}$  имеет вид [5]

$$X_{ij} = \frac{(u_{ij(n-1)} + u_{ij(n)}) (i_{ij(n-2)} + i_{ij(n-1)}) - (u_{ij(n-2)} + u_{ij(n-1)}) (i_{ij(n-1)} + i_{ij(n)})}{(i_{ij(n-2)} + i_{ij(n-1)}) (i_{ij(n)} - i_{ij(n-1)}) - (i_{ij(n-1)} + i_{ij(n-2)}) (i_{ij(n-1)} - i_{ij(n)})} \frac{\Delta t}{2} \omega, \quad (5)$$

где  $\Delta t$  – шаг дискретизации входных сигналов;  $\omega$  – угловая частота.

В дальнейшем выражение (5) будем называть алгоритмом трех отсчетов. Этот алгоритм мало чувствителен к искажениям форм тока и напряжения, отклонениям частоты от номинального значения. Его основным недостатком является большая погрешность измерения при наличии дуги в месте КЗ, чем погрешность измерения при металлических КЗ.

Функционирование ОМКЗ должно начинаться при возникновении КЗ и заканчиваться после его отключения. При этом его запуск можно обеспе-

чивать сработавшими измерительными органами тока последних ступеней токовых защит.

Для анализа рассмотренных принципов ОМКЗ и оценки их работоспособности использовалась компьютерная программа, в основу которой положена математическая модель распределительной сети 10–35 кВ с двумя источниками питания [6]. Программа позволяет воспроизводить двух- и трехфазные КЗ как металлические, так и через переходное сопротивление на защищаемой линии и на смежных участках. Предусмотрена возможность задания режима подпитки места КЗ. Получаемые на выходе модели сети вторичные токи и напряжения используются в качестве исходной информации для моделирования функций ОМКЗ. Указанная информация предварительно обрабатывается аналоговыми и цифровыми элементами измерительного тракта, математическая модель которого включает модели входных преобразователей тока и напряжения, модели аналоговых фильтров нижних частот, модель аналого-цифрового преобразователя и цифровые фильтры, формирующие ОС. По полученным на выходе модели тракта ОС в режиме КЗ рассчитывается  $l_{кз}$ .

В качестве параметров для оценки принципов выполнения и алгоритмов ОМКЗ приняты относительная погрешность и время определения  $l_{кз}$  в режимах повреждений, а также дополнительная погрешность, появляющаяся при отклонении частоты от номинального значения.

Относительную погрешность определения  $l_{кз}$  рассчитаем следующим образом:

$$\delta = \frac{l_{кз} - l_{кзф}}{l_{кзф}} \cdot 100 \%, \quad (6)$$

где  $l_{кз}$  – полученное расстояние до места КЗ;  $l_{кзф}$  – фактическое расстояние до места КЗ.

При этом положительным значениям  $\delta$  будут соответствовать расстояния, которые больше фактических, а отрицательным – меньше фактических.

Время определения  $l_{кз}$ , характеризующее быстродействие ОМКЗ, представляет собой отрезок времени от момента возникновения КЗ до момента времени, по истечении которого отклонение  $l_{кз}$  от установившегося значения не превышает  $\pm 5 \%$ .

На рис. 1, 2 приведены относительные погрешности определения  $l_{кз}$  при трех- и двухфазных повреждениях на линии 10–35 кВ с двусторонним питанием.

Если  $l_* \leq 1$ , то местом КЗ является защищаемая линия, а при  $l_* > 1$  – смежная линия.

Анализ представленных на рис. 1, 2 зависимостей показывает, что характер изменения относительных погрешностей  $\delta$  определения  $l_{кз}$  при различных видах повреждений примерно одинаковый для алгоритма ОС и алгоритма трех отсчетов. Наличие переходного сопротивления  $R_d$  в месте КЗ приводит к увеличению  $\delta$ , и тем большему, чем выше  $R_d$ . Особенно большие значения  $\delta$  положительного знака имеют место при КЗ на головном участке линии ( $l_* < 0,3$ ). Это объясняется существенными погрешностями трансформаторов тока, которые при КЗ на указанном участке работают

в режимах насыщения или близких к ним. По мере удаления точки КЗ от места установки защиты  $\delta$  снижаются, при  $l_* > (0,7-0,8)$  относительные погрешности при двухфазных КЗ становятся отрицательными и начинают возрастать по модулю при перемещении точки повреждения в направлении конца смежной линии. При всех видах КЗ на смежной линии относительные погрешности имеют отрицательный знак.

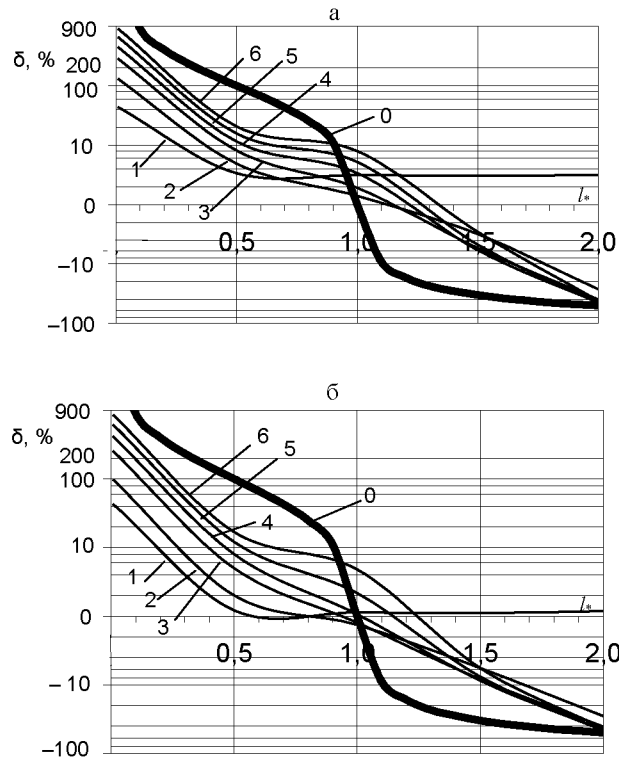


Рис. 1. Относительные погрешности определения  $l_{кз}$  при трехфазных КЗ: а – алгоритм ОС; б – алгоритм трех отсчетов; 0 – кривая предельных погрешностей; 1 – металлические КЗ; 2, 3, 4, 5, 6 – КЗ через переходное сопротивление с  $R_d = 2, 4, 6, 8, 10$  Ом соответственно

Представленная на рис. 1, 2 кривая предельных погрешностей 0 ( $\delta_{пр} = f(l_*)$ ) ограничивает область допустимых значений  $\delta$ , при которых обеспечивается достоверное определение линии, на которой возникло КЗ. При повреждениях на защищаемой линии ( $l_* \leq 1$ ) достоверное определение места КЗ будет обеспечено, если все значения  $\delta$  расположены ниже кривой 0. В противном случае место КЗ будет установлено неверно и им окажется смежная линия. При этом КЗ на защищаемой линии будут отключаться с выдержкой времени. Такое реально возможно при повреждениях в конце линии, где требуется замер  $l_{кз}$  с высокой, практически недостижимой точностью ( $\delta_{пр} \rightarrow 0$ ). Поэтому фактически существующие погрешности  $\delta > \delta_{пр}$  ограничивают зону мгновенного отключения КЗ. Расширение указанной зоны может быть достигнуто выбором корректирующего коэффициента  $K_k > 1$ . Его численное значение определяется по минимальной величине возможной погрешности  $\delta_{min}$  при повреждениях из области значений, находящихся выше предельной кривой 0:

$$K_k = 1 + \frac{\delta_{\min}}{100}. \quad (7)$$

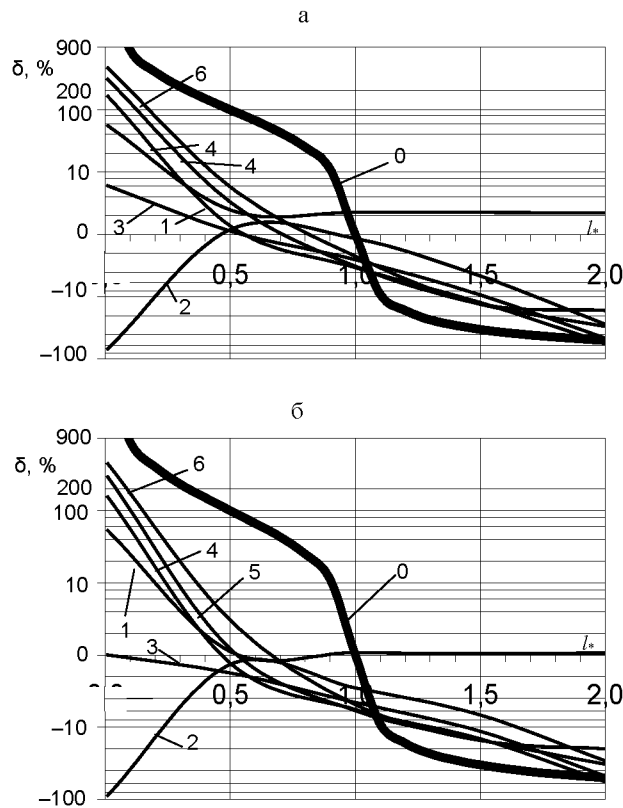


Рис. 2. Относительные погрешности определения  $l_{кз}$  при двухфазных КЗ:  
а; б; 0; 1; 2; 3; 4; 5; 6 – то же, что на рис. 1

Следует отметить, что выбор  $K_k$  в соответствии с выражением (7) обеспечивает исключение неселективной работы защиты при КЗ на смежной линии.

При КЗ на смежной линии ( $l_* > 1$ ) достоверное определение его места обеспечивается, когда все значения  $\delta$  располагаются выше кривой 0. В противном случае место КЗ будет установлено неверно и им окажется защищаемая линия. При этом защита будет работать неселективно. Такое реально возможно при повреждениях в начале смежной линии, где необходимо измерять  $l_{кз}$  с очень высокой точностью, поскольку  $\delta_{пр} \rightarrow 0$ . Поэтому фактически существующие погрешности  $|\delta| > |\delta_{пр}|$  будут определять зону неселективной работы защиты. Ее устранение может быть обеспечено выбором корректирующего коэффициента  $K_k < 1$ . Численное значение  $K_k$  определяется по максимальной величине модуля возможной погрешности  $|\delta|_{\max}$  при повреждениях из области значений, находящихся ниже предельной кривой:

$$K_k = 1 - \frac{|\delta|_{\max}}{100}. \quad (8)$$

Следует отметить, что при этом сокращается зона мгновенного отключения КЗ на защищаемой линии.

Анализ представленных на рис. 1, 2 зависимостей показывает, что при КЗ на участке  $1 \leq l_* \leq 1,15$  защита с реализацией рассмотренного принципа будет работать неселективно, поскольку текущие значения  $\delta$  находятся ниже кривой 0. Исключение неселективной работы такой защиты может быть достигнуто выбором  $K_K < 1$ .

В результате выполненных исследований установлено, что дополнительные погрешности определения  $l_{кз}$  для обоих алгоритмов при подпитке места КЗ от источника, мощность которого соизмерима с мощностями основных источников, по модулю не превышают 0,5 % при повреждениях вблизи конца защищаемой линии. По мере удаления точки КЗ от указанного места дополнительные погрешности имеют меньшие значения.

На рис. 3, 4 представлены динамические характеристики двух алгоритмов ОМКЗ, позволяющие оценить время определения места повреждения по значению  $l_{кз}$ . Их анализ свидетельствует о практически не отличающихся как в качественном, так и в количественном отношении динамических характеристиках обоих алгоритмов. Время замера  $l_{кз}$  зависит от места повреждения и для обоих вариантов ОМКЗ находится в диапазоне (0,03–0,04) с. При этом возникновение КЗ на защищаемой линии фиксируется за более короткое время, меньшее 0,03 с, что способствует повышению быстроты защиты, действующей на отключение.

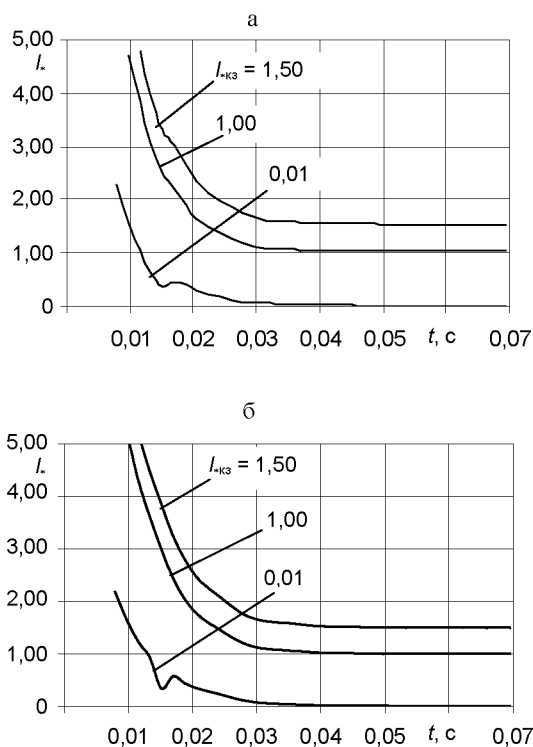


Рис. 3. Динамические характеристики алгоритмов ОМКЗ при трехфазных КЗ:  
а – алгоритм ОС; б – алгоритм трех отсчетов

Наличие в месте КЗ переходных сопротивлений не вызывает заметных искажений динамических характеристик (рис. 4) и не приводит к ощутимым отклонениям рассматриваемого оценочного параметра.

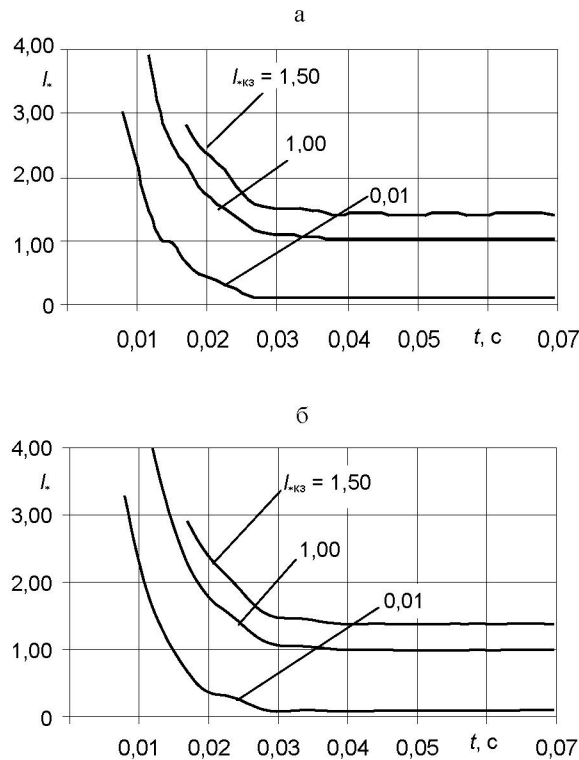


Рис. 4. Динамические характеристики алгоритмов ОМКЗ при трехфазных КЗ через переходное сопротивление с  $R_d = (2-10)$  Ом: а; б – то же, что на рис. 3

В результате выполненных исследований установлено, что при двухфазных КЗ как металлических, так и через переходное сопротивление динамические характеристики рассматриваемых алгоритмов являются идентичными и отличаются от приведенных на рис. 3, 4 лишь небольшими качественными отклонениями.

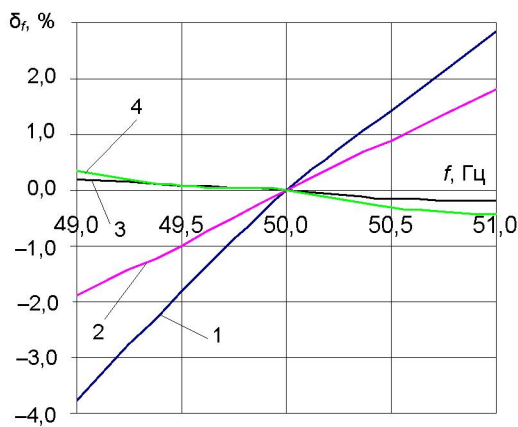


Рис. 5. Частотные погрешности алгоритмов ОМКЗ: 1, 2 – алгоритм ОС соответственно при двух- и трехфазных КЗ; 3, 4 – алгоритм трех отсчетов соответственно при двух- и трехфазных КЗ

При этом время определения  $I_{кз}$  находится в том же диапазоне, что и при трехфазных КЗ.

Расчет численных значений  $I_{кз}$  с использованием алгоритма ОС или алгоритма трех отсчетов с минимальными погрешностями обеспечивается при частоте 50 Гц. При отклонении частоты от указанного значения  $I_{кз}$  определяется с дополнительными погрешностями (рис. 5).



Дополнительные погрешности определения  $l_{кз}$  при использовании алгоритма ОС

и отклонении частоты ( $50 \pm 1$ ) Гц могут достигать порядка  $\pm 3,5$  %. Алгоритм трех отсчетов практически нечувствителен к отклонениям частоты. В диапазоне изменений частоты  $\pm 1$  Гц от номинального значения дополнительные погрешности  $l_{кз}$  не превышают  $\pm 0,4$  %.

Исходя из полученных уровней  $\delta$  при КЗ с учетом всех влияющих факторов, принимая во внимание выражение (8), в случае использования для ОМКЗ алгоритма ОС можно принять  $K_k = (0,87-0,93)$ , а при применении алгоритма трех отсчетов  $K_k = (0,84-0,89)$ . Выбор больших  $K_k$ , что является в конкретной ситуации предпочтительным, для алгоритма ОС объясняется его более высокой точностью определения  $l_{кз}$ .

## ВЫВОДЫ

1. Реализация функций ОМКЗ в микропроцессорных токовых защитах линий обеспечивает расширение зоны мгновенного отключения КЗ и создает необходимые предпосылки для сокращения общего числа измерительных органов.

2. В основу ОМКЗ на линиях 6–35 кВ может быть положен дистанционный принцип определения расстояния до места КЗ с использованием алгоритма ОС или алгоритма трех отсчетов. Первый из указанных алгоритмов отличается более высокой точностью, однако чувствителен к изменениям частоты. Практически нечувствительным к изменениям частоты, но менее точным является алгоритм трех отсчетов. Вместе с тем, каждый из рассмотренных алгоритмов является работоспособным и обеспечивает получение необходимой информации для эффективной реализации функций ОМКЗ.

3. Представляют, в первую очередь, интерес разработка и исследование с использованием рассмотренных положений алгоритмов функционирования микропроцессорных токовых направленных защит линий распределительных сетей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. У с т р о й с т в о токовой направленной защиты от междуфазных коротких замыканий: пат. 11267 Респ. Беларусь, МПК (2006) Н 02Н 3/08, Н 02Н 3/20 / А. А. Тишечкин, Ф. А. Романок, О. А. Гурьянчик; заявитель Белорусский национальный технический университет; заявл. 06.02.2007; опубл. 30.10.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008.

2. К о в а л е в с к и й А. В. Выбор численного значения критерия для определения вида короткого замыкания в адаптивной микропроцессорной токовой защите линий / А. В. Ковалевский // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2007. – № 5. – С. 37–41.

3. Ш н е е р с о н Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.

4. Ф е д о с е е в А. М. Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей: учеб. пособие для вузов / А. М. Федосеев. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – С. 520.

5. Н о в а ш В. И. Частотные свойства алгоритмов функционирования измерительных органов сопротивления цифровых дистанционных защит ЛЭП / В. И. Новаш, В. В. Шмыгин // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2004. – № 5. – С. 15–23.