

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОНЫ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЛЭП 6–35 КВ С ОДНОСТОРОННИМ ПИТАНИЕМ ПО ТОКУ ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

## Аннотация

В статье рассмотрен алгоритм выявления зоны двухфазного короткого замыкания по методу с контролем токов обратной последовательности. Метод позволяет повысить чувствительность к несимметричным коротким замыканиям микропроцессорной токовой защиты линий электропередачи напряжением 6–35 кВ с односторонним питанием. Данный способ определения зоны несимметричных повреждений в первую очередь предназначен для длинных линий, когда величины токов короткого замыкания на их концах различаются не менее чем в несколько раз.

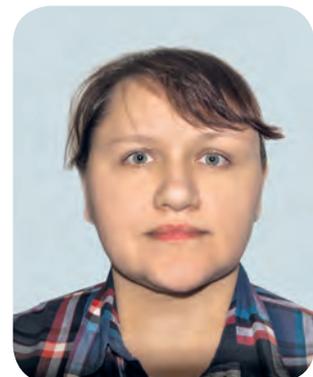
## Annotation

In the present article the authors considered an algorithm for detecting a two-phase short circuit zone using a method with control of negative phase-sequence currents. This method allows increasing the sensitivity to asymmetrical short circuits of microprocessor current protection of the power lines of distribution networks of 6–35 kV with one-sided power supply. This method of determining the zone of asymmetrical faults is primarily intended for the long power lines, when the short-circuit current values at their ends differ at least several times.

Статья поступила в редакцию 22 марта 2019 года



**Ф.А. РОМАНИУК,**  
член-корр. НАН Беларуси, д.т.н.,  
профессор БНТУ



**Е.В. БУЛОЙЧИК,**  
к.т.н., доцент БНТУ

## Введение

Для линий электропередачи (ЛЭП) напряжением 6–35 кВ с односторонним питанием в [1] предложена микропроцессорная токовая защита, в основе выполнения которой токовый принцип сочетается с элементами дистанционного. Ее отличительными особенностями являются:

- использование информации о виде и зоне повреждения;
- выполнение защиты с двумя степенями;
- реализация последней ступени с линейно зависимой выдержкой времени.

С целью повышения чувствительности микропроцессорной токовой защиты к несимметричным коротким замыканиям (КЗ) на сильно нагруженных линиях в [2] предложено снабдить ее дополнительной ступенью, реагирующей на ток обратной последовательности.

Для обеспечения быстрого отключения поврежденных участков токовая защита обратной последовательности (ТЗОП) выполняется с линейно зависимой характеристикой выдержки времени, которая нарастает пропорционально расстоянию до места несимметричного повреждения.



**М.А. ШЕВАЛДИН,**  
м.т.н., начальник отдела  
эксплуатации релейной защиты  
и автоматики электрооборудования  
и электрических сетей  
ГПО «Белэнерго»

Зона повреждения на участке ЛЭП с односторонним питанием может быть определена по относительному значению расстояния от места, где установлена защита, до точки повреждения  $l_k$ . Если  $l_k \leq 1$ , то зона КЗ расположена на контролируемом участке линии, в противном случае она находится за его пределами. При несимметричных КЗ зона повреждения может определяться на основе контроля тока обратной последовательности  $I_2$  [2, 3].

**Алгоритм работы защиты с функцией выявления зоны короткого замыкания по току обратной последовательности**

Если предположить, что изменение тока обратной последовательности в функции длины линии  $I_2 = f(l)$  при двухфазных КЗ носит спадающий характер, как показано на рисунке 1, то  $1/I_2$  и  $l$  будут связаны линейной зависимостью  $1/I_2 = f(l)$ , изображенной на указанном рисунке линией 3.

Если представить зависимость  $1/I_2 = f(l)$  как уравнение прямой линии, проходящей на плоскости через две точки с координатами  $[0, 1/I_{2(0)}]$  и  $[1, 1/I_{2(1)}]$ , и разрешить его относительно  $I_2$ , то после несложных преобразований получим выражение для расчета тока обратной последовательности в режимах несимметричных КЗ при различных значениях  $l$ :

$$I_2 = \frac{I_{2(0)} \cdot I_{2(1)}}{I_* \cdot (I_{2(0)} - I_{2(1)}) + I_{2(1)}} \tag{1}$$

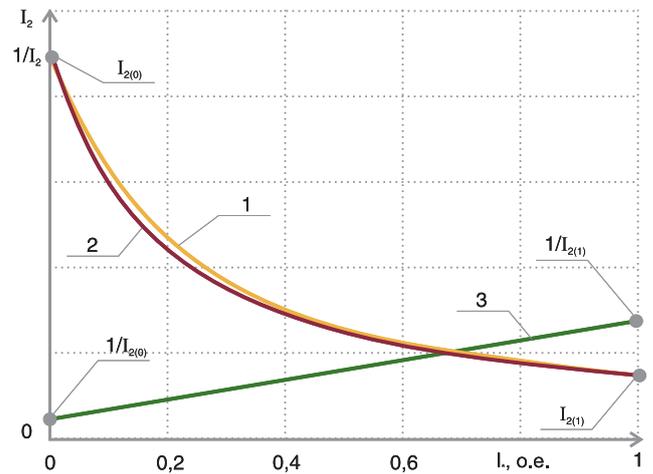
где  $I_{2(0)}$  и  $I_{2(1)}$  – действующие значения токов обратной последовательности при двухфазных КЗ в точках при  $l = 0$  и  $l = 1$  соответственно. Эти значения численно равны действующим величинам полных токов поврежденных фаз при металлических двухфазных КЗ в соответствующих точках и рассчитываются с использованием известных методов.

Величины тока обратной последовательности  $I_2$  при двухфазных КЗ в различных точках участка ЛЭП определены по выражению (1) при заданных значениях  $I_{2(0)}$  и  $I_{2(1)}$  и представлены на рисунке 1 в виде зависимости 1. Здесь же изображена аналогичная зависимость 2, полученная методом вычислительного эксперимента в результате реализации математической модели режимов двухфазных повреждений на участке ЛЭП распределительной сети 6–35 кВ с односторонним питанием.

Анализ зависимостей 1 и 2 свидетельствует о небольших различиях значений токов обратной последовательности, полученных расчетным и экспериментальным методами. Это может служить основанием для использования формулы (1) для решения обратной задачи – определения зоны повреждения на участке ЛЭП по относительному значению расчетного расстояния от места установки устройства защиты до точки КЗ  $l_p$  при известном значении  $I_2$ . Из (1) получим

$$I_{*p} = \frac{I_{2(1)}}{I_{2(0)} - I_{2(1)}} \cdot \left( \frac{I_{2(0)}}{I_2} - 1 \right) \tag{2}$$

Достоверность установления зоны повреждения определяется точностью расчета  $l_p$  по (2), которая зависит от ряда факторов. Одним из них является погрешность выделения тока обратной последовательности  $I_2$ . Если поврежденный участок расположен близко к месту установки ТЗОП, трансформатора



**Рис. 1. Характеристики изменения тока обратной последовательности при двухфазных КЗ:**

1 – расчетная зависимость; 2 – экспериментальная зависимость; 3 – зависимость  $1/I_2 = f(l)$

торы тока могут работать в режимах насыщения или схожих с ними рабочих режимах. В этом случае погрешности формирования  $I_2$  и, соответственно, определения  $l_p$  могут быть существенными. Однако если они не превысят предельно допустимых значений, то селективность действия защиты нарушаться не будет.

При повреждениях в конце участка ЛЭП  $I_2 = I_{2(1)}$ . Если  $I_{2(0)}$  и  $I_{2(1)}$  будут незначительно отличаться по величине, то  $(I_{2(0)} - I_{2(1)}) \rightarrow 0$ , а  $I_{2(0)}/I_{2(1)} \rightarrow 1$  и вычислительная погрешность  $l_p$  может превысить предельно допустимую и достоверно установить зону повреждения будет затруднительно. Во избежание подобных ситуаций необходимо, чтобы численное значение отношения  $I_{2(0)}/I_{2(1)}$  было по крайней мере не меньше 2. Указанное отношение определяется главным образом параметрами участка ЛЭП, в значительной степени – его длиной. Это обстоятельство накладывает ограничения на область использования предлагаемого метода.

На точность определения  $l_p$  также оказывают влияние нагрузочные токи, которые при несимметричных КЗ вносят дополнительную погрешность в формирование  $I_2$ . Частично компенсировать их влияние можно следующим образом. Выделив из действующих значений разностей фазных токов  $I_{ab}$ ,  $I_{bc}$  и  $I_{ca}$  наибольшее  $I_{max}$ , среднее  $I_{mid}$  и минимальное  $I_{min}$ , формируют три новых вектора тока  $\dot{I}_1$ ,  $\dot{I}_2$  и  $\dot{I}_3$  в соответствии с выражениями

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \dot{I}_{max}, \\ \dot{I}_2 = \dot{I}_3 &= \frac{\dot{I}_{mid} + \dot{I}_{min}}{2}. \end{aligned} \tag{3}$$

По синусным и косинусным ортогональным составляющим (ОС) векторов  $\dot{I}_1$ ,  $\dot{I}_2$  и  $\dot{I}_3$  вычисляют отсчеты синусной  $i_{s2}$  и косинусной  $i_{c2}$  ОС тока обратной последовательности согласно [4, 5], после чего определяют действующее значение  $I_2$ . Это обеспечивает частичную компенсацию влияния нагрузочных токов на  $l_p$ , а при металлических двухфазных КЗ влияние токов полностью исключается.

Наиболее существенные отклонения  $l_p$  от фактических значений обусловлены переходными сопротивлениями в месте повреждения, которые влекут дополнительную относительную несимметрию токов  $I_{ab}$ ,  $I_{bc}$  и  $I_{ca}$ , зависящую от величин этих со-

противлений. Частичная компенсация влияния данного фактора может быть достигнута за счет коррекции тока  $I_2$  с помощью поправочного коэффициента, определенного с учетом указанной несимметрии разностей фазных токов  $I_{ab}$ ,  $I_{bc}$  и  $I_{ca}$ .

В радиальной сети с одним источником питания (рис. 2), включающей две ЛЭП ( $L_1$  и  $L_2$ ), зона повреждения, контролируемая защитой  $A_1$ , может находиться на  $L_1$  или на  $L_2$ .

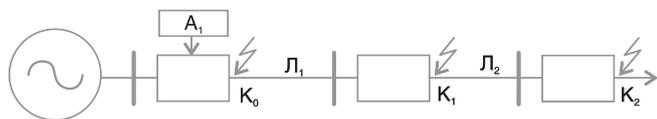


Рис. 2. Схема радиальной сети с одним источником питания

Вначале предполагается, что зона повреждения находится на линии  $L_1$ . По формуле (2) с использованием значений токов обратной последовательности  $I_{2(0)}$  и  $I_{2(1)}$  в точках  $K_0$  и  $K_1$  соответственно, а также сформированного текущего значения  $I_2$  рассчитывается величина относительного расстояния от начала  $L_1$  до точки КЗ  $I_{p1}$ . Если  $I_{p1} \leq 1$ , то общее расстояние от места установки защиты  $A_1$  до места повреждения  $I_p = I_{p1}$ . В противном случае КЗ находится на линии  $L_2$  и относительное расстояние от ее начала до точки КЗ  $I_{p2}$  рассчитывается по (2) с использованием значений токов обратной последовательности  $I_{2(1)}$  и  $I_{2(2)}$  в точках  $K_1$  и  $K_2$  соответственно с учетом полученного текущего значения  $I_2$ . Если  $I_{p2} \leq 1$ , то общее относительное расстояние от места установки защиты до места повреждения  $I_p = 1 + I_{p2}$ . При  $I_{p2} > 1$  зона повреждения находится за пределами линии  $L_2$ . Если  $I_{p2} < 0$ , то принимается  $I_p = 1$ .

Для повышения достоверности определения  $I_p$  текущее значение тока обратной последовательности  $I_2$  корректируется путем умножения на поправочный коэффициент  $K_n$ . Значение коэффициента вычисляется на основе относительной несимметрии разностей фазных токов  $\Delta I$ , определяемой согласно [6]:

$$\Delta I = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\min}} \quad (4)$$

При металлических двухфазных КЗ на нагруженной ЛЭП и относительно малых значениях переходного сопротивления, когда уровень относительной несимметрии  $\Delta I \geq 0,95$ , необходимость в коррекции отсутствует ( $K_n = 1$ ). При  $\Delta I < 0,95$  поправочный коэффициент определяется согласно выражению, полученному по результатам большого количества вычислительных экспериментов:

$$K_n = 2 - \Delta I \quad (5)$$

При двухфазных КЗ на ненагруженной ЛЭП коррекция на основе относительной несимметрии токов  $\Delta I$  не представляется возможной, так как независимо от уровней переходных сопротивлений и места повреждения  $\Delta I$  практически не изменяется ( $\Delta I = 1$ ). Использовать с целью коррекции вычисленные иным образом значения относительной несимметрии затруднительно по той же причине либо, напротив, из-за значительного разброса их значений. При этом в указанном режиме принятое выражение для поправочного коэффициента не повлияет на результат расчета  $I_p$ , что исключает необходимость выявления вида нагрузочного режима для достоверного установления зоны КЗ.

На рисунке 3 показаны относительные погрешности  $\delta$  определения расчетного расстояния  $I_p$  до точки двухфазного металлического КЗ ( $R_n/Z_n = 0$ ) на нагруженной и ненагруженной линиях по току обратной последовательности согласно (2) и (3). На рисунках 4 и 5 показаны аналогичные зависимости при двухфазных КЗ на нагруженной линии через переходное сопротивление ( $R_n/Z_n > 0$ ) с проведением коррекции тока обратной последовательности (рис. 4) и без нее (рис. 5).

Следует отметить, что область допустимых значений  $\delta$ , при которых обеспечивается достоверное установление зоны повреждения, ограничивается кривой предельных погрешностей (рис. 3–5, зависимость 1). Если при КЗ на защищаемой линии ( $I_p \leq 1$ ) значения  $\delta$  лежат в области ниже кривой 1, а при КЗ на смежной линии ( $I_p > 1$ ) – выше этой кривой, то зона повреждения будет устанавливаться достоверно. При любых других расположениях  $\delta$  зона КЗ будет определяться неверно, в результате чего значение  $I_p$  может быть завышенным или заниженным.

При металлических ( $R_n/Z_n = 0$ ) двухфазных КЗ в пределах  $l \leq 0,61$  на ненагруженной линии при определении  $I_p$  характерно занижение расчетного расстояния до точки повреждения, а при удаленных КЗ ( $l > 0,61$ ) – завышение с погрешностью до 3,5 % (рис. 3, зависимость 2). При наличии нагрузочных токов происходит занижение результатов расчета расстояния до точки повреждения независимо от его местоположения. Погрешность определения  $I_p$  при КЗ в конце защищаемой линии составляет до 5 %, а при удаленных повреждениях ( $l \geq 1,05$ ) – не выходит за пределы кривой предельных погрешностей. При этом в обоих случаях коррекция тока обратной последовательности не производится, так как для этих режимов характерно  $\Delta I \geq 1$  [6]. Различие в результатах частично можно объяснить влиянием нагрузочных токов на насыщение и, следовательно, возникающими в результате этого погрешностями преобразования измерительных трансформаторов тока. При большой кратности тока КЗ по отношению к нагрузочному погрешности определения  $I_p$  в обоих случаях будут близкими. По мере удаления точки повреждения от места установки защиты, а также с увеличением удельного содержания тока нагрузки разница в погрешностях возрастает.

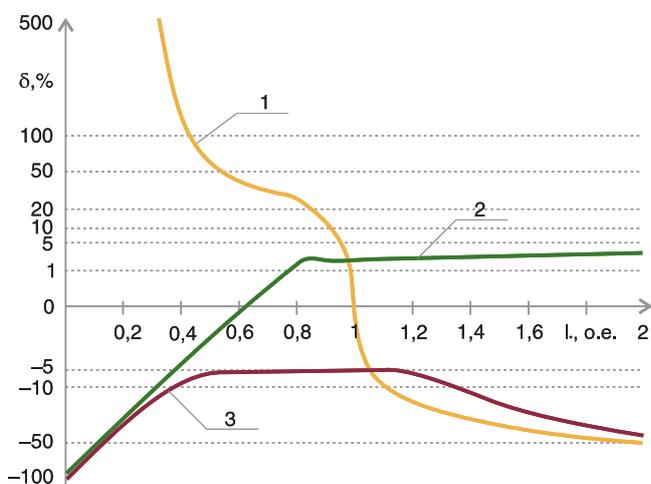
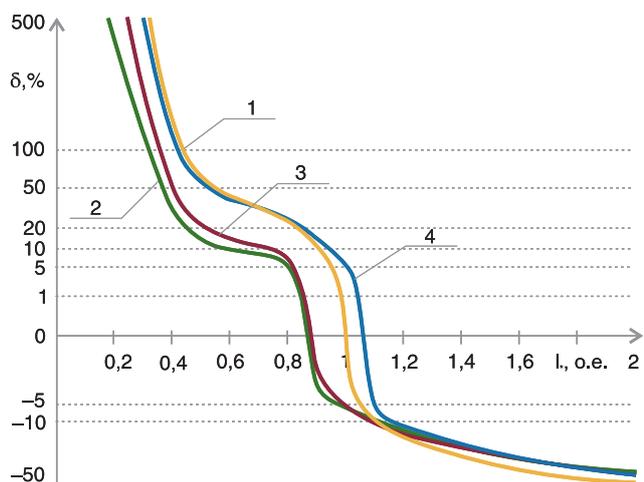
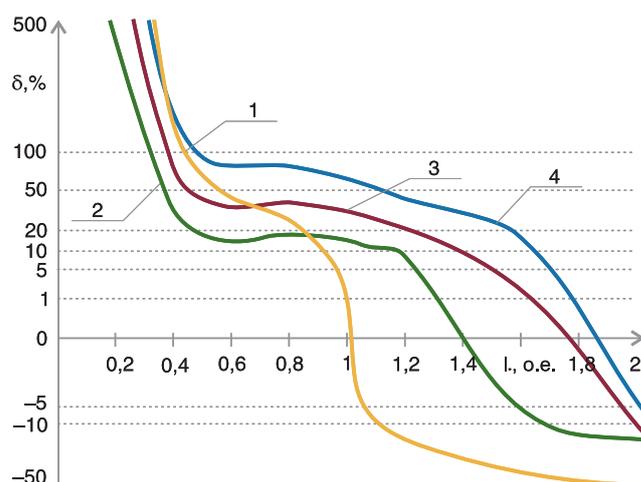


Рис. 3. Относительные погрешности определения расчетного расстояния до точки повреждения  $I_p$  при двухфазных металлических КЗ: 1 – кривая предельных погрешностей; 2 – ненагруженный режим; 3 – нагруженный режим



**Рис. 4.** Относительные погрешности определения расчетного расстояния до точки повреждения  $I_p$  при двухфазных КЗ через переходное сопротивление с использованием коррекции токов обратной последовательности: 1 – кривая предельных погрешностей; 2 –  $R_n/Z_n = 0,5$ ; 3 –  $R_n/Z_n = 1$ ; 4 –  $R_n/Z_n = 2$



**Рис. 5.** Относительные погрешности определения расчетного расстояния до точки повреждения  $I_p$  при двухфазных КЗ через переходное сопротивление без использования коррекции токов обратной последовательности: 1, 2, 3, 4 – то же, что на рисунке 4

Наличие переходного сопротивления приводит к увеличению погрешностей определения  $I_p$ : они тем больше, чем выше отношение  $R_n/Z_n$ , независимо от наличия нагрузочных токов (рис. 4, 5). Как было отмечено ранее, при повреждении на ненагруженной ЛЭП коррекция тока обратной последовательности не производится, и с ростом  $R_n/Z_n$  будет возрастать и степень завышения расчетной удаленности  $I_p$ . Это приведет к замедлению срабатывания устройства ТЗОП, действующего с выдержкой времени.

В нагрузочном режиме при наличии в месте повреждения переходных сопротивлений различного уровня значение относительной несимметрии  $\Delta I$  уменьшается по мере удаления точки КЗ от места установки защиты [6]. При этом в случае возникновения повреждения ближе к концу защищаемой ЛЭП и в пределах смежной будет производиться коррекция тока обратной последовательности  $I_2$  путем его умножения на поправочный коэффициент  $K_n$ , рассчитанный согласно (5).

Анализ зависимостей, приведенных на рисунках 4 и 5, позволяет сделать вывод, что введение коррекции обеспечивает повышение достоверности установления зоны повреждения при КЗ на нагруженной ЛЭП 6–35 кВ за счет более точного определения  $I_p$ .

Следует отметить, что расположенные ниже предельной кривой отрицательные погрешности, характерные как для металлических КЗ на нагруженной ЛЭП (без коррекции токов обратной последовательности), так и для КЗ через переходное сопротивление (с коррекцией), могут явиться причиной недостоверного установления зоны КЗ и неселективного действия защиты ЛЭП. Подходы, гарантирующие достоверное определение зоны повреждения в таких ситуациях, изложены в [7]. При этом величина и знак погрешности определения расчетного расстояния  $I_p$  при КЗ на защищаемой линии с использованием коррекции тока обратной последовательности позволяют теоретически иметь на 100 % достоверную зону повреждений при переходных сопротивлениях вплоть до  $R_n/Z_n \leq 1,5$  (рис. 4). Благодаря этому более устойчиво задается выдержка времени срабатывания защиты, что не может быть достигнуто при вычислении  $I_p$  без применения коррекции (рис. 5).

## Заключение

Выявление зоны двухфазного короткого замыкания по току обратной последовательности может быть использовано для относительно длинных линий электропередачи напряжением 6–35 кВ с односторонним питанием, когда значения токов повреждения по концам ЛЭП различаются не менее чем в несколько раз. Повышение достоверности определения указанной зоны в различных режимах повреждений достигается путем коррекции тока обратной последовательности с учетом возникшей относительной несимметрии токов.

### Список литературы

1. Романюк, Ф.А. Принципы выполнения токовой защиты линий с односторонним питанием от междуфазных коротких замыканий / Ф.А. Романюк, М.А. Шевалдин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2015. – № 1. – С. 5–11.
2. Романюк, Ф.А. Исследование принципа выполнения токовой защиты обратной последовательности ВЛ 6–10 кВ / Ф.А. Романюк, Е.В. Булойчик, М.А. Шевалдин // Энергетическая стратегия. – 2018. – № 6. – С. 38–43.
3. Романюк, Ф.А. Повышение чувствительности токовой защиты к несимметричным повреждениям на линиях электропередачи напряжением 6–35 кВ / Ф.А. Романюк, М.А. Шевалдин // Энергетика и ТЭК. – 2016. – № 4. – С. 23–25.
4. Романюк, Ф.А. Исследование алгоритмов формирования токов обратной последовательности / Ф.А. Романюк, В.Ю. Румянцев, М.А. Шевалдин // Энергетическая стратегия. – 2016. – № 4. – С. 48–51.
5. Романюк, Ф.А. Информационное обеспечение микропроцессорных защит электроустановок: учеб. пособие / Ф.А. Романюк. – Минск: УП «Технопринт», 2001. – 133 с.
6. Романюк, Ф.А. Определение вида повреждения в токовых защитах линий электропередачи 6–35 кВ / Ф.А. Романюк, Е.В. Булойчик, О.А. Гурьянчик, М.А. Шевалдин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2017. – № 6. – С. 497–504.
7. Романюк, Ф.А. Повышение достоверности определения зоны короткого замыкания на линиях 6–35 кВ / Ф.А. Романюк, Е.В. Булойчик, О.А. Гурьянчик, В.С. Каченя // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2018. – № 1. – С. 5–14.