

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-1-5-15

УДК 621.316.925

## Определение вида междуфазного короткого замыкания в токовых защитах линий 6–35 кВ

Ф. А. Романюк<sup>1)</sup>, О. А. Гурьянчик<sup>1)</sup>, М. А. Шевалдин<sup>1)</sup>, В. С. Каченя<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017  
Belarusian National Technical University, 2017

**Реферат.** Рассмотрены методы определения вида междуфазного короткого замыкания (КЗ) на линиях 6–35 кВ для повышения технического совершенства их токовых защит. При этом предпочтение отдано методу определения вида повреждения по относительной несимметрии действующих значений токов. Показана принципиальная возможность использования для этой цели фазных токов либо их разностей. Методом вычислительного эксперимента исследовано влияние тока нагрузки линии и переходного сопротивления в месте повреждения на относительную несимметрию токов, что в конечном итоге определяет достоверность установления вида КЗ. Установлено, что при использовании для определения вида повреждения фазных токов обеспечивается более высокая чувствительность к удаленным двухфазным КЗ. Вместе с тем в этом случае на достоверность определения вида повреждения в большей степени влияют токи нагрузки линии. Определение вида повреждения с использованием разностей фазных токов отличается меньшей чувствительностью к удаленным двухфазным КЗ, однако при этом обеспечивается меньшее влияние на достоверность определения вида повреждения токов нагрузки линии. Переходное сопротивление в месте повреждения смещает относительную несимметрию токов к области двухфазных КЗ. Установлено, что при любых удаленных КЗ на параллельных линиях предложенные методы обеспечивают достоверное определение вида повреждения, одновременно возникающего на контролируемой линии. При наложении повреждений, одно из которых находится на одной из параллельных линий вблизи общих шин, а второе – на контролируемой линии, определенный любым из предложенных методов вид КЗ может отличаться от фактического. Это зависит от видов возникших повреждений, сочетаний замкнувшихся фаз, установившегося токораспределения в сети и других факторов. Предложенные методы позволяют определять вид междуфазного КЗ в наихудшем случае за время, не превышающее периода промышленной частоты.

**Ключевые слова:** токовая защита, вид короткого замыкания, относительная несимметрия, ток нагрузки, переходное сопротивление, фазный ток, разность фазных токов, быстродействие

**Для цитирования:** Определение вида междуфазного короткого замыкания в токовых защитах линий 6–35 кВ / Ф. А. Романюк [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60. № 1. С. 5–15. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-1-5-15

---

### Адрес для переписки

Романюк Федор Алексеевич  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65/2,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 331-00-51  
faromanuk@bntu.by

### Address for correspondence

Romaniuk Fiodar A.  
Belarusian National Technical University  
65/2 Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 331-00-51  
faromanuk@bntu.by

---

## The Determination of the Kind of Phase-to-Phase Short Circuit in Current Line Protection of 6–35 kV

F. A. Romaniuk<sup>1)</sup>, O. A. Huryanchyk<sup>1)</sup>, M. A. Shevaldin<sup>1)</sup>, V. S. Kachenya<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The methods of determining the kind of phase-to-phase short circuit (SC) on the lines of 6–35 kV for improvement the technical perfection of their current protections are surveyed. Preference is given to the method of determining damages according to the relative unbalance the operating currents. The possibility of using the phase currents or their differences for this purpose is demonstrated. The method of computational experiment was used to investigate the influence of the DC load line and transition resistance at the failure site on the relative asymmetry of the currents that ultimately determines the reliability of the establishment of the kind of SC. It is discovered that when the phase currents are used to determine the type of the failure higher sensitivity to remote two-phase SC is achieved. However, in this case, the accuracy of determining the type of failure is more affected by currents of the line load. Determination of failure with the use of differences of phase currents is less sensitive to remote two-phase SC. However, this provides less impact on the accuracy of determining the type of failure of load line currents. Transition resistance at the failure site shifts the relative unbalance of the currents to the area of two-phase SC. It is established that despite the kind of a remote SC in parallel lines the proposed methods provide accurate determination of types of failure that simultaneously occurs on the monitored line. When failures are superpositioned, one of which is on one of the parallel lines near the common bus and the other second on the monitored bus, the kind of the SC, determined by any of the proposed methods may differ from the actual one. It depends on the types of resulting failures, the combinations of shutting phases, the steady-state current distribution in the network and other factors. The proposed methods make it possible to determine the kind of phase-to-phase SC, in the worst case, for a time not exceeding the period of industrial frequency.

**Keywords:** overcurrent protection, kind of short circuit, relative unbalance, load current, transition resistance, phase current, difference of phase currents, fast response

**For citation:** Romaniuk F. A., Huryanchyk O. A., Shevaldin M. A., Kachenya V. S. (2017) The Determination of the Kind of Phase-to-Phase Short Circuit in Current Line Protection of 6–35 kV. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (1), 5–15. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-1-5-15 (in Russian)

### Введение

Защиты, выполняемые на токовом принципе, применяются в распределительных сетях для защиты линий 6–35 кВ от междуфазных коротких замыканий (КЗ) [1]. Они реагируют на увеличение тока в защищаемой линии и действуют на отключение в случае превышения им заданного значения.

Междуфазные короткие замыкания, возникающие на линиях сетей, могут быть трех- и двухфазными. При трехфазных КЗ векторные диаграммы токов являются симметричными и уравновешенными, поскольку в них отсутствуют составляющие обратной и нулевой последовательностей. В случае двухфазного КЗ векторы токов образуют несимметричную, но уравновешенную систему. Это свидетельствует об отсутствии составляющих нулевой последовательности. Однако несимметрия обуславливает наличие в токах составляющих обратной последовательности наряду с прямой [2].

Показатели технического совершенства существующих токовых защит линий во многих случаях двухфазных КЗ находятся ниже требуемых значений. Это является следствием того, что токи срабатывания ступеней защиты выбираются по наиболее тяжелым условиям трехфазного КЗ и симметричного нагрузочного режима.

Для повышения технического совершенства токовых защит линий в [3] предложено реализовать их функционирование с использованием адаптивного принципа. Его сущность заключается в определении вида междуфазного КЗ при возникновении повреждений с последующим выбором соответствующих токов срабатывания ступеней защиты, рассчитанных по условиям трехфазного КЗ и симметричного нагрузочного режима или двухфазного КЗ и несимметричного нагрузочного режима.

### **Существующие методы определения вида междуфазного короткого замыкания на линиях 6–35 кВ**

Выявление вида междуфазного КЗ на линиях сети может осуществляться одним из следующих способов:

- на основе анализа содержащихся в токах симметричных составляющих [4];
- путем контроля уровня относительной несимметрии токов [5].

Реализация первого метода предполагает выявление симметричных составляющих с помощью соответствующих фильтров. Выходные сигналы указанных фильтров могут варьироваться при отклонениях частоты в энергосистеме, изменениях величин и состава высших гармоник в токах линии из-за нелинейных характеристик нагрузки, при коммутации силовых трансформаторов, а также при насыщении трансформаторов тока и т. п. Все перечисленные факторы являются трудно учитываемыми и отрицательно сказываются на чувствительности определения вида междуфазного КЗ.

Реализация второго метода более проста и предусматривает определение уровня относительной несимметрии токов по их действующим значениям. Данный метод для рассматриваемого применения представляется предпочтительным, поскольку не требует использования элементов, чувствительных к изменениям частоты и высшим гармоникам.

### **Определение вида междуфазного короткого замыкания по относительной несимметрии токов**

Уровень относительной несимметрии  $\Delta I$  можно определить по одному из следующих выражений [6, 7]:

$$\Delta I = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max}}; \quad (1)$$

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

где  $I_{\max}$  и  $I_{\min}$  – соответственно наибольшее и наименьшее действующие значения токов линии.

Действующие значения токов  $I_{\max}$  и  $I_{\min}$  могут выделяться из уравновешенной системы фазных токов, которая имеет место при трех- и двухфазных КЗ, либо из разностей фазных токов, система которых уравновешена всегда.

Если уровень относительной несимметрии  $\Delta I$ , вычисленный по одному из выражений (1) или (2), равен или превышает соответствующие граничные значения  $\Delta I_{\text{гр}}$ , то междуфазное КЗ является двухфазным, в противном случае – трехфазным.

Оценим основные свойства (1) и (2) при металлических междуфазных КЗ на линии, работающей без нагрузки. Вначале определим  $\Delta I$  при трехфазных  $\Delta I^{(3)}$  и двухфазных  $\Delta I^{(2)}$  КЗ при условии, что  $I_{\max}$  и  $I_{\min}$  вычисляются из уравновешенной системы фазных токов. На основании векторной диаграммы токов для режима трехфазного КЗ [8] полагаем, что  $I_{\max} = I_{\min} = I$ . Из векторной диаграммы токов для режима двухфазного КЗ следует, что  $I_{\max} = I$ , а  $I_{\min} = 0$ . Подставив вместо  $I_{\max}$  и  $I_{\min}$  их значения, получим, что при использовании (1)  $\Delta I^{(3)} = 0$ ;  $\Delta I^{(2)} = 1$ , а в случае определения относительной несимметрии по (2)  $\Delta I^{(3)} = 0$ ;  $\Delta I^{(2)} \rightarrow \infty$ . Из этого следует, что в рассматриваемом применении (2) не может быть использовано для установления режима двухфазного КЗ на линии, работающей без нагрузки, и поэтому большого интереса не представляет.

Основные свойства (1) и (2) при тех же предпосылках, но когда  $I_{\max}$  и  $I_{\min}$  выделяются из разностей фазных токов, будут следующими. Если исходить из векторной диаграммы токов для режима трехфазного КЗ, то  $I_{\max} = I_{\min} = \sqrt{3}I$ . Воспользовавшись векторной диаграммой токов для двухфазного КЗ, получим  $I_{\max} = 2I$ ;  $I_{\min} = I$ . Подставив вместо  $I_{\max}$  и  $I_{\min}$  в (1) и (2) полученные величины, будем иметь, что при использовании (1)  $\Delta I^{(3)} = 0$ ;  $\Delta I^{(2)} = 0,5$ , а в случае применения (2)  $\Delta I^{(3)} = 0$ ;  $\Delta I^{(2)} = 1$ .

Следует отметить, что для установления металлических двухфазных КЗ на линии, работающей без нагрузки, в качестве граничного значения  $\Delta I_{\text{гр}}$  нужно использовать  $\Delta I^{(2)}$ . Для достоверного определения вида КЗ при других условиях, отличных от указанных выше, может потребоваться уточнение величины  $\Delta I_{\text{гр}}$ . Основное влияние на значение  $\Delta I_{\text{гр}}$  будут оказывать токи нагрузки линии и переходное сопротивление в месте повреждения. Необходимость их учета при выборе  $\Delta I_{\text{гр}}$  оценена по результатам вычислительного эксперимента. Для этого с использованием блоков системы Simulink-SimPowerSystems [9, 10] разработана модель фрагмента электрической сети, включающая энергосистему, понижающий трансформатор, две параллельные линии, нагрузку и блок задания КЗ.

На рис. 1 представлены зависимости  $\Delta I = f(I_*)$ , построенные по результатам вычислительного эксперимента, которые позволяют оценить влияние тока нагрузки линии на относительную несимметрию  $\Delta I$  при двухфазных металлических КЗ в различных точках. При этом величина  $\Delta I$  определялась с использованием выражений (1) и (2) по фазным токам, а также по их разностям.

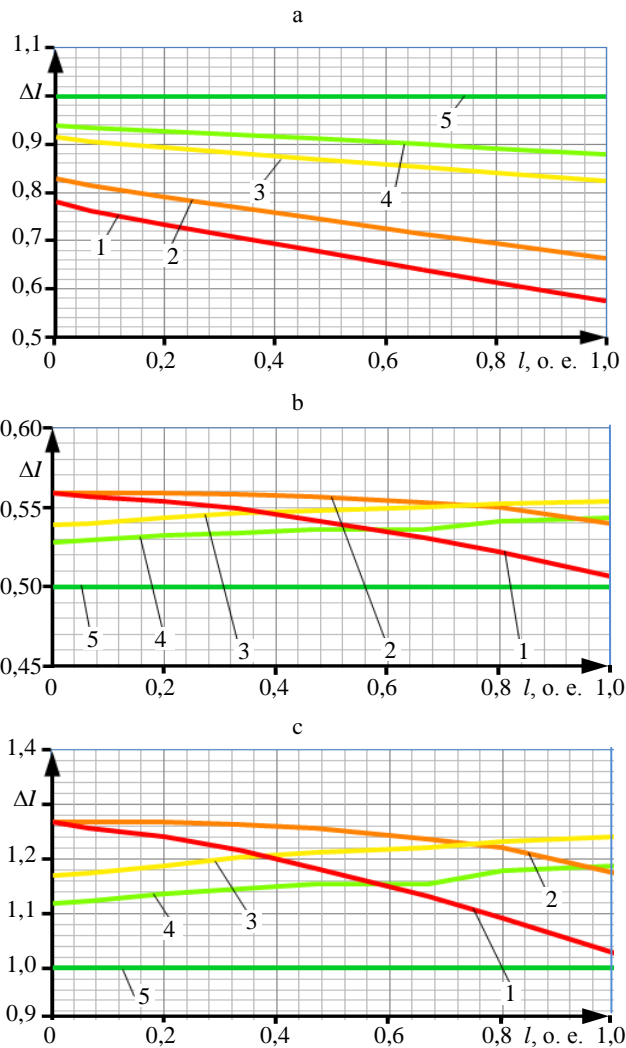


Рис. 1. Влияние тока нагрузки на относительную несимметрию при двухфазных металлических коротких замыканиях на контролируемой линии при определении  $\Delta I$ : а – по (1) с использованием фазных токов: 1, 2, 3, 4 – при минимальной кратности тока короткого замыкания к току нагрузки  $K_{\min} = 2,0; 2,7; 5,4; 8,0$ ; 5 –  $I_H = 0$ ; б – по (1) с использованием разностей фазных токов: 1, 2, 3, 4, 5 – то же, что на рис. 1а; в – по (2) с использованием разностей фазных токов: 1, 2, 3, 4, 5 – то же, что на рис. 1а

Fig. 1. The influence of load current on the relative asymmetry under two-phase metallic short circuits in the monitored line when  $\Delta I$  is being determined:

а – (1) using the phase currents: 1, 2, 3, 4 – when minimum multiplicity of the short circuit current to the load current  $K_{\min} = 2,0; 2,7; 5,4; 8,0$ ; 5 –  $I_H = 0$ ;

б – (1) using differences of phase currents: 1, 2, 3, 4, 5 – the same as in fig. 1а;

в – (2) using differences of phase currents: 1, 2, 3, 4, 5 – the same as in fig. 1а

В качестве параметра, характеризующего уровень тока нагрузки, принята минимальная кратность  $K_{\min}$ , представляющая собой отношение минимального тока металлического двухфазного КЗ  $I_{\text{КЗ}\min}^{(2)}$  при повреждении в конце контролируемой линии, работающей на холостом ходу, к току ее нагрузки  $I_H$ :

$$K_{\min} = \frac{I_{\text{КЗmin}}^{(2)}}{I_{\text{н}}}. \quad (3)$$

Очевидно, что возрастание нагрузки линии обуславливает снижение кратности  $K_{\min}$ , которая всегда больше единицы.

В результате выполненных исследований подтверждено, что при трехфазных металлических КЗ и вычислении относительной несимметрии по выражению (1) или (2) с использованием как фазных токов, так и их разностей нагрузка линии не влияет на величину  $\Delta I^{(3)}$ , которая всегда равна 0.

При металлических двухфазных КЗ на линии, работающей без нагрузки, когда относительная несимметрия определяется по выражению (1) с использованием фазных токов, величина  $\Delta I$  не зависит от места повреждения и равна 1 (рис. 1а, зависимость 5).

Нагрузка линии оказывает существенное влияние на  $\Delta I^{(2)}$ , численное значение которой зависит не только от кратности тока КЗ к току нагрузки, но и от места повреждения (рис. 1а). Как видно из представленных зависимостей, снижение кратности  $K_{\min}$  обуславливает уменьшение  $\Delta I^{(2)}$ . Поэтому для достоверного установления вида КЗ по (1) с использованием фазных токов граничное значение  $\Delta I_{\text{гр}}$  должно приниматься равным  $\Delta I^{(2)}$  при двухфазном металлическом КЗ в конце контролируемой линии ( $l_* = 1$ ) с учетом тока нагрузки в нормальном режиме, предшествующем КЗ. Для этого можно пользоваться полученным в результате выполненных исследований выражением

$$\Delta I_{\text{гр}} = 1 - \frac{I_{\text{н}}}{I_{\text{КЗmin}}^{(2)}}. \quad (4)$$

Таким образом, определение вида междуфазного КЗ с помощью (1) в режиме реального времени с использованием фазных токов требует периодического уточнения величины  $\Delta I_{\text{гр}}$  с учетом текущего значения тока нагрузки линии в нормальном режиме, предшествующем режиму КЗ.

Относительная несимметрия при металлических двухфазных КЗ для ненагруженной линии, определяемая по выражениям (1) и (2) с использованием разности фазных токов, не зависит от места повреждения, а ее численное значение соответственно равно 0,5 и 1,0 (зависимость 5 на рис. 1б, с).

Нагрузка линии не оказывает существенного влияния на  $\Delta I^{(2)}$ . Так, при изменении  $K_{\min}$  от 2 до 8  $\Delta I^{(2)}$  находится в диапазоне 0,50–0,56 при определении по (1) и в диапазоне 1,00–1,28 при вычислении на основе (2) (рис. 1б, с, зависимости 1, 2, 3, 4).

Следует отметить, что при двухфазных КЗ на нагруженной линии  $\Delta I^{(2)}$  не опускается ниже 0,5 в первом случае и ниже 1,0 – во втором. Это дает основание при определении вида междуфазного КЗ с использованием разности фазных токов по выражению (1) принять  $\Delta I_{\text{гр}} = 0,5$ , а по выражению (2)  $\Delta I_{\text{гр}} = 1,0$ .

Наличие переходного сопротивления в месте КЗ оказывает влияние на достоверность определения вида междуфазного повреждения. Соответствующие зависимости, позволяющие определить степень указанного влияния при работе линии без нагрузки, приведены на рис. 2.

Относительная несимметрия  $\Delta I$  не зависит от переходного сопротивления в месте повреждения при двухфазных КЗ в случае ее определения по (1) или (2) с использованием фазных токов или их разностей и соответствует уровням зависимостей 1 на рис. 2а, б, с.

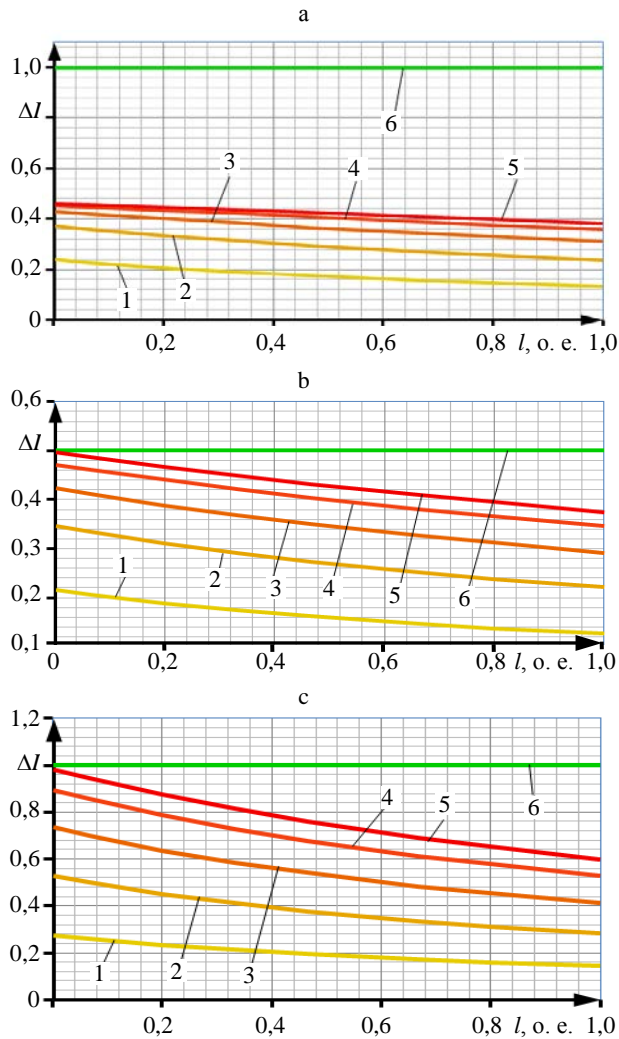


Рис. 2. Влияние переходного сопротивления в месте повреждения на относительную несимметрию при коротком замыкании на контролируемой линии при определении  $\Delta I$ :  
 а – по (1) с использованием фазных токов: 1, 2, 3, 4, 5 – при трехфазных коротких замыканиях с отношением переходного сопротивления к сопротивлению линии  $R_{\Pi}/Z_{\Pi}$  соответственно 0,57; 1,10; 1,70; 2,30; 2,70; 6 – при двухфазном коротком замыкании;  
 б – по (1) с использованием разностей фазных токов: 1, 2, 3, 4, 5, 6 – то же, что на рис. 2а;  
 с – по (2) с использованием разностей фазных токов: 1, 2, 3, 4, 5, 6 – то же, что на рис. 2а

Fig. 2. The influence of transition resistance at the failure site on the relative asymmetry under short-circuit in the monitored line when  $\Delta I$  is being determined:  
 а – (1) using the phase currents: 1, 2, 3, 4, 5 – under the three-phase short-circuits with relation to the transition resistance to the line resistance  $R_{\Pi}/Z_{\Pi}$  correspondingly 0,57; 1,10; 1,70; 2,30; 2,70; 6 – under a two-phase short circuit;  
 б – (1) using differences of phase currents: 1, 2, 3, 4, 5, 6 – the same as in fig. 2а;  
 с – (2) using differences of phase currents: 1, 2, 3, 4, 5, 6 – the same as in fig. 2а

При трехфазных КЗ численные значения  $\Delta I^{(3)}$  зависят как от места повреждения, так и от отношения переходного сопротивления  $R_{\text{п}}$  к сопротивлению линии  $Z_{\text{л}}$ . Для всех рассматриваемых случаев характерно увеличение  $\Delta I^{(3)}$  с ростом отношения  $R_{\text{п}}/Z_{\text{л}}$ . Это означает, что при трехфазных КЗ через переходное сопротивление текущие значения  $\Delta I^{(3)}$  имеют тенденцию стремиться к их уровням при двухфазных КЗ тем ближе, чем больше отношение  $R_{\text{п}}/Z_{\text{л}}$ . Если при этом текущее значение  $\Delta I^{(3)}$  сравняется или превысит  $\Delta I_{\text{гр}}$ , то трехфазное КЗ через переходное сопротивление будет квалифицировано как двухфазное КЗ. С целью исключения подобного необходимо критически подходить к выбору  $\Delta I_{\text{гр}}$ , расширяя зону возможных величин  $\Delta I^{(3)}$ , в которой трехфазные КЗ через переходное сопротивление не будут квалифицироваться как двухфазные.

Для случаев, показанных на рис. 2б, с, пределом возможного являются граничные значения относительной несимметрии  $\Delta I_{\text{гр}} = 0,5$  и  $\Delta I_{\text{гр}} = 1,0$  соответственно. При определении относительной несимметрии по выражению (1) с использованием фазных токов для расширения рассматриваемой зоны необходимо устанавливать предельные значения  $\Delta I_{\text{гр}}$ , периодически их корректируя с учетом текущего тока нагрузки линии.

Выбор значений  $\Delta I_{\text{гр}}$ , позволяющих с приемлемой достоверностью определять вид междуфазного КЗ с учетом совместного влияния на относительную несимметрию тока нагрузки линии и переходного сопротивления в месте повреждения, можно производить на основе наложения описанных выше результатов от раздельного воздействия указанных факторов.

Предложенные методы определения вида междуфазного КЗ по относительной несимметрии токов отличаются рядом особенностей при одновременных повреждениях на разных линиях распределительной сети. При этом неоднозначно различимыми с точки зрения вида являются одновременные КЗ на контролируемой и одной из параллельных линий, присоединенных к общим шинам.

В результате выполненных исследований определено, что при любых удаленных КЗ на параллельных линиях предложенные методы обеспечивают достоверное установление вида повреждения, одновременно возникающего на контролируемой линии. При наложении повреждений, одно из которых находится на одной из параллельных линий вблизи общих шин, а второе – на контролируемой линии, определенный любым из предложенных методов вид КЗ может отличаться от фактического. Это будет зависеть от видов возникших повреждений, сочетаний замкнувшихся фаз, установившегося токораспределения в сети и других факторов. Данную особенность следует принимать во внимание при оценке поведения защит линий распределительной сети.

Динамические характеристики  $\Delta I = f(t)$  предложенных методов установления вида повреждения в различных режимах, позволяющие оценить их быстродействие, представлены на рис. 3. Указанный параметр характеризуется отрезком времени от момента возникновения КЗ до момента достижения  $\Delta I$  соответствующего граничного значения с погрешностью,



не превышающей  $\pm 5\%$ . Анализ представленных зависимостей  $\Delta I = f(t)$  показывает, что предложенные методы позволяют определять вид междуфазного КЗ в наихудшем случае за время, не превышающее периода промышленной частоты. При этом следует иметь в виду, что в переходных режимах трехфазные КЗ могут кратковременно квалифицироваться как двухфазные.

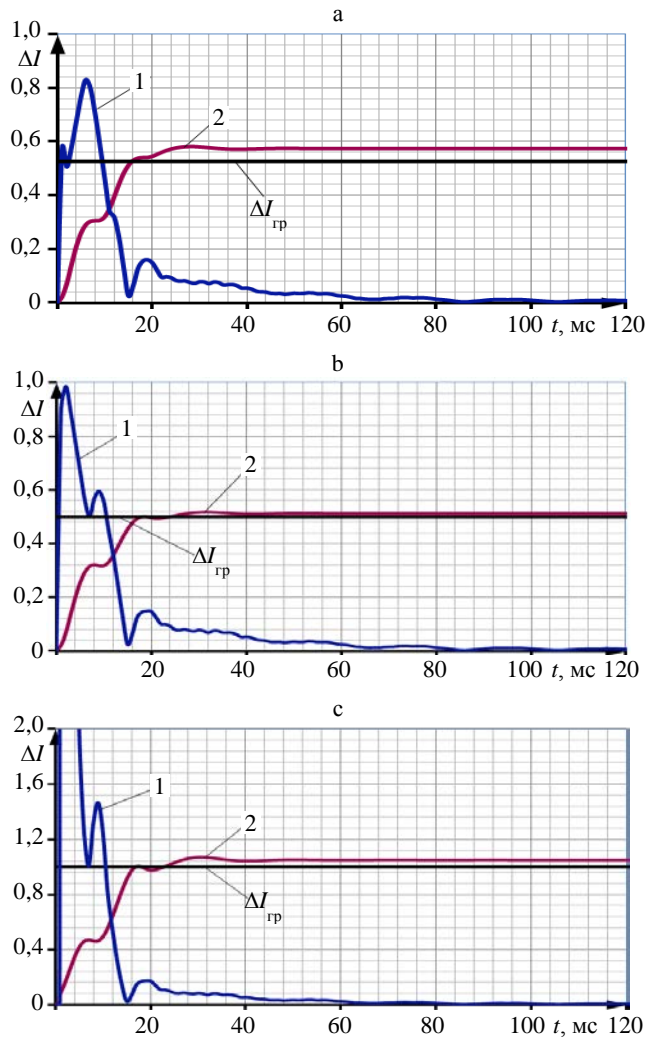


Рис. 3. Динамические характеристики методов установления вида повреждения при определении  $\Delta I$ : а – по (1) с использованием фазных токов:

1, 2 – при трех- и двухфазном коротком замыкании соответственно;

б – по (1) с использованием разностей фазных токов: 1, 2 – то же, что на рис. 2а;

с – по (2) с использованием разностей фазных токов: 1, 2 – то же, что на рис. 2а

Fig. 3. The dynamic characteristics of methods for determining the kind of failure while determining  $\Delta I$ : а – by (1) using the phase currents:

1, 2 – for three- and two-phase short circuit, respectively;

б – (1) using differences of phase currents: 1, 2 – the same as in fig. 2a;

с – (2) using differences of phase currents: 1, 2 – the same as in fig. 2a

В результате проведенных исследований установлено, что достоверное определение вида междуфазного КЗ обеспечивается с помощью (1) с использованием фазных токов и с помощью (1) и (2) с использованием разностей указанных токов при  $K_{\min} \geq 1,5$  и  $K_{\min} \geq 2,0$  соответственно. Вследствие этого при определении вида междуфазного КЗ по (1) и (2) в реальном времени требуется периодическое уточнение  $K_{\min}$  с учетом фактической нагрузки линии с целью нахождения ее режима в пределах работоспособности используемого метода.

### ВЫВОДЫ

1. Определение вида междуфазного короткого замыкания на линиях 6–35 кВ может быть реализовано как на основе оценки относительной несимметрии фазных токов, так и их разностей.

2. При использовании фазных токов обеспечивается более высокая чувствительность к удаленным двухфазным коротким замыканиям. Однако в этом случае на достоверность определения вида повреждения в большей степени влияют токи нагрузки линии.

3. Определение относительной несимметрии с использованием разностей фазных токов отличается меньшей чувствительностью к удаленным двухфазным коротким замыканиям. Вместе с тем при этом обеспечивается меньшее влияние на достоверность определения вида повреждения токов нагрузки линии.

4. Переходное сопротивление в месте повреждения обуславливает смещение уровня относительной несимметрии токов к области двухфазных коротких замыканий.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Федосеев, А. М. Релейная защита электроэнергетических систем / А. М. Федосеев. М.: Энергоатомиздат, 1984. 520 с.
2. Чернобровов, Н. В. Релейная защита энергетических систем / Н. В. Чернобровов, В. А. Семенов. М.: Энергоатомиздат, 1998. 800 с.
3. Романюк, Ф. А. Принципы выполнения адаптивной микропроцессорной токовой защиты от междуфазных коротких замыканий / Ф. А. Романюк, А. А. Тишечкин, А. В. Ковалевский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2005. № 2. С. 11–14.
4. Гимоян, Г. Г. Релейная защита горных электроустановок / Г. Г. Гимоян. М.: Недра, 1978. С. 349.
5. Перспективные технологии реализации микропроцессорных защит линий распределительных сетей / Ф. А. Романюк [и др.] // Перспективные материалы и технологии: в 2 т. / под ред. В. В. Клубовича. Витебск: Витебский государственный технологический университет, 2015. Т. 1. С. 115–139.
6. Ковалевский, 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. 37–42.

7. Романюк, Ф. А. Определение вида повреждения на линиях распределительных сетей в объеме функций микропроцессорных токовых защит / Ф. А. Романюк, А. А. Тишечкин, Е. В. Булойчик // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2011. № 4. С. 5–10.
8. Федосеев, А. М. Релейная защита электроэнергетических систем / А. М. Федосеев, М. А. Федосеев. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1992. 528 с.
9. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. М.: ДМК-Пресс, 2011. 288 с.
10. Дьяконов, В. П. MatLab и Simulink для радиоинженеров / В. П. Дьяконов. М.: ДМК-Пресс, 2011. 975 с.

Поступила 21.10.2016 Подписана в печать 26.12.2016 Опубликована онлайн 31.01.2017

#### REFERENCES

1. Fedoseyev A. M. (1984) *Relay Protection of Electric Power Grids*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 520 (in Russian).
2. Chernobrovov N. V., Semyonov V. A. (1998) *Relay Protection of Power Grids*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 800 (in Russian).
3. Romaniuk F. A., Tishechkine A. A., Kovalevsky A. V. Principles for Execution of Adaptive Microprocessor Current Protection against Inter-Phase Short-Circuits. *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*. 2005, (2), 11–14 (in Russian).
4. Gimoyan G. G. (1978) *Relay Protection of Mining Electrical Installations*. Moscow, Nedra Publ., 349 (in Russian).
5. Romaniuk F. A., Novash I. V., Rumiantsev V. Iu., Rumiantsev Iu. V. (2015) Prospective Implementation Technologies of Microprocessor-Based Line Protection of Distribution Grids. V. V. Klubovich (ed.) *Advanced Materials and Technologies. Vol. 1*. Vitebsk, Vitebsk State Technological University, 115–139 (in Russian).
6. Kovalevsky A. V. (2007) Selection of Numerical Criterion Value for Determination of Short Circuit Type in Adaptive Micro-Processing Current Protection of Electric Power Lines. *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (5), 37–42 (in Russian).
7. Romaniuk F. A., Tishechkin A. A., Bulochyk E. V. (2011) Fault Type Determination on Distribution Networks Lines within Functions of Microprocessor Current Protections. *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (4), 5–10 (in Russian).
8. Fedoseyev A. M., Fedoseyev M. A. (1992) *Relay Protection of Electric Power Grids*. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Energoatomizdat Pub. 528 (in Russian).
9. Chernykh I. V. (2011) *Simulation of Electrical Devices in MatLab, SimPowerSystems and Simulink*. Moscow, DMK Press. 288 (in Russian).
10. Dyakonov V. P. (2011) *MatLab and Simulink for Radio Engineers*. Moscow, DMK Press. 975 (in Russian).

Received: 21 October 2016 Accepted: 26 December 2016 Published online: 31 January 2017