

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-6-497-504

УДК 621.316.925

## Определение вида повреждения в токовых защитах линий электропередачи 6–35 кВ

Ф. А. Романюк<sup>1)</sup>, Е. В. Булойчик<sup>1)</sup>, О. А. Гурьянчик<sup>1)</sup>, М. А. Шевалдин<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 выявления вида междуфазных коротких замыканий, которые могут быть использованы для улучшения показателей технического совершенства ступенчатых токовых защит линий распределительных сетей 6–35 кВ. Оценив целесообразность их применения в токовых защитах, выбор был сделан в пользу способа, основанного на контроле относительной несимметрии токов. Методом вычислительного эксперимента исследовано влияние переходных сопротивлений и нагрузочных токов различного уровня на величину и характер изменения относительной несимметрии при учете погрешностей измерительных трансформаторов тока. Показано, что во многих случаях дуговых коротких замыканий на нагруженной линии и в режиме холостого хода контроля одной несимметрии недостаточно для достоверного определения вида повреждения. Предложен более совершенный алгоритм определения вида междуфазного короткого замыкания, основанный на контроле и анализе двух относительных несимметрий токов, определяемых по действующим значениям разностей фазных токов линии. Выполнена оценка его работоспособности. Установлено, что во всех рассматриваемых режимах предложенный метод при правильно подобранных граничных условиях позволяет достоверно фиксировать трех- и двухфазные короткие замыкания как на защищаемой линии, так и в зоне дальнего резервирования. Исследованы динамические свойства предложенного метода для различных режимов работы линии. Установлено, что в наихудшем случае обеспечивается определение вида повреждения за время, не превышающее 25 мс.

**Ключевые слова:** линия электропередачи, токовая защита, техническое совершенство, относительная несимметрия, вид короткого замыкания, переходное сопротивление, быстрое действие

**Для цитирования:** Определение вида повреждения в токовых защитах линий электропередачи 6–35 кВ / Ф. А. Романюк [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60, № 6. С. 497–504. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-6-497-504

## Determining a Type of a Damage in the Current Protection of Power Lines of 6–35 kV

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

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

**Abstract.** The methods to identify types of phase-to-phase short circuits that can be used to improve technical excellence by speed-current line protection of distribution networks of 6–35 kV are considered. As a result of the assessment of the appropriateness of their application in current

---

### 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

---

protection, the choice was made in favor of the method based on the control of the relative current unbalance. The influence of contact resistances and load currents of various levels on the magnitude and character of the change of relative unbalance taking into account the errors of measuring transformers of current has been studied with the aid of the method of numerical experiment. It is demonstrated that in a lot of cases of arch short circuits in the loaded power line and in idle mode, the control only asymmetry is insufficient for reliable determination of the type of damage. A better algorithm has been proposed for determining phase-to-phase short circuit based on the control and the analysis of the two relative unbalance currents determined by the current values of the differences of the phase currents of the line. Its serviceability was evaluated. It was found out that in all the modes being considered, the proposed method – when boundary conditions are properly chosen – makes it possible to fix three-phase and two-phase short circuit on the protected line, and in the area of remote redundancy. The dynamic properties of the proposed method are investigated for different modes of the line. It is established that in the worst case, the determining of the damage is provided during the time not exceeding 25 ms.

**Keywords:** power line, current protection, technical excellence, relative unbalance, type of short circuit, contact resistance, performance

**For citation:** Romaniuk F. A., Bulochik E. V., Huryanchyk O. A., Shevaldin M. A. (2017) Determining a Type of a Damage in the Current Protection of Power Lines of 6–35 kV. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (6), 497–504. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-6-497-504 (in Russian)

### Введение

В распределительных сетях 6–35 кВ для защиты линий электропередачи от междуфазных коротких замыканий (КЗ) преимущественно применяются ступенчатые защиты, основанные на токовом принципе [1, 2]. Характерный признак возникновения короткого замыкания – резкое и значительное увеличение тока в элементах электрической сети между точкой повреждения и источником питания. Таким образом, входной воздействующей величиной указанных защит является ток контролируемой линии, а действие на отключение обеспечивается по факту превышения им установленного тока срабатывания. Методика выбора параметров срабатывания ступеней защиты [3, 4] предполагает отстройку от максимальных токов в наиболее тяжелых условиях работы защищаемой линии, в качестве которых рассматриваются трехфазные КЗ и симметричные нагрузочные режимы. Поэтому во многих случаях двухфазных повреждений показатели технического совершенства существующих токовых защит обычного исполнения могут не удовлетворять требуемым значениям.

Улучшить показатели технического совершенства токовых защит линий возможно путем реализации предложенного в [5] адаптивного принципа, суть которого заключается в выявлении вида возникшего междуфазного КЗ и выборе соответствующих режиму токов срабатывания ступеней защиты.

Для определения вида междуфазных повреждений на линиях 6–35 кВ могут быть использованы способы на основе контроля и анализа:

- относительной несимметрии токов фаз либо разностей фазных токов линии [6, 7];
- симметричных составляющих в токах фаз линии [8].

Наиболее целесообразным для реализации в токовых защитах линий представляется первый способ как более простой и не требующий использования частотозависимых элементов.

### Определение вида междуфазного короткого замыкания

Принципы определения вида междуфазного КЗ по относительной несимметрии токов изложены в [7]. Однако анализ их работоспособности выполнен в режимах повреждений, когда в качестве информационных величин используются значения первичных токов линии. Входными величинами защиты являются вторичные токи. В этом случае на достоверность определения вида КЗ проявляется влияние погрешностей трансформаторов тока, которые могут быть существенными в режимах насыщения или близких к ним. При этом иначе могут восприниматься нагрузочные токи и переходные сопротивления в месте повреждения.

С учетом этого в статье предложен более совершенный алгоритм определения вида междуфазного КЗ, основанный на контроле и анализе нескольких несимметрий токов.

Уровень относительной несимметрии токов линии  $\Delta I_1$  определяется по следующему выражению согласно [7, 9, 10]:

$$\Delta I_1 = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\min}}, \quad (1)$$

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

Согласно [7], при металлических коротких замыканиях на ненагруженной линии, исходя из векторных диаграмм токов для выражения (1), справедливо следующее: относительная несимметрия  $\Delta I_1 = 0$  – при трехфазных КЗ;  $\Delta I_1 = 1$  о. е. – при двухфазных КЗ. Предварительно пороговое значение относительного уровня несимметрии  $\Delta I_{1,п}$ , при равенстве или превышении которого фиксируется двухфазное КЗ, может быть принято  $\Delta I_{1,п} = 1$  о. е. Однако указанный критерий требует уточнения, так как в нагрузочном режиме при наличии переходных сопротивлений в месте повреждения и с учетом погрешностей трансформаторов тока уровень  $\Delta I_1$  может отклоняться от приведенных значений, вследствие чего вид повреждения может быть установлен неверно.

Для достоверного определения вида КЗ предлагается рассчитывать второе значение относительной несимметрии  $\Delta I_2$  по выражению

$$\Delta I_2 = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\text{mid}} - I_{\min}}, \quad (2)$$

где  $I_{\text{mid}}$  – среднее действующее значение из разностей токов фаз линии.

Исследование работоспособности предложенного алгоритма проводилось методом вычислительного эксперимента на базе программного комплекса, воспроизводящего математическую модель узла распределительной сети 6–35 кВ с односторонним питанием [11, 12]. Используемая модель включает в себя измерительные трансформаторы тока, что позволило учесть влияние их погрешностей на достоверность определения вида повреждения. Зависимости  $\Delta I_1 = f(l_*)$  и  $\Delta I_2 = f(l_*)$  для случаев трех- и двухфазного КЗ, полученные по результатам вычислительного эксперимента, представлены на рис. 1, 2. При этом если  $l_* \leq 1$  о. е., то местом повреждения является контролируемая линия, а если  $l_* > 1$  о. е. – смежная.

При трехфазных металлических КЗ, независимо от величины нагрузки, уровень относительной несимметрии  $\Delta I_1$  близок к 0 (рис. 1а, зависимости 1 и 5) и вид повреждения фиксируется достоверно. Наличие переходного сопротивления в месте короткого замыкания приводит к значительному увеличению относительной несимметрии  $\Delta I_1$ , значение которой может попадать в область двухфазных КЗ ( $\Delta I_1 \geq 1$  о. е.). Особенно сильно влияние переходных сопротивлений проявляется в режиме холостого хода, а с ростом нагрузочных токов  $\Delta I_1$  имеет тенденцию к снижению (рис. 1а, зависимости 2–4, 6–8).

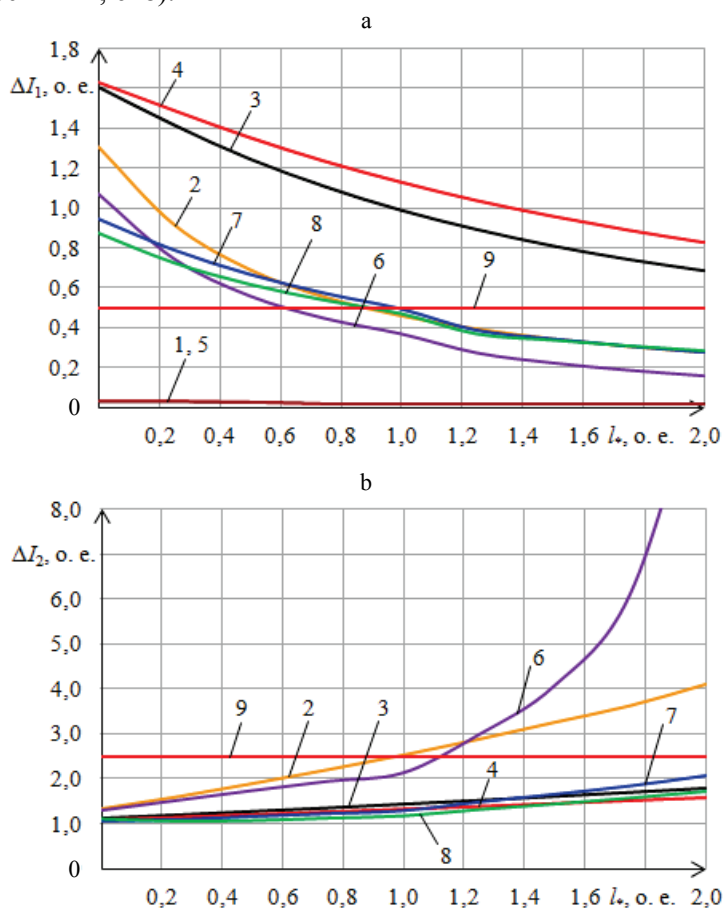


Рис. 1. Относительная несимметрия токов фаз  $\Delta I_1$  (а) и  $\Delta I_2$  (б) при трехфазных коротких замыканиях на контролируемой и смежной линиях в режимах холостого хода (1–4) и максимальной нагрузки (5–8): 1; 5 – металлические короткие замыкания; 2 и 6; 3 и 7; 4 и 8 – короткие замыкания через переходное сопротивление с  $R_d = 5; 15; 20$  Ом соответственно; 9 – принятое пороговое значение относительной несимметрии

Fig. 1. The relative unbalance of phase currents of  $\Delta I_1$  (a) and  $\Delta I_2$  (b) when the three-phase short circuits in a controlled and a related lines take place in idle mode (1–4) and maximum load mode (5–8): 1; 5 – metallic short circuit; 2 and 6; 3 and 7; 4 and 8 – short circuit via contact resistance with  $R_d = 5; 15; 20 \Omega$ , respectively; 9 – adopted threshold value of the relative unbalance

При двухфазных коротких замыканиях на ненагруженной линии, независимо от уровней переходных сопротивлений в месте повреждения, относительная несимметрия  $\Delta I_1 = 1,0$  о. е. (рис. 2а, зависимости 1–4). При металлических двухфазных КЗ на участке  $l_* \leq 1,76$  о. е. в нагрузочном режиме уровень относительной несимметрии  $\Delta I_1 \geq 1,0$  о. е. и находится в диапазоне 1,000–1,135 о. е. При удаленных КЗ (участок  $l_* > 1,76$  о. е.)  $\Delta I_1 < 1,0$  о. е. и снижается до 0,96 о. е. в конце смежной линии (рис. 2а, зависимость 5). При наличии переходных сопротивлений в месте повреждения уровни  $\Delta I_1$  опускаются ниже 1,0 о. е., попадая в область трехфазных КЗ (рис. 2а, зависимости 6–8).

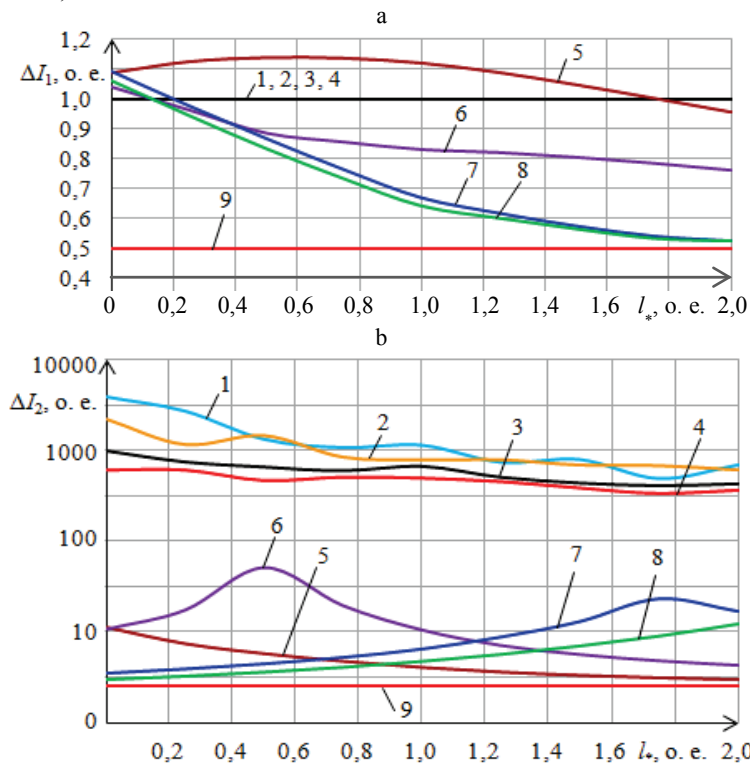


Рис. 2. Относительная несимметрия токов фаз  $\Delta I_1$  (а) и  $\Delta I_2$  (б) при двухфазных коротких замыканиях на контролируемой и смежной линиях в режимах холостого хода (1–4) и максимальной нагрузки (5–8): 1; 5 – металлические короткие замыкания; 2 и 6; 3 и 7; 4 и 8 – короткие замыкания через переходное сопротивление с  $R_d = 5; 15; 20$  Ом соответственно; 9 – принятое пороговое значение относительной несимметрии

Fig. 2. The relative unbalance of phase currents of  $\Delta I_1$  (a) and  $\Delta I_2$  (b) when the two-phase short circuits in a controlled and a related lines take place in idle mode (1–4) and maximum load mode (5–8): 1; 5 – metallic short circuit; 2 and 6; 3 and 7; 4 and 8 – short circuit via contact resistance with  $R_d = 5; 15; 20 \Omega$ , respectively; 9 – adopted threshold value of the relative unbalance

Очевидно, что для достоверного установления вида КЗ во всех режимах работы линии недостаточно контролировать только  $\Delta I_1$ . Добиться этого позволяет сочетание двух относительных несимметрий  $\Delta I_1$  и  $\Delta I_2$  при соответствующем выборе их пороговых значений.

Относительная несимметрия  $\Delta I_2$  при двухфазных КЗ и переходных сопротивлениях различного уровня при наличии нагрузки не опускается ниже значения  $\Delta I_2 = 2,5$  о. е., а в режиме холостого хода значительно превышает его. Для четкого установления вида повреждения по результатам вычислительного эксперимента были приняты пороговые значения  $\Delta I_{1,н} = 0,5$  о. е. и  $\Delta I_{2,н} = 2,5$  о. е. При этом если  $\Delta I_1 < 0,5$  о. е. или  $\Delta I_1 \geq 0,5$  о. е. и  $\Delta I_2 < 2,5$  о. е., то КЗ считается трехфазным, при  $\Delta I_1 \geq 0,5$  о. е. и  $\Delta I_2 \geq 2,5$  о. е. – двухфазным. Покажем, что принятые граничные условия обеспечивают достоверное определение вида повреждения.

При металлических трехфазных КЗ, независимо от величины нагрузки линии,  $\Delta I_1 \approx 0$  (рис. 1а, зависимости 1; 5). При малых переходных сопротивлениях и близких КЗ параметр  $\Delta I_1$  может превышать пороговое значение 0,5 о. е., а при удаленных  $\Delta I_2$  может быть больше 2,5 о. е. Однако благодаря выбранным пороговым критериям зоны, когда  $\Delta I_1 \geq 0,5$  о. е. и  $\Delta I_2 \geq 2,5$  о. е., не пересекаются, и симметричное повреждение в любой точке сети будет квалифицироваться как трехфазное. Так, для случая с  $R_d = 5$  Ом при КЗ на ненагруженной линии в пределах  $l_* \leq 0,88$  о. е. уровень  $\Delta I_1 \geq 0,5$  о. е., но при этом  $\Delta I_2 < 2,5$  о. е. на участке линии  $l_* \leq 0,97$  о. е. (рис. 1а, b, зависимость 2). В нагрузочном режиме  $\Delta I_1 \geq 0,5$  о. е. при повреждении в пределах  $l_* \leq 0,62$  о. е., а  $\Delta I_2 < 2,5$  о. е. на участке  $l_* \leq 1,12$  о. е. (рис. 1а, b, зависимость 6). При больших переходных сопротивлениях  $\Delta I_2 < 2,5$  о. е. в пределах всей защищаемой зоны (рис. 1б, зависимости 3; 4; 7; 8). Следовательно, во всех рассматриваемых режимах трехфазные короткие замыкания фиксируются достоверно.

Анализ представленных на рис. 2а, б зависимостей показывает, что двухфазные короткие замыкания в пределах всей защищаемой зоны во всех рассматриваемых режимах, независимо от уровней переходных сопротивлений и нагрузочных токов, будут фиксироваться достоверно, так как выполняются условия  $\Delta I_1 \geq 0,5$  о. е. и  $\Delta I_2 \geq 2,5$  о. е.

Оценить быстродействие предложенного метода определения вида повреждения позволяют представленные на рис. 3 динамические характеристики, которые для наглядности имеют дискретный вид. Если уровни  $\Delta I_1$  и  $\Delta I_2$  соответствуют симметричным повреждениям, то признак вида КЗ принимает значение  $K = 3$ , в обратном случае  $K = 2$ . На основании результатов проведенных исследований, а также ввиду того что трехфазные КЗ в первую очередь фиксируются по уровню  $\Delta I_1$ , а для двухфазных в обязательном порядке контролируется  $\Delta I_2$ , критериями, определяющими быстродействие метода, являются:  $\Delta I_1$  – при симметричных повреждениях;  $\Delta I_2$  – при несимметричных.

Динамические характеристики построены для наихудшего режима, когда быстродействие метода минимально: нагрузочный режим для двухфазного и режим холостого хода для трехфазного КЗ. Их анализ показывает, что предложенный метод позволяет определить вид повреждения при КЗ в начале контролируемой и в конце смежной линий за время, не превышающее 25 мс. При КЗ в конце защищаемой линии указанное время не превышает периода промышленной частоты и составляет 18 мс.

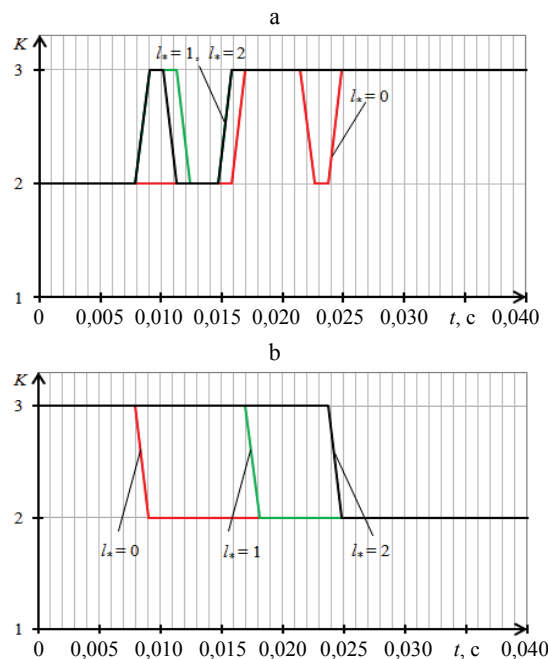


Рис. 3. Динамические характеристики алгоритма определения вида повреждения при трехфазных (а) и двухфазных (б) коротких замыканиях в наихудшем режиме:

$K$  – признак вида короткого замыкания;

$K = 3, K = 2$  – трех- и двухфазное короткое замыкание соответственно

Fig. 3. The dynamic characteristics of the algorithm for determining the type of damage in three-phase (a) and two-phase (b) short circuits in the worst mode:  $K$  – type characteristic of short circuit;

$K = 3, K = 2$ , three-phase and two-phase short circuits, respectively

### ВЫВОДЫ

1. Достоверное определение вида короткого замыкания при учете влияния погрешностей трансформаторов тока, переходных сопротивлений и токов нагрузки может быть обеспечено на основе оценки нескольких относительных несимметрий токов.

2. Предложенный метод на основе контроля двух несимметрий позволяет правильно выявить трех- и двухфазные короткие замыкания на защищаемой и смежной линиях во всех возможных режимах повреждений.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Федосеев, А. М. Релейная защита электроэнергетических систем / А. М. Федосеев, М. А. Федосеев. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1992. 528 с.
2. Басс, Э. И. Релейная защита электроэнергетических систем / Э. И. Басс, В. Г. Дорогунцев; под ред. А. Ф. Дьякова. М.: Изд-во МЭИ, 2002. 296 с.
3. Шабад, М. А. Максимальная токовая защита / М. А. Шабад. Л.: Энергоатомиздат, 1991. 96 с. (Библиотека электромонтера. Вып. 640).
4. Шабад, М. А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей / М. А. Шабад. 5-е изд., испр. и доп. СПб.: ПЭИПК, 2012. 350 с.
5. Романюк, Ф. А. Принципы выполнения адаптивной микропроцессорной защиты от междофазных 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.
6. Перспективные технологии реализации микропроцессорных защит линий распределительных сетей / Ф. А. Романюк [и др.] // Перспективные материалы и технологии: в 2 т. / Витебский гос. технолог. ун-т; под ред. В. В. Клубовича. Витебск, 2015. Т. 1. С. 115–139.

7. 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. № 1. С. 5–15. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-1-5-15.
8. Гимоян, Г. Г. Релейная защита горных электроустановок / Г. Г. Гимоян. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1978. 349 с.
9. 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.
10. Romaniuk, F. Ocena Porównawcza Metod Lokalizacji Zwarć Niesymetrycznych w Sieciach Rozdzielczych / F. Romaniuk, E. Buloichyk, P. Węgierek // Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review). 2012. R. 88, NR 7a. P. 319–320.
11. Новаш, И. В. Математическое моделирование коммутационных режимов в электроустановках с трансформаторами / И. В. Новаш, Ф. А. Романюк. Минск: БНТУ, 2013. 225 с.
12. Романюк, Ф. А. Информационное обеспечение вычислительного эксперимента в релейной защите и автоматике энергосистем / Ф. А. Романюк, В. И. Новаш. Минск: ВУЗ-ЮНИТИ, 1998. 174 с.

Поступила 08.08.2017 Подписана в печать 16.10.2017 Опубликована онлайн 28.11.2017

#### REFERENCES

1. Fedoseev A. M. (1992) *Relay Protection of Electric Power Systems*. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Energoatomizdat Publ. 528 (in Russian).
2. Bass E. I., Doroguntsev V. G., D'yakov A. F. (ed.) (2002) *Relay Protection of Electric Power Systems*. Moscow, MEI Publ. 296 (in Russian).
3. Shabad M. A. (1991) *Overcurrent Protection. Library of Electrician, Issue 640*. Leningrad, Energoatomizdat Publ. 96 (in Russian).
4. Shabad M. A. (2012) *Calculations of Relay Protection and Automation of Distribution Networks*. 5<sup>th</sup> ed. St.-P., Petersburg Power Engineering Institute for Advanced Studies Ministry of Energy of the Russian Federation, 350 p. (in Russian).
5. Romaniuk F. A., Tishechkin A. A., Kovalevsky A. V. (2005) Principles for Execution of Adaptive Microprocessor Current Protection against Inter-Phase Short-Circuits. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (2), 11–14 (in Russian).
6. Romaniuk F. A., Novash I. V., Rumiantsev V. Iu., Rumiantsev Iu. V., Klubovich V. V. (ed.) (2015) Prospective Implementation Technologies of Microprocessor-Based Line Protection of Distribution Grids. *Advanced Materials and Technologies*. Vol. 1. Vitebsk, Vitebsk State Technological University, 115–139 (in Russian).
7. Romaniuk F. A., Huryanichy 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 kW. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (1), 5–15 (in Russian). DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-1-5-15.
8. Gimoyan G. G. (1978) *Relay Protection of Mining Electrical Installations*. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Nedra Publ. 349 (in Russian).
9. Romaniuk F. A., Tishechkin A. A., Buloichik E. V. (2011) Determination of Damages on the Lines of the Distribution Grids in the Scope of Functions of the Microprocessor Current Protections. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (4), 5–10 (in Russian).
10. Romaniuk F., Buloichyk E., Węgierek P. (2012) Ocena Porównawcza Metod Lokalizacji Zwarć Niesymetrycznych w Sieciach Rozdzielczych [Comparative Estimation of Methods of Asymmetrical Fault Determination on Distribution Networks Lines]. *Przegląd Elektrotechniczny [Electrical Review]*, 88 (7a), 319–320 (in Poland).
11. Novash V. I., Romaniuk F. A. (2013) *Mathematical Modeling of Switching Modes in Electrical Systems with Transformers*. Minsk, BNTU. 225 (in Russian).
12. Romaniuk F. A., Novash V. I. (1998) *Information Support of Computing Experiment in Relay Protection and Automation of Power Systems*. Minsk, VUZ-YuNITI Publ. 174 (in Russian).

Received: 8 August 2017 Accepted: 16 October 2017 Published online: 28 November 2017