

DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-5-14

УДК 621.316.925

Повышение достоверности определения зоны короткого замыкания на линиях 6–35 кВ

Ф. А. Романюк¹⁾, Е. В. Булойчик¹⁾, О. А. Гурьянчик¹⁾, В. С. Каченя¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. В работе представлен способ повышения достоверности определения зоны короткого замыкания в токовых ступенчатых защитах линий 6–35 кВ с односторонним питанием с целью улучшения показателей их технического совершенства. Учитывая относительную простоту токовой защиты, наиболее целесообразным для реализации в алгоритме ее функционирования из существующих методов определения места повреждения представляется односторонний дистанционный метод по параметрам аварийного режима с учетом вида повреждения. Отмечены основные факторы, влияющие на достоверность определения зоны короткого замыкания на основе дистанционного метода. Методом вычислительного эксперимента исследовано влияние нагрузочных токов и переходных сопротивлений различного уровня на величину и характер изменения погрешностей определения расчетной удаленности места повреждения от места установки защиты при учете погрешностей измерительных трансформаторов. Показано, что во многих случаях дуговых коротких замыканий на нагруженной линии для определения зоны короткого замыкания с удовлетворительными погрешностями необходима коррекция расчетного расстояния до места повреждения, вычисленного по параметрам поврежденной петли (петель). По результатам вычислительного эксперимента получены корректирующие выражения на основе двух относительных несимметрий токов, определяемых по действующим значениям разностей фазных токов линии для выявления вида короткого замыкания. Выполнена оценка работоспособности предложенного способа. Показано, что применение этого способа коррекции позволяет повысить достоверность определения зоны повреждения. Исследованы динамические свойства предложенного метода для различных режимов работы линии. Установлено, что в наихудшем случае обеспечивается определение зоны повреждения за время, не превышающее 26 мс.

Ключевые слова: линия электропередачи, токовая защита, техническое совершенство, относительная несимметрия, зона короткого замыкания, переходное сопротивление, быстрдействие

Для цитирования: Повышение достоверности определения зоны короткого замыкания на линиях 6–35 кВ / Ф. А. Романюк [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 1. С. 5–14. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-5-14

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 Reliability of Determining the Short Circuit Zone of the Lines of 6–35 kV

F. A. Romaniuk¹⁾, E. V. Bulochyk¹⁾, O. A. Huryanchyk¹⁾, V. S. Kachenya¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. A method of increasing the reliability of determining the zone of short-circuit at the current step protection of the lines of 6–35 kV with unilateral power, aimed at improvement of their technical perfection, is presented in the paper. Having taken the relative simpleness of the current protection into account the authors consider the unilateral remote method of accounting the parameters of the emergency mode and the type of fault to be the most suitable for the implementation of the algorithm of its functioning as compared with the existing methods of fault location. The major factors affecting the accuracy of determining the short circuit zone based on the remote method are noted. With the use of the method of computational experiment the influence of the load currents and contact resistances of various levels on the magnitude and character of changes of errors of determination of the calculated distance of the point of fault from the protection installation location taking into account the errors of measuring transformers. It is demonstrated that in many cases of arc short circuit in a loaded line in order to define the zone of short-circuit with fair accuracy correction of the estimated distance to the fault as calculated by the parameters of the damaged loop (loops) is required. According to the results of numerical experiments corrective expressions on the basis of two relative asymmetry currents determined by the current values of the differences of the phase currents of the line for detecting a type of a short circuit have been obtained. The assessment of the efficiency of the proposed method has been performed. It is shown that the application of the proposed correction method makes it possible to increase the accuracy of fault zone detection. The dynamic properties of the proposed method applied to different modes of the line functioning have been studied. It is determined that in the worst case the definition of the fault zone for a maximum duration of 26 μ sec is provided.

Keywords: power line, current protection, technical excellence, relative asymmetry, short-circuit area, contact resistance, operation speed

For citation: Romaniuk F. A., Bulochyk E. V., Huryanchyk O. A., Kachenya V. S. (2018) The Reliability of Determining the Short Circuit Zone of the Lines of 6–35 kV. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (1), 5–14. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-5-14 (in Russian)

Введение

Для защиты линий электропередачи 6–35 кВ с односторонним питанием от междуфазных коротких замыканий (КЗ) преимущественно используются ступенчатые токовые защиты. Зона действия быстродействующей ступени таких защит ограничена и изменяется в зависимости от вида повреждения, режима работы сети и наличия переходного сопротивления в месте повреждения [1, 2]. Вследствие этого в ряде случаев указанная ступень может быть неэффективна. Расширить зону мгновенного отключения токовой защиты и ограничить влияние на нее указанных выше факторов возможно путем использования достоверной информации о зоне короткого замыкания [3–5].

Токовые ступенчатые защиты линий распределительных сетей по принципу выполнения относятся к наиболее простым. Чтобы избежать существенного их усложнения, определение зоны повреждения целесообразно производить на основе одностороннего дистанционного метода по параметрам аварийного режима [6–8].

Погрешности определения зоны повреждения на основе дистанционного метода обусловлены главным образом следующими факторами:

- погрешностями электромагнитных трансформаторов тока и напряжения;
- влиянием свободных составляющих электромагнитного переходного процесса;
- неточностью задания параметров линии;
- переходным сопротивлением в месте повреждения;
- токами нагрузочного режима;
- другими факторами.

Поскольку расчет ведется по параметрам петли междуфазного КЗ, исключается влияние общего переходного сопротивления (на землю), но не исключается влияние фазных переходных сопротивлений. По этим же соображениям для междуфазных КЗ не учитывается взаимоиндукция. Также если нейтраль трансформатора не заземлена, то можно пренебречь влиянием ответвлений.

Определение зоны короткого замыкания

Определение зоны повреждения в токовой защите осуществляется путем сравнения полученного расчетного расстояния $l_{КЗ}$ от места установки защиты до точки КЗ с длиной защищаемой линии. При этом алгоритм определения зоны повреждения реализуется на протяжении интервала времени с момента возникновения короткого замыкания и до его отключения защитой. Расчетная удаленность может определяться при трехфазных КЗ как усредненная по параметрам всех трех петель повреждения, а при двухфазных – по параметрам поврежденной петли [3, 4]. Таким образом, для реализации предлагаемого метода определения зоны повреждения требуется распознавание вида междуфазного КЗ. Вид повреждения определяется согласно [9], для чего рассчитываются два значения относительной несимметрии разностей фазных токов линии:

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

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

где I_{\max} , I_{\min} – наибольшее и наименьшее действующие значения разностей фазных токов линии; I_{mid} – среднее действующее значение из разностей токов фаз линии.

Анализ предварительных результатов вычислительного эксперимента показал, что для увеличения достоверности определения зоны КЗ в некоторых режимах может потребоваться коррекция расчетного расстояния до точки повреждения. Так, для режимов металлического трехфазного КЗ как при наличии нагрузки, так и при ее отсутствии характерно, что относительная несимметрия $\Delta I_1 \leq 0,04$, а зону повреждения с достаточной достоверностью можно определять как среднее значение по параметрам трех петель КЗ. При наличии в месте КЗ переходного сопротивления погрешности определения расчетного расстояния до точки повреждения возрастают с его увеличением как при работе линии под нагрузкой, так и в режиме холостого хода. Наибольшие погрешности определения зоны имеют место при протекании по линии нагрузочных токов и при изменении переходных сопротивлений R_{Π} в диапазоне 5–20 Ом могут достигать 12–55 % соответственно.

Для режимов двухфазного КЗ без нагрузки зона повреждения определяется с приемлемой достоверностью по параметрам поврежденной петли при любых значениях переходного сопротивления. Для этих режимов характерно $\Delta I_1 \geq 1,0$. При наличии нагрузки удовлетворительные результаты получаются при отсутствии переходного сопротивления (металлические КЗ), в этом случае $\Delta I_1 > 1,0$. При наличии переходного сопротивления в месте КЗ в нагрузочном режиме погрешности определения зоны повреждения имеют большие значения, возрастают с увеличением переходного сопротивления R_{Π} , и при его изменении в пределах 5–20 Ом могут достигать 8–45 % соответственно. Для указанных режимов характерно $\Delta I_1 < 1,0$.

Таким образом, в большинстве случаев КЗ через переходное сопротивление на нагруженной линии с целью повышения достоверности определения зоны повреждения целесообразно производить коррекцию расчетного расстояния до точки короткого замыкания. По результатам большого количества вычислительных экспериментов были получены корректирующие выражения, позволяющие установить зону повреждения с приемлемой достоверностью, а также определены условия их применения с тем, чтобы обеспечить селективность действия токовой защиты. При этом для выполнения коррекции используются две относительные несимметрии разностей фазных токов, вычисляемые согласно (1) и (2) для выявления вида междуфазного КЗ.

Трехфазное короткое замыкание

Как было отмечено, при $\Delta I_1 \leq 0,04$ коррекция не требуется, в этом случае зона короткого замыкания определяется по параметрам всех трех петель повреждения

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

Для снижения влияния переходного сопротивления в месте КЗ на достоверность определения зоны повреждения расчетную удаленность для каждой петли l_{AB} , l_{BC} , l_{CA} следует вести по реактивной составляющей их комплексного сопротивления, которая в микропроцессорной токовой защите может быть определена на основе информации о входных токах и напряжениях в виде ортогональных составляющих [3, 4].

При уровне относительной несимметрии $\Delta I_1 > 0,04$ коррекция производится по выражению

$$l_{КЗ} = kl_{cp,min} - (k - 1)l_{cp,max}, \quad (4)$$

где k – корректирующий коэффициент; $l_{cp,min}$, $l_{cp,max}$ – наименьшее и наибольшее из усредненных расчетных расстояний до места повреждения $l_{cp,1}$ и $l_{cp,2}$, рассчитываемых по выражениям:

$$l_{cp,1} = \frac{l_{AB} + l_{BC} + l_{CA}}{3}; \quad (5)$$

$$l_{cp,2} = \frac{l_{max} + l_{min}}{2}, \quad (6)$$

l_{max} , l_{min} – наибольшее и наименьшее значения из трех l_{AB} , l_{BC} , l_{CA} .

Корректирующий коэффициент вычисляется в зависимости от величины рассчитываемой по (2) относительной несимметрии ΔI_2 :

$$k = \begin{cases} 1 + \Delta I_2 & \text{при } \Delta I_2 > 1,1; \\ 2 + \Delta I_2 & \text{при } \Delta I_2 \leq 1,1. \end{cases} \quad (7)$$

Двухфазное короткое замыкание

Анализ результатов вычислительного эксперимента показал, что при $\Delta I_1 > 0,95$ зона повреждения определяется с приемлемой достоверностью и необходимость в коррекции отсутствует. При этом $l_{КЗ}$ вычисляется по параметрам поврежденной петли, которая выбирается по наибольшему действующему значению тока. Аналогичным образом определяется расчетное расстояние до точки повреждения при $0,95 \geq \Delta I_1 > 0,80$ и $\Delta I_2 > 7$.

В остальных случаях, т. е. при $0,95 \geq \Delta I_1 > 0,80$; $\Delta I_2 \leq 7,00$ и при $\Delta I_1 \leq 0,80$, независимо от уровня ΔI_2 , коррекция производится по выражению

$$l_{КЗ} = l_{пп} \left(1 - \frac{1}{\Delta I_2} \right), \quad (8)$$

где $l_{пп}$ – расчетное расстояние до точки повреждения, определяемое по параметрам поврежденной петли.

Результаты исследования работоспособности метода

Работоспособность предложенного алгоритма исследовалась методом вычислительного эксперимента на базе программного комплекса, воспроизводящего математическую модель узла распределительной сети 6–35 кВ с односторонним питанием, которая включает в себя измерительные трансформаторы тока и напряжения, что позволяет учесть влияние их погрешностей на достоверность определения зоны повреждения [10, 11].

В качестве оценочных параметров метода повышения достоверности установления зоны КЗ приняты относительная погрешность δ определения расчетной удаленности точки повреждения и время определения зоны повреждения. Ввиду того что определение зоны короткого замыкания предполагается использовать в качестве защитной функции, к предложенному алгоритму предъявляются высокие требования по быстродействию. Высокая точность определения расчетной удаленности при этом в большинстве случаев не требуется, за исключением отрезков в конце контролируемой и начале смежной линий, когда значительные погрешности могут привести к сокращению зоны мгновенного отключения защиты или к ее неселективному действию.

Относительная погрешность рассчитывается по выражению

$$\delta = \frac{l_{*КЗ} - l_{*ф}}{l_{*ф}} \cdot 100 \%, \quad (9)$$

где $l_{*ф}$ – фактическое расстояние до места КЗ.

Анализ работоспособности предложенного алгоритма проводился для наихудшего случая. При металлических КЗ в конце защищаемой линии, где достоверность установления зоны повреждения особенно важна, относительные погрешности определения $l_{КЗ}$ не велики и составляют не более 2,5 %. В указанных режимах $\Delta I_1 > 0,95$ при двухфазных и $\Delta I_1 < 0,04$ при трехфазных КЗ и коррекция $l_{КЗ}$ не производится. Короткие замыкания на ненагруженной линии характеризуются меньшими погрешностями определения $l_{КЗ}$ по сравнению с аналогичными повреждениями в нагрузочном режиме. Таким образом, наихудшим случаем является КЗ через переходное сопротивление на нагруженной линии.

Полученные по результатам вычислительного эксперимента зависимости $\delta = f(l_*)$ с учетом предложенного способа коррекции для случаев трех- и двухфазного КЗ через переходное сопротивление в нагрузочном режиме на линии с односторонним питанием представлены на рис. 1, 2. При этом если $l_* \leq 1$, то местом повреждения является контролируемая линия, а при $l_* > 1$ – смежная.

Область допустимых значений относительных погрешностей, при которых обеспечивается достоверное установление зоны КЗ, ограничивается кривой предельных погрешностей (рис. 1, 2, зависимость 1). При повреждении в пределах защищаемой линии значения относительной погрешности должны лежать ниже кривой 1, а при КЗ на смежной линии – выше, в противном случае зона КЗ будет установлена неверно.

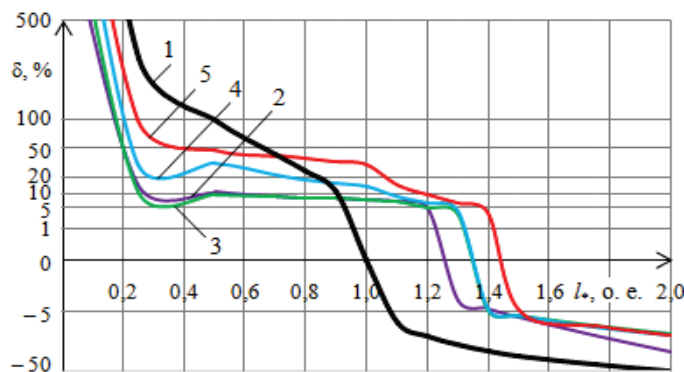


Рис. 1. Относительные погрешности определения расчетного расстояния до точки повреждения l_{K3} при трехфазных коротких замыканиях:

1 – кривая предельных погрешностей; 2, 3, 4, 5 – короткое замыкание через переходное сопротивление с $R_n = 5; 10; 15; 20$ Ом соответственно

Fig. 1. Relative error of determining estimated distances to the point of fault l_{K3} when the three-phase short circuits take place:

1 – curve of marginal errors; 2, 3, 4, 5 – short circuit via contact resistance with $R_n = 5; 10; 15; 20$ Ohm, respectively

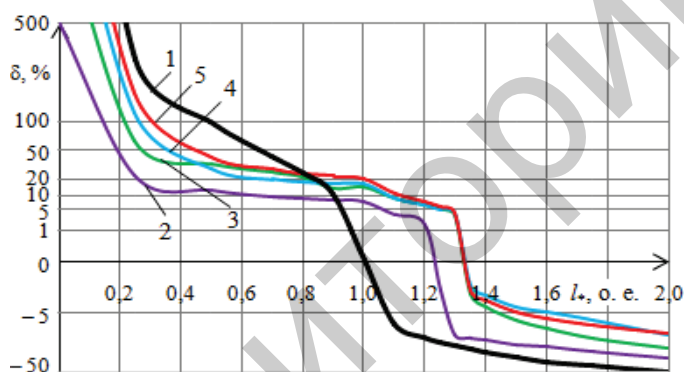


Рис. 2. Относительные погрешности определения расчетного расстояния до точки повреждения l_{K3} при двухфазных коротких замыканиях: 1–5 – то же, что на рис. 1

Fig. 2. Relative error of determining the estimated distance to the point of fault l_{K3} when two-phase short circuits take place: 1–5 – the same as in fig. 1

Из представленных зависимостей очевидно, что наличие переходного сопротивления R_n приводит к увеличению погрешности определения l_{K3} . Характер изменения зависимостей $\delta = f(l^*)$ для трех- и двухфазных КЗ примерно одинаков, причем в обоих случаях уровни относительной погрешности в конце защищаемой линии при переходных сопротивлениях в месте повреждения $R_n = (5-15)$ Ом составляют приблизительно от 8 до 20 % соответственно. При $R_n = 20$ Ом при трехфазных КЗ относительная погрешность не превышает 32 % и составляет порядка 21 % при двухфазных. Следует отметить, что реально существующие погрешности положительного знака приводят к сокращению зоны действия быстродействующей ступени. Влияние погрешностей измерительных трансформато-

ров тока из-за их работы в режимах насыщения или близких к ним особенно сильно сказывается при повреждении в начале линии, что обуславливает существенные значения относительной погрешности определения $l_{КЗ}$, которые тем не менее не выходят за кривую предельных погрешностей, и зона КЗ фиксируется достоверно. При этом для КЗ через переходное сопротивление в диапазоне $R_{п} = (5–20)$ Ом обеспечивается охват быстродействующей ступенью токовой защиты соответственно не менее 70–90 % от длины линии при симметричных и порядка от 80–90 % при несимметричных повреждениях.

Для достоверного установления зоны повреждения с учетом различного рода погрешностей целесообразно сравнивать вычисленное расстояние до места повреждения не с фактической длиной линии $l_{*ф}$, а с ее скорректированным значением. Соображения, положенные в основу расчета корректирующего коэффициента K_k , рассмотрены в [3]. Отметим только, что с учетом реально существующих погрешностей можно принять $K_k > 1$ для расширения зоны действия быстродействующей ступени, однако для надежного обеспечения селективного действия защиты контролируемой линии, что является определяющим, указанный коэффициент следует принять $K_k < 1$. На основании результатов вычислительного эксперимента пороговое значение $l_{*ф,п}$, при котором КЗ фиксируется на защищаемой линии, ориентировочно может быть принято на уровне $l_{*ф,п} = 0,95$.

Время установления зоны КЗ, характеризующее быстродействие предложенного метода, представляет собой интервал времени от момента возникновения режима КЗ до момента времени, когда вычисленное относительное значение $l_{*КЗ}$ достигнет принятого порогового значения $l_{*ф,п}$, т. е. когда $l_{*КЗ} \leq 0,95$. Оценить указанное время позволяют представленные на рис. 3 динамические характеристики.

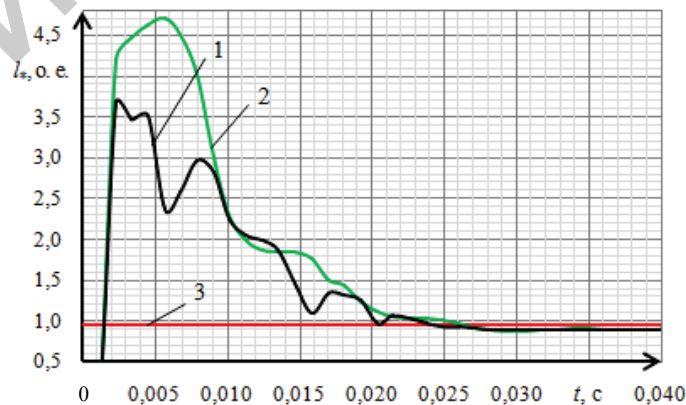


Рис. 3. Динамические характеристики алгоритма определения зоны повреждения в наихудшем случае: 1, 2 – трех- и двухфазные короткие замыкания; 3 – принятое пороговое значение $l_{*ф,п} = 0,95$

Fig. 3. The dynamic characteristics of the algorithm for fault areas determining in the worst case: 1, 2 – three-phase and two-phase short circuit; 3 – adopted threshold $l_{*ф,п} = 0,95$

Динамические характеристики построены для наихудшего режима, когда быстрое действие метода минимально, а именно – при повреждении в конце защищаемой линии ($I_* = 0,9$) в нагрузочном режиме. Их анализ показывает, что предложенный метод позволяет определить зону повреждения при двух- и трехфазных КЗ за время, не превышающее 26 мс.

ВЫВОД

Достоверность определения зоны повреждения на линиях 6–35 кВ может быть повышена за счет использования корректирующих выражений на основе двух относительных несимметрий разностей фазных токов, полученных по результатам большого числа вычислительных экспериментов.

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. Романюк, Ф. А. Определение места короткого замыкания на линиях радиальных сетей с односторонним питанием / Ф. А. Романюк, А. А. Тишечкин, Е. В. Булойчик // Наука и техника. 2012. № 4. С. 69–73.
4. Романюк, Ф. А. Определение места короткого замыкания на линиях распределительных сетей в объеме функций микропроцессорных токовых защит / Ф. А. Романюк, А. А. Тишечкин, О. А. Гурьянчик // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2010. № 6. С. 5–13.
5. Романюк, Ф. А. Определение места повреждения на линиях напряжением 6–35 кВ с односторонним питанием / Ф. А. Романюк, М. А. Шевалдин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2014. № 5. С. 5–14.
6. Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.
7. Шнеерсон, Э. М. Дистанционные защиты / Э. М. Шнеерсон. М.: Энергоатомиздат, 1986. 448 с.
8. Аржанников, Е. А. Методы и приборы определения мест повреждения на линиях электропередачи / Е. А. Аржанников, А. М. Чухин. М.: НТФ «Энергопрогресс», 1998. 64 с. (Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик». Вып. 3).
9. 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.
10. Новаш, И. В. Математическое моделирование коммутационных режимов в электроустановках с трансформаторами / И. В. Новаш, Ф. А. Романюк. Минск: БНТУ, 2013. 225 с.
11. 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.

REFERENCES

1. Fedoseev A. M., Fedoseev M. A. (1992) *Relay Protection of Electric Power Systems*. 2nd 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, MHEI Publ. 296 (in Russian).
3. Romaniuk F., Tishechkin A., Buloychik E. (2012) Detection of Short Circuit Location in Radial Network Lines with One-Side Supply. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (4), 69–73 (in Russian).
4. Romaniuk F. A., Tishechkin A. A., Gurjanchik O. A. (2010) Detection of Short-Circuit Location in Distribution Mains Line within Functions of Micro-Processor Current Protection. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (6), 5–13 (in Russian).
5. Romaniuk F. A., Shevaldin M. A. (2014) Detection of Fault Location on the Power Lines 6–35 kV with Unilateral Feed. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (5), 5–14 (in Russian).
6. Shneerson E. M. (2007) *Digital Relay Protection*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 549 (in Russian).
7. Shneerson E. M. (1986) *Distance Protection*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 448 (in Russian).
8. Arzhannikov E. A., Chukhin A. M. (1998) *Methods and Devices for the Localization of Faults of Power Lines. Electrical Engineer Small Library, Supplement to the "Energetik" Journal*. Moscow, Energoprogress Publ. 64 (in Russian).
9. Romaniuk F. A., Buloychik 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. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (6), 497–504 (in Russian). DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-6-497-504.
10. Novash V. I., Romaniuk F. A. (2013) *Mathematical Modeling of Switching Modes in Electrical Systems with Transformers*. Minsk, Belarusian National Technical University. 225 (in Russian).
11. 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: 11 December 2017 Accepted: 12 January 2018 Published online: 29 January 2018