

DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-2-108-117

УДК 621.316.925

Определение повреждения токовых цепей дифференциальной токовой защиты

М. С. Ломан¹⁾, В. С. Каченя¹⁾

¹⁾ОАО «Белэлектромонтажналадка» (Минск, Республика Беларусь)

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

Реферат. Ложная работа дифференциальной токовой защиты приводит к отключению наиболее ответственных электроэнергетических объектов. Повреждение вторичных цепей трансформаторов тока является одной из наиболее частых причин ложной работы защиты. Своевременное определение данной неисправности повышает надежность работы дифференциальной токовой защиты и уменьшает количество ложных отключений. В статье рассмотрены способы определения обрыва вторичных токовых цепей для дифференциальной защиты. Часть способов мгновенно реагирует на неисправность вторичных токовых цепей, а другая часть идентифицирует повреждение по истечении определенной выдержки времени. Каждый из рассмотренных способов обладает своими преимуществами и недостатками. Предложен новый метод определения обрыва вторичных токовых цепей на основе анализа приращений действующих значений дифференциального и тормозного токов. При этом приращения вычисляются за половину периода промышленной частоты, что обеспечивает быстрое определение неисправности. Использование суммы и разности приращений тормозного и дифференциального токов позволяет с наибольшей чувствительностью определить обрыв токовых цепей. Метод может быть адаптирован для работы с любым типом дифференциальной защиты, в том числе с защитой трансформатора. Оценка приращения действующего значения тока выполняется с учетом переходного процесса в фильтре Фурье. С помощью вычислительного эксперимента установлен предел погрешности такой оценки. Представлена блок-схема алгоритма определения обрыва токовых цепей на основании анализа приращений действующих значений тормозного и дифференциального токов, описан принцип его функционирования. Произведено определение параметров срабатывания. Установлены пределы чувствительности способа. Методом вычислительного эксперимента с использованием среды моделирования MatLab Simulink определены временные характеристики алгоритма.

Ключевые слова: вторичные токовые цепи, обрыв, дифференциальная токовая защита, синусоидальный сигнал, уставка срабатывания

Для цитирования: Ломан, М. С. Определение повреждения токовых цепей дифференциальной токовой защиты / М. С. Ломан, В. С. Каченя // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 2. С. 108–117. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-2-108-117

Адрес для переписки

Каченя Владислав Станиславович
ОАО «Белэлектромонтажналадка»
ул. Плеханова, 105а
220101, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 368-09-05
v.s.kachenya@gmail.com

Address for correspondence

Kachenya Vladislav S.
JSC “Belektromontazhnaladka”
105a Plekhanov str.,
220101, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 368-09-05
v.s.kachenya@gmail.com

Detection of Current Circuits Fault for Differential Current Protection

M. S. Loman¹⁾, V. S. Kachenya¹⁾

¹⁾JSC “Belelektromontazhnaladka” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. False operation of the differential current protection leads to tripping of the most important electrical power objects. Fault of current transformer’s secondary circuits is one of the most often cause of false operation of the differential current protection. Early determination of this malfunction increases the reliability of the differential current protection and reduces the number of false trips. In the present article the methods of secondary open circuit determining for the differential protection are described. Some of the methods react instantly to the malfunction of secondary current circuits, and the other part identifies fault after a certain time delay. Each of considered methods has its advantages and disadvantages. A new method for determination secondary open current circuits based on the analysis of increments of the RMS values of differential and braking currents has been proposed. In this case, increments are calculated for half the period of the industrial frequency, which provides quick fault determining. The use of the sum and the difference between the increments of the brake and differential currents makes it possible to determine the open circuits in the most sensitive way. The method can be adapted to work with any type of differential protection, including transformer protection. The evaluation of the increment of the RMS current value is performed taking into account the transient process in the Fourier filter. With the aid of a computational experiment, the error limit of such an estimate is determined. The block diagram of algorithm of determination of open circuits on the basis of the analysis of increments of the acting values of brake and differential currents is presented; the principle of its functioning is described. The parameters of operation are determined. The limits of sensitivity of the method are determined, too. The time characteristics of the algorithm have been determined by the method of computational experiment with the of the MatLab Simulink simulation environment.

Keywords: secondary current circuits, open circuit, current differential protection, sinusoidal signal, setpoint actuation

For citation: Loman M. S., Kachenya V. S. (2018) Detection of Current Circuits Fault for Differential Current Protection. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (2) 108–117. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-2-108-117 (in Russian)

Введение

Дифференциальные токовые защиты (ДТЗ) применяются для защиты от коротких замыканий (КЗ) наиболее ответственных электроэнергетических объектов. Они обеспечивают абсолютную селективность и действуют на ликвидацию аварии без выдержек времени [1]. Для определения повреждения устройства данного типа используют величины дифференциального и тормозного токов, рассчитываемые на основании вторичных токов трансформаторов тока (ТТ) [2, 3]. При неисправности токовых цепей одного из присоединений защита должна быть выведена из работы.

Для терминалов релейной защиты и автоматики (РЗА), в которых значение тормозного тока рассчитывается как сумма токов присоединений, обрыв вторичных цепей ТТ сопровождается уменьшением тормозного и увеличением дифференциального тока. Снижение тормозного тока ве-

дет к уменьшению уставки срабатывания, при этом появление дифференциального тока может привести к ложному срабатыванию защиты. Для предотвращения этого необходимо блокировать действие ДТЗ до того, как произойдет срабатывание основной ступени.

Существующие методы определения повреждений токовых цепей дифференциальной токовой защиты

Выявление обрыва токовых цепей ДТЗ происходит в нормальном режиме работы и может осуществляться одним из следующих способов:

- а) на основе небаланса дифференциального тока [4];
- б) путем анализа величин втекающих и вытекающих токов [5];
- в) на основании анализа приращений действующих значений дифференциального и тормозного токов.

Для метода (а) выявление повреждения происходит с выдержкой времени при значении дифференциального тока, выше заданной уставки, но меньше уставки срабатывания ДТЗ. Из-за большого уровня токов небаланса данный метод не применим к ДТЗ трансформатора. Также его недостатком является наличие выдержки времени.

С помощью метода (б) определяются мгновенные величины втекающих и вытекающих токов, затем вычисляются их действующие значения. Повреждения фиксируются, когда при неизменной величине втекающего тока значение вытекающего уменьшается. Помимо этого, величины втекающего и вытекающего токов должны оставаться неизменными в течение пяти секунд до того, как значения дифференциального тока превысят заданную уставку.

Реализация метода (в) предусматривает определение приращений действующих значений тормозного и дифференциального токов. Данный метод представляется предпочтительным, поскольку может быть адаптирован под любой тип ДТЗ, в том числе для защиты трансформатора.

Общий недостаток методов (б) и (в) – невозможность выявления неисправности цепей ТТ в случаях, когда ток по ним не протекает, а также при пробое изоляции токовых цепей в режимах КЗ.

Приращение действующего значения сигнала

Переходной процесс при вычислении действующего значения синусоидального сигнала частотой 50 Гц посредством дискретного преобразования Фурье (ДПФ) представлен на рис. 1 [6]. Из рисунка видно, что длительность переходного процесса составляет 20 мс. Данное время не зависит от амплитуды установившегося сигнала и фазы начала переходного процесса. Влияние на время переходного процесса могут оказывать частота сигнала, а также присутствие апериодической составляющей [7]. При обрыве вторичных цепей ТТ в токах, подводимых к устройству РЗА, апериодическая составляющая практически отсутствует, а в нормальном

режиме работы частота лежит в пределах $(50 \pm 0,4)$ Гц [8], что не оказывает существенного влияния на время переходного процесса.

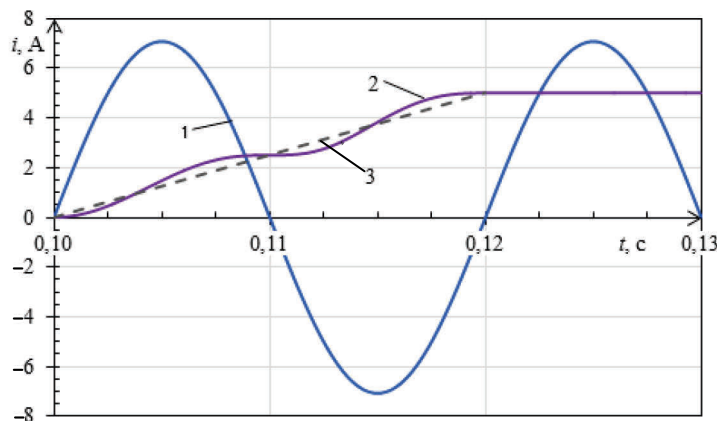


Рис. 1. Вычисление действующего значения синусоидального сигнала частотой 50 Гц в переходном режиме: 1 – входной синусоидальный сигнал; 2 – выходной сигнал дискретного преобразования Фурье; 3 – линейризация переходного процесса дискретного преобразования Фурье

Fig. 1. The calculation of the RMS value of a sinusoidal signal with frequency of 50 Hz in the transient mode: 1 – input sinusoidal signal; 2 – output signal of the discrete Fourier transform; 3 – linearization of the transient discrete Fourier transform

Принимая время цифровой фильтрации и вычисления действующего значения, равным 20 мс, с некоторой погрешностью можно линейризовать переходной процесс в соответствии с кривой 3 (рис. 1). Приращение линейризованной функции (рис. 2) за время $\Delta t = 10$ мс определяется по выражению

$$\Delta I = I(t) - I(t - \Delta t), \quad (1)$$

где $I(t)$ – действующее значение тока в момент времени t ; $I(t - \Delta t)$ – действующее значение тока в момент времени $t - \Delta t$.

Кривая 2 на рис. 2 позволяет оценить скорость изменения действующего значения на выходе ДПФ и обладает следующими свойствами:

- функция достигает своего максимального значения за 10 мс;
- продолжительность существования максимального значения 10 мс;
- максимальное значение функции составляет половину установившегося значения кривой 1.

Переходной процесс в ДПФ был исследован при помощи математической модели, разработанной в среде MatLab Simulink [9–11]. Зависимости приращения, полученные на основе ДПФ и линейризованного переходного процесса, представлены на рис. 3.

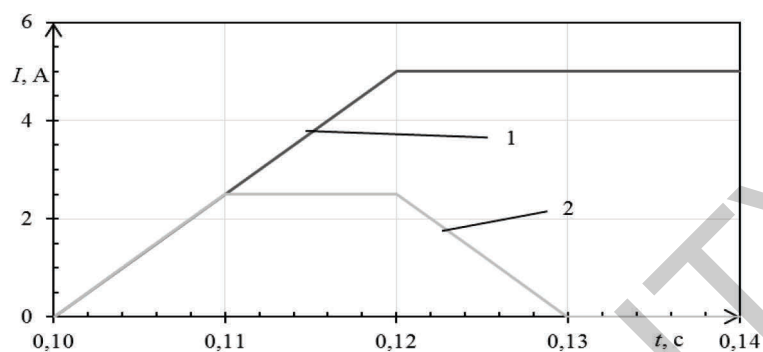


Рис. 2. Анализ переходного процесса дискретного преобразования Фурье (ДПФ)
1 – линейризация переходного процесса ДПФ;
2 – скорость изменения сигнала на выходе ДПФ

Fig. 2. Analysis of the transient process of the discrete Fourier transform (DFT): 1 – linearization of the transient process of DPF; 2 – rate of change of the signal at the output of DFT

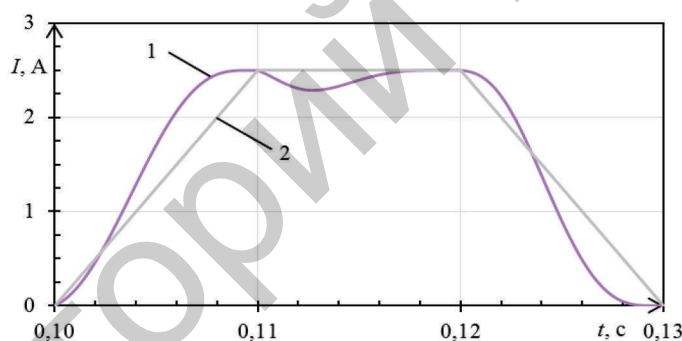


Рис. 3. Функции приращений: 1 – переходного процесса дискретного преобразования Фурье;
2 – линейризованного переходного процесса ДПФ

Fig. 3. The increments function: 1 – DFT transient process;
2 – linearized DFT transient process

В результате исследований было установлено, что максимальное значение экспериментальной кривой 1 (рис. 3) не превышает максимального значения линейризованной кривой 2. При этом погрешность линейризации участка максимального приращения составляет не более 9 %.

Определение обрыва токовых цепей на основе приращений действующих значений тормозного и дифференциального токов

Для ДТЗ, в которых торможение осуществляется токами всех присоединений, обрыв токовых цепей сопровождается увеличением дифференциального и уменьшением на такую же величину тормозного тока. Данный принцип положен в основу алгоритма, представленного на рис. 4, где приняты следующие обозначения: $I_{\text{тор}}$ – действующее значение тормозного тока;

$I_{\text{диф}}$ – то же дифференциального тока; $\Delta I_{\text{тор}}$ – приращение тормозного тока; $\Delta I_{\text{диф}}$ – то же дифференциального тока; $\Delta I_{\text{блок}}$ – величина блокирующего приращения, рассчитывается по выражению

$$\Delta I_{\text{блок}} = 2\Delta I_{\text{диф}} + 2\Delta I_{\text{тор}}; \quad (2)$$

$\Delta I_{\text{ср}}$ – значение приращения срабатывания,

$$\Delta I_{\text{ср}} = 2\Delta I_{\text{тор}} - 2\Delta I_{\text{диф}}; \quad (3)$$

$I_{\text{блок}}$ – величина блокирующего тока,

$$I_{\text{блок}} = I_{\text{диф}} + I_{\text{тор}}. \quad (4)$$

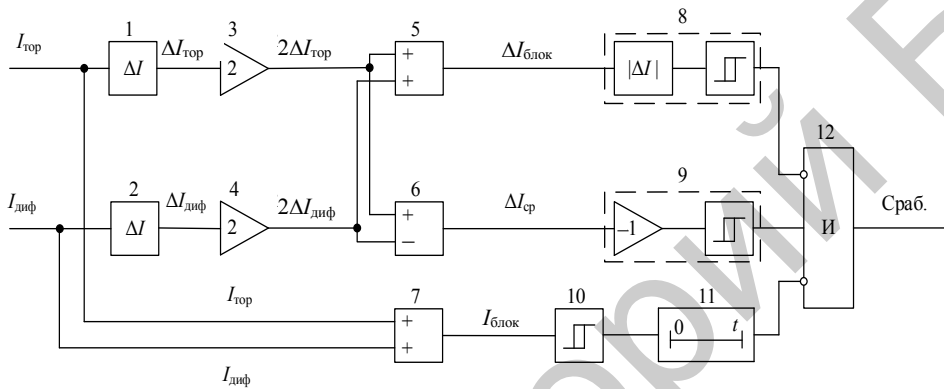


Рис. 4. Алгоритм определения обрыва токовых цепей на основе приращений тормозного и дифференциального токов: 1, 2 – блок расчета приращений; 3, 4 – блок усиления сигнала; 5, 7 – блок расчета суммы; 6 – блок расчета разности; 8 – измерительный орган абсолютного значения приращения; 9 – измерительный орган отрицательного приращения; 10 – измерительный орган тока; 11 – таймер на возврат; 12 – логический элемент «И»

Fig. 4. The algorithm for the open secondary circuits detection on the basis of brake and differential currents increments: 1, 2 – block of increments calculating; 3, 4 – block of signal amplification; 5, 7 – block of sum calculating; 6 – block of difference calculation; 8 – measuring device (MU) of the increment absolute value; 9 – MU of the negative increment; 10 – current MU; 11 – reset timer; 12 – logical element “AND”

С помощью блоков 5 и 8 формируется сигнал блокировки алгоритма при переходных процессах внутреннего или внешнего КЗ и в режимах, связанных со сбросом (с набросом) нагрузки. Блоки 7, 10 и 11 производят блокировку алгоритма в установившемся режиме внутреннего или внешнего КЗ, а также при переходных процессах, возникающих при отключении КЗ. Срабатывание алгоритма происходит при отсутствии сигналов на выходе блоков 8 и 11 и наличии разрешающего сигнала, формируемого блоком 9.

При обрыве токовых цепей приращение тормозного тока $\Delta I_{\text{тор}}$ будет отрицательным, а приращение дифференциального $\Delta I_{\text{диф}}$ положительным.

По абсолютному значению эти величины примерно равны между собой. Сигнал блокирующего приращения $\Delta I_{\text{блок}}$ останется практически без изменения и равным небалансу, обусловленному нелинейностью переходного процесса в ДПФ. Отстройка от указанного небаланса осуществляется с помощью измерительного органа (ИО) 8. Действующее значение блокирующего тока $I_{\text{блок}}$ не изменит своей величины, при этом $\Delta I_{\text{ср}}$ достигнет двукратного значения тока, протекавшего в оборвавшейся цепи ТТ. Так как ИО 8 и 10 не формируют блокирующих сигналов, а ИО 9 сработает, на выходе блока 12 возникнет сигнал о неисправности вторичных токовых цепей.

Оценка свойств метода определения обрыва вторичных токовых цепей дифференциальной токовой защиты

Чувствительность метода определяют уставки, задаваемые в блоках 8, 9 и 10 (рис. 4). Уставка блока 8 отстраивается от небаланса $\Delta I_{\text{блок}}$, возникающего при обрыве токовых цепей. Определение небаланса производилось путем моделирования обрыва токовых цепей при токах в диапазонах от 0 до номинального тока ТТ и значением фазы в момент обрыва от 0 до 180°. В результате было установлено, что небаланс $\Delta I_{\text{блок}}$ по отношению к действующему току поврежденных цепей ТТ не превышает 0,14. С учетом этого уставка блока 8 определяется

$$\Delta I_{\text{уст.блок}} = 0,14 K_{\text{отс}} I_{\text{мах.ном}}^{\text{ТТ}} = 0,14 \cdot 1,2 I_{\text{мах.ном}}^{\text{ТТ}} = 0,168 I_{\text{мах.ном}}^{\text{ТТ}}, \quad (5)$$

где $\Delta I_{\text{уст.блок}}$ – уставка срабатывания ИО блока 8; $K_{\text{отс}}$ – коэффициент отстройки, принимается равным 1,2; $I_{\text{мах.ном}}^{\text{ТТ}}$ – номинальный вторичный ток ТТ с наибольшим коэффициентом трансформации.

Уставка блока 9 отстраивается от уставки ИО 8

$$\Delta I_{\text{уст.ср}} = K_{\text{отс}} \Delta I_{\text{уст.блок}} = 1,2 \cdot 0,168 I_{\text{мах.ном}}^{\text{ТТ}} = 0,202 I_{\text{мах.ном}}^{\text{ТТ}}, \quad (6)$$

где $\Delta I_{\text{уст.ср}}$ – уставка срабатывания ИО блока 9.

Величина срабатывания элемента 10 отстраивается от тормозного тока в режиме максимальных нагрузок

$$I_{\text{уст.блок}} = 2 K_{\text{отс}} \frac{I_{\text{мах.нагр}}}{K_{\text{ТТ}}}, \quad (7)$$

где $I_{\text{мах.нагр}}$ – первичный ток наиболее нагруженного присоединения; $K_{\text{ТТ}}$ – коэффициент трансформации ТТ.

С учетом того, что в алгоритме производится приведение приращений к действующему значению, минимальный ток $I_{\text{обн.мин}}$, пропадание которого сможет определить алгоритм, равен

$$I_{\text{обн.мин}} = (1 + \varepsilon) \frac{\Delta I_{\text{уст.сп}}}{2} = (1 + 0,1) \cdot \frac{0,202 I_{\text{мах.ном}}^{\text{ТТ}}}{2} = 0,111 I_{\text{мах.ном}}^{\text{ТТ}}, \quad (8)$$

где ε – погрешность ТТ.

Исходя из выражений (7) и (8), алгоритм определяет обрыв токовых цепей ДТЗ с протекающим током, находящимся в следующих пределах:

$$0,111 I_{\text{мах.ном}}^{\text{ТТ}} < I_{\text{сп}} < K_{\text{отс}} \frac{I_{\text{мах.нагр}}}{K_{\text{ТТ}}}, \quad (9)$$

где $I_{\text{сп}}$ – вторичный ток ТТ с учетом приведения, пропадание которого может почувствовать представленный алгоритм.

Быстродействие алгоритма определяется временем расчета приращения Δt . Максимальное время срабатывания способа составляет 10 мс. Зависимость наибольшего времени срабатывания алгоритма от действующей величины тока, при котором происходит повреждение, представлена на рис. 5.

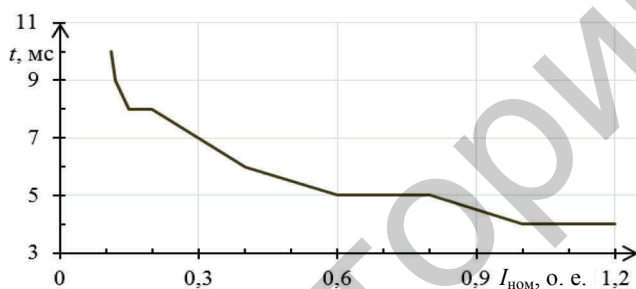


Рис. 5. Наибольшее время срабатывания алгоритма определения обрыва токовых цепей

Fig. 5. The highest response time of the detection algorithm for open current circuits

Селективность способа обеспечивается тем, что только при обрыве токовых цепей одновременно с увеличением дифференциального тока происходит снижение тормозного. Во всех остальных переходных режимах тормозной и дифференциальный токи одновременно увеличиваются или снижаются, либо изменяется только тормозной ток. Устойчивость алгоритма к токам небаланса в переходных режимах дополнительно обеспечивается ИО 8 (рис. 4), который срабатывает в случае, когда сумма приращений тормозного и дифференциального токов не равна нулю. Отстройка от небаланса приращений токов в режимах КЗ осуществляется блокировкой алгоритма с помощью блоков 10 и 11 (рис. 4).

Надежность обеспечивается продолжительностью существования сигнала срабатывания алгоритма. Для выбранного Δt это время составляет не менее 10 мс, что достаточно для применения в микропроцессорных

устройствах РЗА с интервалом расчета, равным или меньшим 10 мс. Зависимость минимальной продолжительности существования выходного сигнала от величины тока представлена на рис. 6.

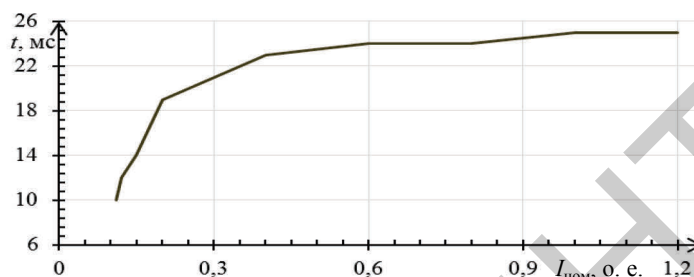


Рис. 6. Минимальное время существования сигнала неисправности токовых цепей

Fig. 6. The minimum time of the existence of the signal of fault of current circuits

ВЫВОДЫ

1. Определение обрыва токовых цепей ДТЗ с торможением суммой токов всех присоединений может быть выполнено на основе анализа приращений действующих величин дифференциального и тормозного токов.

2. Чувствительность предлагаемого метода ограничена нелинейностью переходных процессов в ДПФ. Минимальное значение тока, при котором возможно определение неисправности токовых цепей ДТЗ, составляет 0,111 номинального тока ТТ.

3. Надежность предлагаемого метода обеспечивается продолжительностью существования сигнала о неисправности цепей ТТ не менее 10 мс, что достаточно для применения в микропроцессорных устройствах РЗА с программным циклом расчета, равным или меньшим 10 мс.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила устройства электроустановок. 7-е и 6-е изд. М.: Госторгиздат, 2008. 504 с.
2. Федосеев, А. М. Релейная защита электроэнергетических систем / А. М. Федосеев. М.: Энергоатомиздат, 1984. 520 с.
3. Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.
4. Реле микропроцессорное МР901, МР902 дифференциальной защиты шин: руководство по эксплуатации ПШИЖ 144.00.00.00.003 РЭ, редакция 3.00 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://bemn.by/filedownload.php?file=3131.pdf>. Дата доступа: 20.04.2017.
5. Устройство защиты сборных шин REB670. Версия 2.1. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://library.e.abb.com/public/ac2020f4dcd54b8d802988ed68f26e1b/1MRK505340-BRU_A_ru_REB670_2.1.pdf. Дата доступа: 28.03.2017.
6. Романюк, Ф. А. Информационное обеспечение микропроцессорных защит электроустановок / Ф. А. Романюк. Минск: Технопринт, 2001. 133 с.
7. Реализация цифровых фильтров в микропроцессорных устройствах релейной защиты / Ю. В. Румянцев [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 5. С. 397–417. DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-5-397-417.

8. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 32144–2013. Введ. 01.07.2014. М.: Росстандарт, 2014. 19 с.
9. Новаш, И. В. Упрощенная модель трехфазной группы трансформаторов тока в системе динамического моделирования / И. В. Новаш, Ю. В. Румянцев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2015. № 5. С. 23–38.
10. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.
11. Дьяконов, В. П. MatLab и Simulink для радиоинженеров / В. П. Дьяконов. М.: ДМК Пресс, 2011. 975 с.

Поступила 03.10.2017 Подписана в печать 08.01.2018 Опубликовано онлайн 30.03.2018

REFERENCES

1. *Electrical Devices Installation Rules*. 7th and 6th eds. (2008) Moscow, Gostorgizdat Publ. 504 (in Russian).
2. Fedoseev A. M. (1984) *Relay Protection of Electric Power Systems*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 520 (in Russian).
3. Shneerson E. M. (2007) *Digital Relay Protection*. Moscow. Energoatomizdat Publ. 549 (in Russian).
4. *Microprocessor Relay MP901, MP902 for Differential Protection of Busbars: User Manual, PShIZh 144.00.00.00.003 RE, Revision 3.00*. Available at: <http://bemn.by/filedownload.php?file=3131.pdf> (Accessed 20 April 2017) (in Russian).
5. *Tire protection device REB670. Version 2.1. Product Guide*. Available at: https://library.e.abb.com/public/ac2020f4dcd54b8d802988ed68f26e1b/1MRK505340-BRU_A_ru_REB670_2.1.pdf (Accessed 28 March 2017) (in Russian).
6. Romaniuk F. A. (2001) *Information Support of Microprocessor-Based Protection of Electrical Installations*. Minsk, Technoprint. 133 p. (in Russian).
7. Rumiantsev Y. V., Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Y., Novash I. V. (2016) Digital Filters Implementation in Microprocessor-Based Relay Protection. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'Edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 59 (5), 397–417 (in Russian) DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-5-397-417.
8. State Standard 32144–2013 (2014) *Electric Energy. Electromagnetic Compatibility of Technical Means. Standards of Quality of Electric Energy in Systems of Power Supply of General Purpose*. Moscow, Rosstandart Publ. 19 (in Russian).
9. Novash I. V., Rumiantsev Y. V. (2015) A Simplified Model of Three-Phase Bank of Current Transformers in the Dynamic Simulation System. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'Edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (5), 23–38 (in Russian).
10. Chernykh I. V. (2008) *Modeling of Electrical Devices in MatLab, SimPowerSystems and Simulink*. Moscow, DMK Press; Sankt-Petersburg, Piter Publ. 288 (in Russian).
11. D'yakonov V. P. (2011) *MatLab u Simulink for Radio Engineers*. Moscow, DMK Press. 975 (in Russian).

Received: 3 October 2017

Accepted: 8 January 2018

Published online: 30 March 2018