

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-491-499>

УДК 621.316.925

Исследование блокировки токовой защиты электроустановок с трансформаторами

Ф. А. Романюк¹⁾, В. Ю. Румянцев¹⁾, Ю. В. Румянцев¹⁾, Е. А. Дерюгина¹⁾,
П. И. Климкович¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. В электроустановках с трансформаторами при включении их под напряжение без нагрузки и в ряде других режимов возникает бросок тока намагничивания (БТН), который может вызвать ложное срабатывание токовой защиты. Для исключения подобной ситуации осуществляется блокировка защиты. Принцип действия блокировки основывается на том, что в трехфазной системе в нормальном режиме и при симметричных коротких замыканиях (КЗ) содержащиеся в фазных токах электроустановки первые гармоники образуют прямую последовательность, а вторые – обратную. При возникновении несимметричного режима, в том числе несимметричного КЗ, появляется обратная последовательность, образованная входящими в состав фазных токов первыми гармониками. В режимах БТН в фазных токах присутствуют вторые гармоники значительной величины, которые создают обратную последовательность. При анализе информационных параметров токов указанных последовательностей производится идентификация режимов БТН и КЗ с осуществлением при необходимости блокировки защиты. Исследование ее функционирования проводилось методом вычислительного эксперимента путем анализа изменений вычисляемого параметра блокировки, сравнимого с уставкой срабатывания, с использованием цифровой модели, реализованной в среде динамического моделирования MatLab-Simulink. В результате выполненных расчетов подтверждена принципиальная работоспособность предложенной блокировки, которая обеспечивает достаточно достоверную идентификацию режимов БТН и КЗ вне зависимости от степени насыщения трансформаторов тока. При этом установлено, что при более простой реализации данный принцип блокировки имеет более высокую чувствительность, чем классический, основанный на оценке отношения второй и первой гармоник токов фаз. В режимах КЗ в электроустановке предложенная блокировка вносит замедление в срабатывание токовой защиты, которое может быть уменьшено за счет повышения быстродействия цифровых частотных фильтров.

Ключевые слова: токовая защита, бросок тока намагничивания, блокировка, прямая и обратная последовательности, вычислительный эксперимент, модель, MatLab-Simulink, идентификация, параметр блокировки, чувствительность

Для цитирования: Исследование блокировки токовой защиты электроустановок с трансформаторами / Ф. А. Романюк [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 6. С. 491–499. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-491-499>

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

Researching the Blocking of Current Protection of Electrical Power Units with Transformers

F. A. Romaniuk¹⁾, V. Yu. Rumiantsev¹⁾, Yu. V. Rumiantsev¹⁾, A. A. Dziaruhina¹⁾, P. I. Klimkovich¹⁾

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

Abstract. The magnetizing current inrush appears in electrical power units equipped with transformers in case of no-load energizing of the power transformers and in a number of other cases. This phenomenon could cause a false triggering of the current protection. To prevent incorrect actions of the current protection during the magnetizing current inrush a protection blocking is carrying out. The blocking principle operation is based on the fact that in a three-phase system in normal mode and in case of symmetrical short circuit the first harmonics contained in the phase currents of electrical installations form a direct sequence and the second ones – the negative sequences. In case of an asymmetric mode, including an asymmetric short circuit, the negative sequence appears, formed by the first harmonics that are part of the phase currents of the specified system. In magnetizing current inrush modes, second harmonics of significant magnitude are present in phase currents, which form the negative sequence. Based on the analysis of the information parameters of the specified sequences currents, identification of the magnetizing current inrush and short-circuit modes is performed with the implementation of the protection blocking if necessary. The study of the current protection blocking functioning was performed using computational experiment by analyzing the calculated changes of blocking parameter compared with the threshold setpoint. The specified researching is done by using the digital model that is implemented in the dynamic modeling environment MatLab-Simulink. As a result of the performed calculations, the principal operability of the proposed current protection blocking was confirmed that provides a fairly reliable identification of the magnetizing current inrush and short-circuits modes, regardless of the degree of saturation of current transformers. It was found that the proposed principle of the current protection blocking has a higher sensitivity in comparison with the classical one based on the estimation of the ratio of the second and first harmonics of the phase currents. In short-circuit modes in an electrical power units the proposed blocking causes a current protection operation delay that can be reduced by digital filters performance improvement.

Keywords: current protection, magnetizing current inrush, blocking, positive and negative sequences, computational experiment, model, MatLab-Simulink, identification, blocking parameter, sensitivity

For citation: Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V., Dziaruhina A. A., Klimkovich P. I. (2020) Researching the Blocking of Current Protection of Electrical Power Units with Transformers. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (6), 491–499. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-491-499> (in Russian)

Введение

В электроустановках с трансформаторами при включении их под напряжение без нагрузки и в ряде других случаев изменения режима работы возникает бросок тока намагничивания [1]. Это способно вызвать ложное срабатывание токовой защиты электроустановки [2]. Исключить неправильные действия защиты можно путем ее загробления, что повлечет снижение чувствительности к коротким замыканиям, либо запретом действия на время существования БТН, которое является широко используемым практическим мероприятием [3].

Реализация блокировки, ориентированной на применение в цифровых токовых защитах электроустановок, подробно описана в [4, 5]. Принцип ее

действия основывается на том, что в трехфазной системе в нормальном режиме и при симметричных КЗ содержащиеся в фазных токах первые гармоники создают прямую последовательность, а вторые – обратную [6]. При возникновении несимметричного режима, в том числе несимметричного КЗ, появляется обратная последовательность, образованная содержащимися в токах фаз первыми гармониками. Для режимов БТН характерно возникновение обратной последовательности из-за наличия в фазных токах системы вторых гармоник значительной величины. Сравнивая информационные параметры токов указанных последовательностей, можно идентифицировать режимы БТН и КЗ, осуществляя при необходимости блокировку защиты.

Основная часть

В исследуемой блокировке исполнительная команда вырабатывается при положительном результате сравнения вычисляемого параметра p_n с задаваемой уставкой срабатывания $k_{\text{оп}}$.

При этом параметр блокировки может определяться по одному из следующих выражений:

$$p_1 = \frac{I_{m22}}{I_{m11}}, \quad (1)$$

где I_{m22} – амплитуда тока второй гармоники обратной последовательности; I_{m11} – то же первой гармоники прямой последовательности;

$$p_2 = \frac{I_{m22}}{I_{m1\text{макс}}}, \quad (2)$$

$I_{m1\text{макс}}$ – наибольшее из значений амплитуд первых гармоник фазных токов;

$$p_3 = \frac{I_{m22}}{I_{m1\text{ср}}}, \quad (3)$$

$I_{m1\text{ср}}$ – среднее значение амплитуд первых гармоник фазных токов.

В основу оценки работоспособности и эффективности функционирования предложенной блокировки положен сравнительный анализ изменений p_1, p_2, p_3 в режимах БТН и КЗ в электроустановке.

Моделирование

Решение обозначенной задачи осуществлялось методом вычислительного эксперимента с использованием цифровой модели, реализованной в среде динамического моделирования MatLab-Simulink [7].

В структуру указанной модели входят энергосистема, линия электропередачи, трансформатор, трехфазная группа трансформаторов тока (ГТ), нагрузка, блоки включения и КЗ, а также модели цифровых частотных фильтров, фильтров прямой и обратной последовательностей и других

элементов, обеспечивающих получение параметров блокировки p_1 , p_2 , p_3 . Моделирование цифровой структуры выполнено с применением подходов и методов, использовавшихся в [8, 9]. Разработанное математическое и информационное обеспечение вычислительного эксперимента как инструмент исследования позволяет проводить проверку и давать оценку поведению блокировки в следующих режимах:

- включения ненагруженного трансформатора под напряжение;
- восстановления уровня напряжения после отключения внешних КЗ различных видов;
- возникновения различных видов КЗ в электроустановке.

Для всех режимов предусмотрена возможность учета насыщения ТТ [10].

Результаты исследования

С помощью разработанных программных средств исследовано поведение блокировки в перечисленных выше режимах работы электроустановки с трансформаторами ТДН-16000/110 и ТДН-6300/110. При этом расчеты показали, что характер изменения и текущие значения p_1 , p_2 , p_3 для электроустановок с указанными трансформаторами практически идентичны, в связи с чем приводятся полученные результаты для электроустановки с трансформатором ТДН-16000/110.

На рис. 1 представлены первичные i_1 , вторичные i_2 токи (а), а также параметры блокировки p_1 , p_2 , p_3 (б) при включении ненагруженного трансформатора под напряжение с фазой включения 0.

В данном режиме наблюдаются наибольшая амплитуда БТН и относительно большая постоянная времени затухания (рис. 1а). Параметры блокировки p_1 , p_2 , p_3 имеют схожий характер изменения, но отличаются по уровню. В начальном периоде возникновения БТН отмечаются выбросы значений p_1 , p_2 , p_3 . Это обусловлено использованием на указанном периоде информации о токах как предшествующего режима, так и режима включения, что порождает динамическую погрешность определения параметров блокировки. При этом выбросы p_1 , p_2 , p_3 не будут приводить к несрабатыванию блокировки.

Как видно из рис. 1б, после выбросов p_1 , p_2 , p_3 имеют место их выраженные минимумы, определяющие наименьшую чувствительность блокировки. Текущее значение коэффициента чувствительности, рассчитываемое как отношение параметра блокировки p_n к уставке срабатывания $k_{\text{от}}$, при неизменной величине последней будет тем выше, чем больше p_n . Таким образом, наиболее высокую чувствительность имеет блокировка, основанная на использовании параметра p_1 , вычисляемого по выражению (1). Тем не менее следует отметить, что блокировки с контролем параметров p_2 или p_3 , вычисляемых по (2), (3) соответственно, отличаются более простой реализацией.

Результаты исследования режима включения ненагруженного трансформатора под напряжение при других, отличающихся от нулевой, фазах показали, что характер изменения p_1 , p_2 , p_3 близок к приведенным на рис. 1б зависимостям, а отклонения их численных значений не являются критичными.

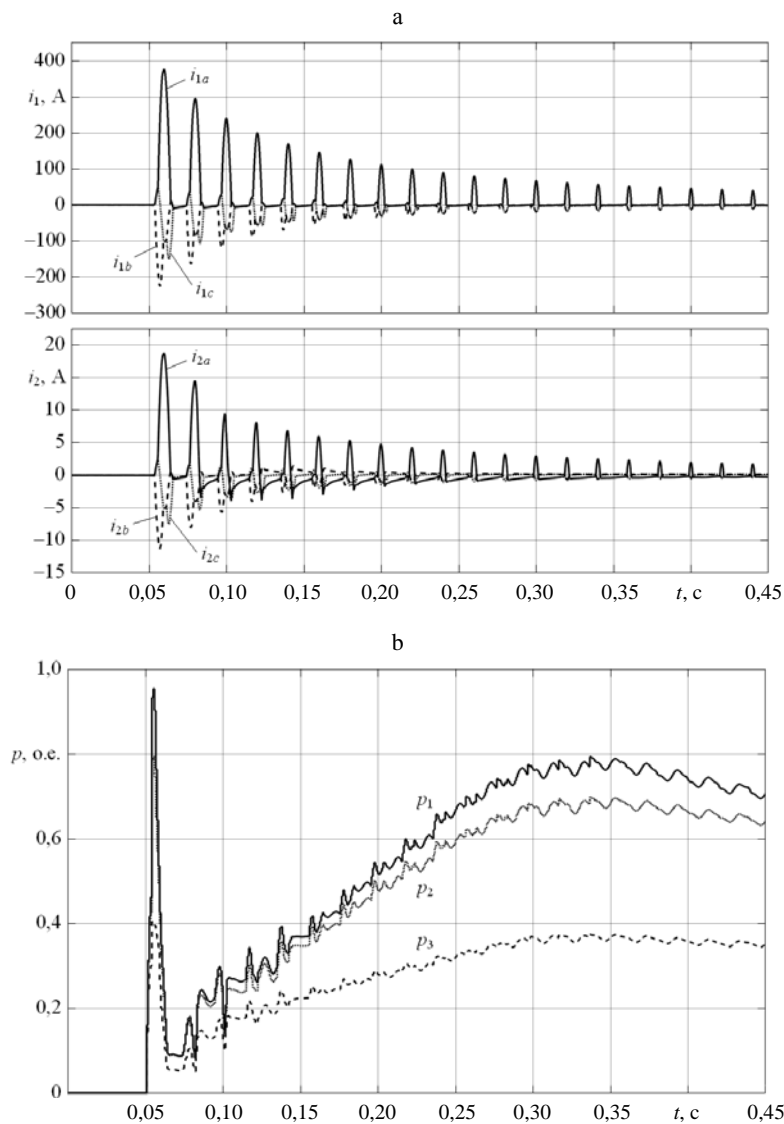


Рис. 1. Первичные i_1 , вторичные i_2 токи (а) и параметры блокировки (б) при включении ненагруженного трансформатора под напряжение

Fig. 1. Primary i_1 , secondary i_2 currents (a) and blocking parameters (b) in case of no-load energizing of the power transformers

Были проведены серии вычислительных экспериментов для режимов КЗ в электроустановке и восстановления напряжения после отключения внешних повреждений. Изучалось поведение блокировки при возникновении и отключении как симметричных, так и несимметричных КЗ при наличии и отсутствии в токах аperiodических составляющих, а также с учетом степени насыщения ТТ. Результаты исследований для наиболее существенных с точки зрения функционирования блокировки режимов электроустановки приведены на рис. 2 и 3.

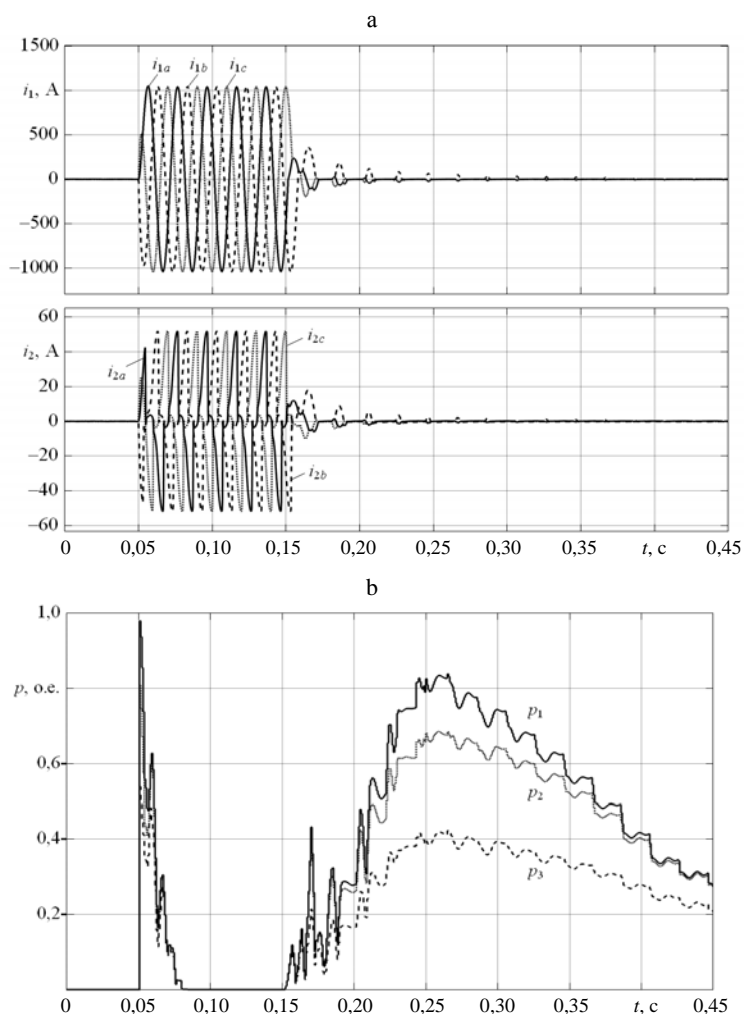


Рис. 2. Первичные i_1 , вторичные i_2 токи (а) и параметры блокировки (б) при симметричном коротком замыкании и после его отключения

Fig. 2. Primary i_1 , secondary i_2 currents (a) and blocking parameters (b) in case of symmetrical short circuit and after switching it off

При восстановлении напряжения после отключения внешних симметричных КЗ без апериодических составляющих в токах с входением ТТ в режим насыщения амплитуды первичного i_1 и вторичного i_2 БТН (рис. 2а) заметно меньше указанных амплитуд при включении ненагруженного трансформатора под напряжение (рис. 1а). Рассматриваемый режим сопровождается увеличением параметров блокировки p_1 , p_2 , p_3 с последующим их снижением по мере затухания БТН (рис. 2б). Характер изменения и уровни p_1 , p_2 , p_3 позволяют обеспечить действие блокировки.

Режим восстановления напряжения после отключения внешних несимметричных КЗ при наличии в токах апериодических составляющих (рис. 3а) и насыщении ТТ сопровождается более медленным нарастанием p_1 , p_2 , p_3 (рис. 3б), но их уровни создают возможность для срабатывания блокировки в начальный период БТН.

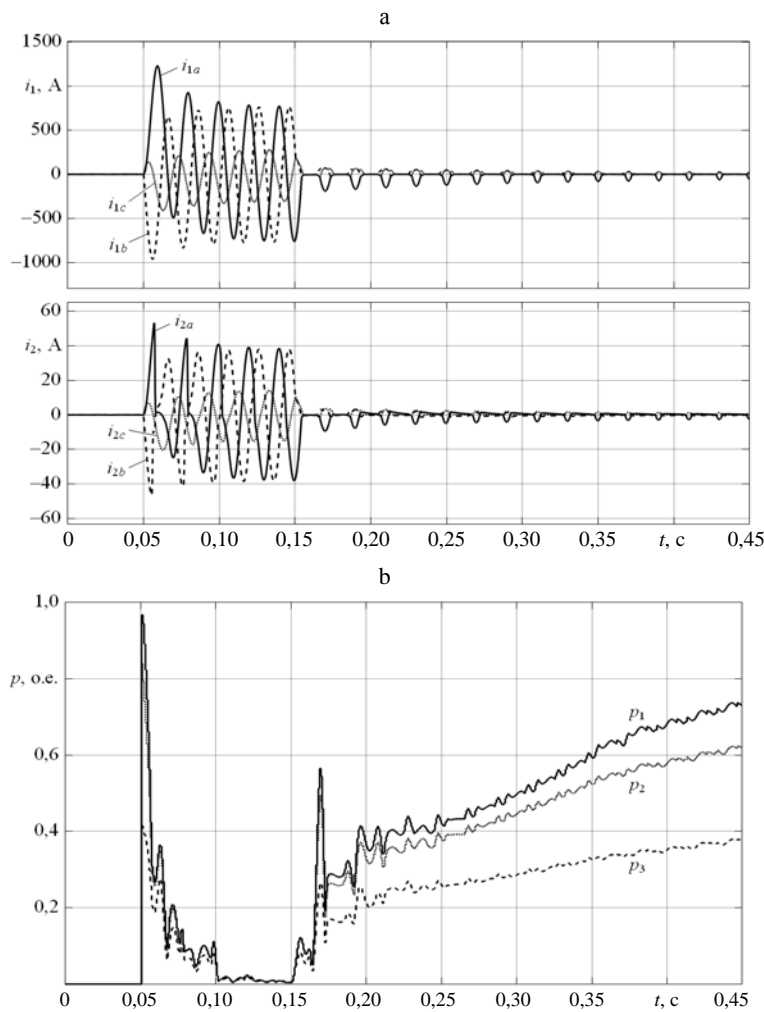


Рис. 3. Первичные i_1 , вторичные i_2 токи (а) и параметры блокировки (б) при несимметричном коротком замыкании и после его отключения
 Fig. 3. Primary i_1 , secondary i_2 currents (a) and blocking parameters (b) in case of asymmetric short circuit and after switching it off

При КЗ всех видов в электроустановке с апериодическими составляющими в токах и без них независимо от степени насыщения ТТ параметры блокировки p_1, p_2, p_3 спустя один-два периода промышленной частоты становятся равными нулю либо имеют несущественные значения (рис. 2, 3б). Последнее характерно для режимов КЗ с апериодическими составляющими в токах. В конечном итоге создаются условия для несрабатывания блокировки и обеспечивается возможность для действия защиты.

В начальный период КЗ всех видов в электроустановке имеют место выбросы параметров блокировки p_1, p_2, p_3 , которые с течением времени снижаются до нулевых или несущественных значений (рис. 2, 3б). Этот процесс является более длительным при наличии в токах апериодических составляющих (рис. 3б). При работе электроустановки до КЗ в нагрузочном режиме указанные выбросы значительно меньше как по уровню, так и

по длительности. Отмеченное выше будет приводить к кратковременному срабатыванию блокировки и вносить замедление в действие защиты, составляющее один-два периода промышленной частоты. Подчеркнем, что применительно к токовой защите это не следует рассматривать как существенный недостаток.

Причина появления выбросов p_1 , p_2 , p_3 в начальный период возникновения и отключения КЗ та же, что и при включении ненагруженного трансформатора под напряжение, о чем упоминалось ранее. Снижение уровней и длительности возникающих выбросов параметров блокировки может быть достигнуто за счет повышения быстродействия цифровых частотных фильтров путем реализации мероприятий программного характера, предложенных, например, в [11].

Результаты исследования поведения блокировки в других режимах работы электроустановки схожи с приведенными выше и не имеют существенных и принципиальных отличий. Предложенная реализация блокировки токовой защиты обеспечивает приемлемую идентификацию режимов БТН и КЗ в электроустановках с трансформаторами.

Анализ изменения параметров блокировки в различных режимах дает основание для выбора уставки ее срабатывания $k_{\text{бл}}$ в диапазоне 0,05–0,10, что в 1,5–3 раза меньше, чем в классической блокировке, основанной на оценке отношения второй и первой гармоник токов фаз [12].

ВЫВОДЫ

1. Проведенные методом вычислительного эксперимента исследования подтвердили принципиальную работоспособность предложенной блокировки токовой защиты электроустановок с трансформаторами, которая обеспечивает достоверную идентификацию БТН и КЗ вне зависимости от степени насыщения трансформаторов тока.

2. Анализ результатов выполненных исследований показал, что предложенный принцип блокировки от БТН при достаточно простой реализации имеет более высокую чувствительность в сравнении с классическим, основанным на оценке отношения второй и первой гармоник токов фаз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.
2. Чернобровов, Н. В. Релейная защита энергетических систем / Н. В. Чернобровов, В. А. Семенов. М.: Энергоатомиздат, 1998. 798 с.
3. Федосеев, А. М. Релейная защита электрических систем. Релейная защита сетей / А. М. Федосеев. М.: Энергоатомиздат, 1984. 520 с.
4. Устройство для максимальной токовой защиты элементов энергетических систем с силовыми трансформаторами: пат. Респ. Беларусь № 16960, МПК Н 02Н 3/08, Н 02Н 3/20 / Ф. А. Романюк, А. А. Тишечкин, Е. В. Глинский, А. Г. Сапожникова. Оpubл.: 30.04.2013.
5. Романюк, Ф. А. Принципы выполнения блокировки токовой защиты электроустановок с силовыми трансформаторами / Ф. А. Романюк, А. Г. Сапожникова // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 2. С. 101–107. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-2-101-107>.
6. Евдокимов, Ф. Е. Теоретические основы электротехники / Ф. Е. Евдокимов. М.: Высш. шк., 1971. С. 437–439.

7. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2011. 288 с.
8. Romaniuk, F. A. Digital Filters to Separate the First and Second Harmonics of Signals in Microprocessor-Bases Protection of Electrical Installations Equipped with Transformers / F. A. Romaniuk, V. S. Kachenya, K. Kierczynski // *Przegląd Elektrotechniczny*. 2018. Vol. 1, No 7. P. 48–51. <https://doi.org/10.15199/48.2018.07.11>.
9. Цифровой измерительный орган тока для функционирования в условиях глубокого насыщения трансформатора тока / Ю. В. Румянцев [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 6. С. 483–493. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-483-493>.
10. Сопьяник, В. X. Расчет и анализ переходных и установившихся процессов в трансформаторах тока и токовых цепях устройств релейной защиты / В. X. Сопьяник. Минск: БГУ, 2000. С. 108–118.
11. Формирование ортогональных составляющих входных сигналов в микропроцессорных защитах / Ф. А. Романюк [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 4. С. 328–339. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-328-339>.
12. Horowitz, S. H. *Power System Relaying* / S. H. Horowitz, A. G. Phadke, J. K. Niemira. 4th ed. N.-J.: John Wiley and Sons Ltd., 2014. 400 p.

Поступила 09.06.2020 Подписана в печать 18.08.2020 Опубликована онлайн 30.11.2020

REFERENCES

1. Shneerson E. M. (2007) *Digital Relay Protection*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 549 (in Russian).
2. Chernobrovov N. V., Semenov V. A. (1998) *Relay Protection of Electric Power Grids*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 798 (in Russian).
3. Fedoseev A. M. (1984) *Relay Protection of Electric Power Grids. Relay Protection of Electric Power Networks*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 520 (in Russian).
4. Romaniuk F. A., Tishechkin A. A., Glinskii E. V., Sapozhnikova A. G. (2013) *A Device for Overcurrent Protection Elements of Power Systems with Power Transformers*. Patent of Republic of Belarus No 16960 (in Russian).
5. Romaniuk F. A., Shapozhnikova A. G. (2017) Principles of Implementation of Blocking of Current Protection of Electrical Power Units with Transformers. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (2), 101–107. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-2-101-107> (in Russian).
6. Yevdokimov F. E. (1971) *Theoretical Foundations of Electrical Engineering*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 437–439 (in Russian).
7. Chernykh I. V. (2011) *Simulation of Electrical Devices in MatLab, SimPowerSystems and Simulink*. Moscow, DМК Press Publ.; St.-Petersburg, Piter Publ. 288 (in Russian).
8. Romaniuk F. A., Kachenya V. S., Kierczynski K. (2018) Digital Filters to Separate the First and Second Harmonics of Signals in Microprocessor-Bases Protection of Electrical Installations Equipped with Transformers. *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, 1 (7), 48–51. <https://doi.org/10.15199/48.2018.07.11>.
9. Rumiantsev Yu. V., Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V. (2018) Digital Current Measurement Element for Operation During Current Transformer Severe Saturation. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (6), 483–493. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-483-493> (in Russian).
10. Sop'yanik V. Kh. (2000) *The Calculation and Analysis of Transient and Steady State Processes in the Transformers and Current Circuits of Relay Protection Devices*. Minsk, Belarusian State University, 108–118 (in Russian).
11. Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V., Kachenya V. S. (2020) Orthogonal Components Forming of the Microprocessor-Bases Protection Input Signals. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (4), 328–339. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-328-339> (in Russian).
12. Horowitz S. H., Phadke A. G., Niemira J. K. (2014) *Power System Relaying*. 4th ed. John Wiley and Sons Ltd. 400.

Received: 9 June 2020

Accepted: 18 August 2020

Published online: 30 November 2020