

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-2-101-110>

УДК 621.316.925

Влияние переходной характеристики цифрового фильтра на поведение микропроцессорной токовой защиты

Ф. А. Романюк¹⁾, Ю. В. Румянцев¹⁾, В. Ю. Румянцев¹⁾, Е. А. Дерюгина¹⁾

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

Реферат. В микропроцессорной токовой защите в качестве информационных параметров тока могут использоваться мгновенные, амплитудные, действующие и средние значения. Они определяются в результате соответствующей обработки выходного сигнала цифрового фильтра. В неустановившихся режимах указанные параметры зависят от переходной характеристики фильтра. Поэтому поведение микропроцессорной токовой защиты при возникновении повреждений во многом определяется указанной характеристикой цифрового фильтра. В существующих защитах наиболее широко используются нерекурсивные фильтры Фурье и их разновидности. Главным недостатком данных фильтров является их сравнительно невысокое быстродействие. На их основе реализованы фильтры с более высокими динамическими свойствами, у которых частотные свойства сохранены. Исходя из сходства переходной характеристики, выделены следующие разновидности: фильтры с монотонной переходной характеристикой; фильтры с апериодической переходной характеристикой; фильтры с колебательной переходной характеристикой. Исследовано влияние названных фильтров на поведение микропроцессорной токовой защиты, содержащей основную быстродействующую и резервную медленнодействующую ступени. В результате выполненных исследований показано, что цифровые фильтры с монотонной переходной характеристикой обеспечивают устойчивое функционирование и селективное действие ступеней защиты при повреждениях на основном и смежном участках. Фильтры с апериодической переходной характеристикой способствуют неселективному действию быстродействующей ступени при коротких замыканиях в начале смежного участка. Фильтры с колебательной переходной характеристикой также способствуют неселективной работе быстродействующей ступени и могут обуславливать ее неустойчивое функционирование при токах короткого замыкания, близких по значениям к токам срабатывания и возврата. Медленнодействующая ступень защиты при всех видах переходных характеристик цифровых фильтров функционирует устойчиво и селективно.

Ключевые слова: микропроцессорная токовая защита, цифровые фильтры, монотонная, апериодическая и колебательная переходные характеристики, поведение ступеней защиты, неселективное действие, устойчивость функционирования

Для цитирования: Влияние переходной характеристики цифрового фильтра на поведение микропроцессорной токовой защиты / Ф. А. Романюк [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 2. С. 101–110. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-2-101-110>

Адрес для переписки

Румянцев Владимир Юрьевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 326-89-51
vrumiantsev@bntu.by

Address for correspondence

Rumiantsev Vladimir Yu.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 326-89-51
vrumiantsev@bntu.by

Influence of the Digital Filter Transient Characteristic on the Behavior of Microprocessor Current Protection

F. A. Romaniuk¹⁾, Yu. V. Rumiantsev¹⁾, V. Yu. Rumiantsev¹⁾, A. A. Dziaruhina¹⁾

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

Abstract. In microprocessor current protection, instantaneous, amplitude, current, and average values can be used as current information parameters. They are determined as a result of the appropriate processing of the digital filter output signal. In unsteady modes, the specified parameters depend on the transient characteristic of the filter. Therefore, the behavior of the microprocessor current protection in case of damage is largely determined by the specified characteristic of the digital filter. Non-recursive Fourier filters and their varieties are most widely used in existing defenses. The main disadvantage of these filters is their relatively low speed. Based on them, filters with higher dynamic properties are implemented, in which frequency properties are preserved. Based on the similarity of the transient characteristic, the following varieties are distinguished: filters with a monotonic transient characteristic; filters with an aperiodic transient characteristic; filters with an oscillatory transient characteristic. The effect of these filters on the behavior of a micro-processor current protection containing the main high-speed and backup slow-acting stages has been investigated. As a result of the mentioned investigations, it has been shown that digital filters with a monotonous transient characteristic provide stable functioning and selective action of protection steps in case of damage in the main and adjacent sections. Filters with an aperiodic transient characteristic contribute to the non-selective action of the high-speed stage in case of short circuits at the beginning of the adjacent section. Filters with an oscillatory transient characteristic also contribute to the non-selective operation of the high-speed stage and can cause its unstable operation at short-circuit currents close in values to the operating and return currents. The slow-acting protection stage functions steadily and selectively for all types of transient characteristics of digital filters.

Keywords: microprocessor current protection; digital filters; monotonic, aperiodic and oscillatory transient characteristics; behavior of protection stages; non-selective action; stability of operation

For citation: Romaniuk F. A., Rumiantsev Yu. V., Rumiantsev V. Yu., Dziaruhina A. A. (2025) Influence of the Digital Filter Transient Characteristic on the Behavior of Microprocessor Current Protection. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (2), 101–110. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-2-101-110> (in Russian)

Введение

Принцип действия микропроцессорной токовой защиты основан на сравнении контролируемого информационного параметра, характеризующего величину тока, с некоторым наперед заданным значением [1]. При превышении указанным параметром установленного значения происходит срабатывание защиты. В качестве информационных параметров тока защищаемого объекта могут использоваться его мгновенные, амплитудные, действующие и средние значения [2]. Они определяются в результате соответствующей обработки выходного сигнала цифрового фильтра (ЦФ), выделяющего из вторичного тока основную гармонику.

Функционирование ЦФ отличается инерционностью, а время установления его выходного сигнала ограничивается, как правило, длительностью одного периода основной частоты [3]. Вследствие этого переходные режимы ЦФ сопровождаются появлением в выходном сигнале динамической погрешности, изменяющейся с течением времени и полностью исчезающей при наступлении установившегося режима. Указанная погрешность сказывается на достоверности получения контролируемого информационного параметра и может создавать предпосылки для неправильного действия защиты.

Поскольку указанные выше информационные параметры, характеризующие ток, рассчитываются в результате цифровой обработки выходного сигнала ЦФ, в неустановившихся режимах они будут зависеть от переходной характеристики фильтра. По этой причине поведение микропроцессорной токовой защиты при возникновении повреждений во многом будет определяться переходной характеристикой ЦФ.

Основная часть

Рассматривая влияние ЦФ на функционирование микропроцессорной токовой защиты, будем принимать во внимание переходную характеристику фильтра при гармоническом входном воздействии. Применительно к токовой защите переходная характеристика представляет собой изменение во времени контролируемого информационного параметра, определяемого по выборкам выходного сигнала ЦФ, при внезапном коротком замыкании (КЗ) и скачке входного тока. Следует отметить, что данная переходная характеристика качественно будет повторять аналогичную характеристику собственно ЦФ.

В существующих микропроцессорных токовых защитах наиболее широко используются нерекурсивные ЦФ Фурье и их разновидности [4, 5]. Переходная характеристика указанных фильтров является монотонной, у которой первая производная $\frac{dX_{\text{вых}}(t)}{dt}$ не меняет знака, а время установления выходного сигнала t_y обычно не превышает периода основной частоты [6] (рис. 1, кривая 1).

Главным недостатком рассматриваемых ЦФ является их сравнительно невысокое быстродействие. Для повышения динамических свойств ЦФ Фурье в [7] предложено обрабатывать их выходной сигнал цифровым усилительным элементом с нелинейным коэффициентом усиления, называемым корректирующим. Практическая реализация данного предложения заключается в формировании эквивалентного выходного сигнала фильтра путем умножения сигнала на выходе ЦФ Фурье на корректирующий коэффициент [8]. Теоретические предпосылки и методика задания названного коэффициента подробно изложены в [9].

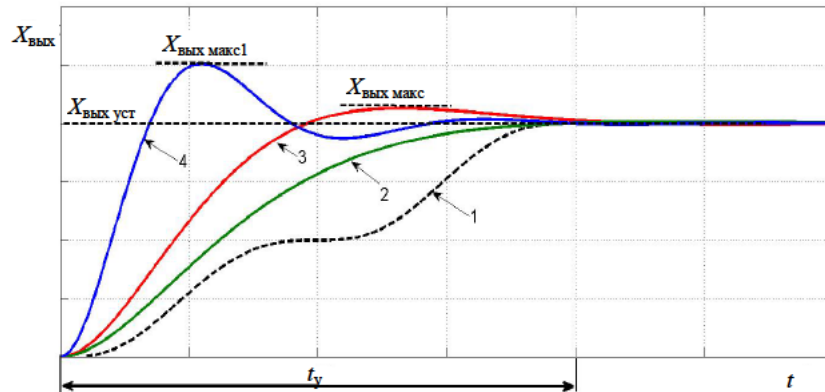


Рис. 1. Переходные характеристики цифрового фильтра

Fig. 1. Digital filters transient characteristics

В [9] представлены ЦФ, полученные на основе фильтров Фурье в результате реализации изложенных выше положений, с более высокими динамическими свойствами. Их быстродействие более чем в два раза выше, чем у ЦФ Фурье. При этом следует отметить, что частотные свойства ЦФ Фурье и разработанных фильтров на их основе являются практически одинаковыми. Положив в основу сходство вида переходной характеристики, можно выделить следующие разновидности представленных ЦФ:

- фильтры с монотонной переходной характеристикой, обладающие более высоким быстродействием по сравнению с ЦФ Фурье (рис. 1, кривая 2);
- цифровые фильтры с аperiodической переходной характеристикой

(рис. 1, кривая 3), у которой первая производная $\frac{dX_{\text{ВЫХ}}(t)}{dt}$ меняет знак не более одного раза за время переходного процесса. Они имеют более высокие динамические свойства по сравнению с ЦФ, у которых переходная характеристика является монотонной. Для ЦФ этой разновидности характерно перерегулирование, оцениваемое максимальным отклонением переходной характеристики $X_{\text{ВЫХ МАКС}}$ от установившегося значения выходного сигнала $X_{\text{ВЫХ УСТ}}$ [10]:

$$S = \frac{X_{\text{ВЫХ МАКС}} - X_{\text{ВЫХ УСТ}}}{X_{\text{ВЫХ УСТ}}} \cdot 100 \% \quad (1)$$

- фильтры с колебательной переходной характеристикой, у которых первая производная $\frac{dX_{\text{ВЫХ}}(t)}{dt}$ меняет знак периодически (рис. 1, кривая 4), обладающие наиболее высокими динамическими свойствами. Для этих фильтров также характерно перерегулирование, которое оценивается по первому максимуму выходного сигнала $X_{\text{ВЫХ МАКС1}}$. Важным параметром ЦФ

данной разновидности является колебательность, выражаемая числом полных колебаний переходной характеристики за время переходного процесса.

Следует отметить, что вид переходной характеристики и динамические свойства рассмотренных выше ЦФ главным образом зависят от реализованной аппроксимации корректирующего коэффициента. При этом указанные характеристика и свойства во многом будут определять в режиме повреждений поведение микропроцессорной токовой защиты, которое может оказаться нежелательным и даже недопустимым.

Рассмотрим поведение защиты A_1 , поочередно содержащей ЦФ с выделенными переходными характеристиками, при КЗ в различных точках сети, представленной на рис. 2.

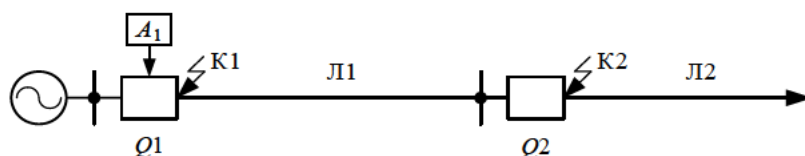


Рис. 2. Схема сети
 Fig. 2. Network diagram

При этом будем полагать, что в качестве контролируемого информационного параметра используется действующее значение тока, а A_1 содержит основную быстродействующую ступень и резервную медленнодействующую ступень, осуществляющую ближнее и дальнее резервирование [11].

На рис. 3 показано взаимное расположение трех видов переходных характеристик ЦФ при максимальном входном сигнале, пропорциональном току внезапного КЗ при повреждении в точке К1.

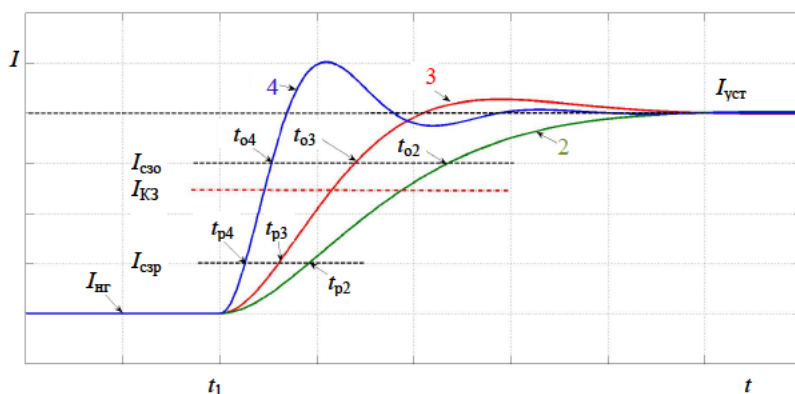


Рис. 3. К оценке поведения защиты с различными цифровыми фильтрами
 Fig. 3. Towards the behavior of protection with different digital filters

В нормальном режиме до момента времени t_1 выходной сигнал ЦФ с любой переходной характеристикой пропорционален току нагрузки $I_{шт}$,

от которого все ступени защиты отстроены. При этом ток срабатывания основной ступени $I_{с30} > I_{нт}$ и ток срабатывания резервной ступени $I_{с3р} > I_{нт}$.

Быстродействующая ступень защиты также отстроена от повреждений в начале смежного участка Л2, т. е. от КЗ в точке К2 $I_{с30} > I_{КЗ К2}$.

При возникновении в момент времени t_1 КЗ выходной сигнал ЦФ начинает нарастать, изменяясь в соответствии с видом переходной характеристики фильтра (рис. 3). После превышения этим сигналом $I_{с3р}$ в моменты времени $t_{р4}$, или $t_{р3}$, или $t_{р2}$, определяемые видом указанной характеристики, срабатывают измерительные органы тока резервной ступени защиты и запускают орган выдержки времени. При дальнейшем увеличении выходного сигнала ЦФ, после превышения им $I_{с30}$ в моменты времени t_{04} , или t_{03} , или t_{02} , которые также зависят от вида переходной характеристики, срабатывают измерительные органы тока быстродействующей ступени защиты, разрешающие реализацию исполнительной команды.

По мере удаления точки повреждения от места установки защиты A_1 происходит снижение тока КЗ и его установившегося значения $I_{уст}$. Однако вполне очевидно, что при этом будет обеспечиваться четкое поведение всех ступеней микропроцессорной защиты при переходной характеристике ЦФ любого вида.

Особые условия для функционирования защиты с соответствующим видом указанной характеристики ЦФ будут возникать при повреждениях с токами КЗ, находящимися вблизи областей срабатывания и возврата ступеней.

Следует отметить, что при использовании ЦФ с монотонной переходной характеристикой все ступени токовой защиты в любых условиях функционируют устойчиво и действуют селективно.

При апериодической переходной характеристике ЦФ в случае повреждений с установившимся током КЗ $I_{КЗу}$, несколько меньшим токов срабатывания $I_{с30}$ и возврата $I_{во}$, из-за перерегулирования возможно срабатывание измерительного органа быстродействующей ступени (рис. 4).

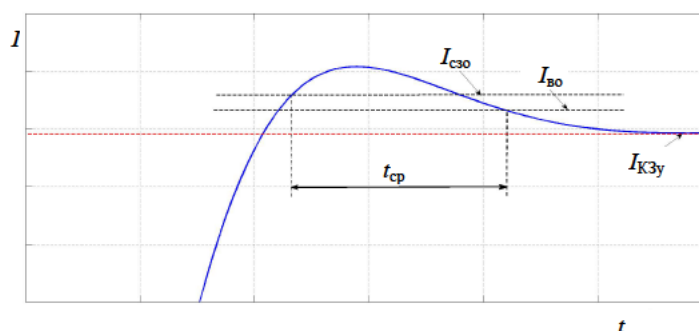


Рис. 4. К оценке поведения защиты при апериодической переходной характеристике

Fig. 4. Towards the protection behavior in case of aperiodic transient characteristic

Указанный орган в течение времени t_{cp} ЦФ будет находиться в срабатанном состоянии и определять поведение ступени защиты в целом. Такие ситуации могут возникать при повреждениях в конце участка Л1 за пределами зоны действия быстродействующей ступени защиты A_1 . При этом в случае КЗ в начале смежного участка Л2 в точке К2 возможно неселективное действие защиты.

Принимая во внимание, что $I_{сзо}$ выбирается из условия превышения его значением тока КЗ в точке К2 не менее чем в 1,1 раза [12], неселективного действия ступени не будет, если перерегулирование S не выходит за пределы 10 %. В противном случае исключение неселективной работы быстродействующей ступени может быть достигнуто за счет увеличения тока срабатывания $I_{сзо}$, что повлечет за собой сокращение зоны ее действия.

При корректно выбранных параметрах срабатывания медленнодействующей ступени защиты, исходя из обеспечения достаточной чувствительности, ток срабатывания $I_{сзр}$ более чем в 1,5 раза будет меньше минимального тока КЗ для зоны ближнего резервирования (участок Л1) и не менее чем в 1,2 раза для зоны дальнего резервирования (участок Л2) [12]. Благодаря этому работа данной ступени защиты в указанных выше особых условиях маловероятна, если не исключена вообще.

При колебательной переходной характеристике ЦФ функционирование быстродействующей ступени защиты в особых условиях будет в основном таким же, как и при апериодической. Возможность неселективного действия данной ступени достаточно оценивать по первому максимуму выходного сигнала фильтра (рис. 1). Следует отметить, что в особых условиях функционирование ее измерительного органа тока может быть неустойчивым (рис. 5). При этом выходной сигнал ЦФ, пропорциональный току КЗ $I_{КЗ}$, может превышать ток срабатывания $I_{сзо}$ и опускаться ниже тока возврата $I_{во}$. Параметр P , отражающий состояние измерительного органа, принимает значения: 1 – срабатывание в течение времени t_{cp} ; 0 – несрабатывание в течение времени $t_{нс}$.

Нарушение устойчивости функционирования органа выражается в его переключении из состояния срабатывания в состояние несрабатывания, и наоборот. Предотвращение неустойчивой работы в особых условиях может быть обеспечено за счет уменьшения тока возврата. Учитывая, что токи возврата и срабатывания связаны соотношением $I_{во} = k_{в}I_{сзо}$, где $k_{в}$ – коэффициент возврата, предложенное выше достигается выбором меньшего значения $k_{в}$.

При использовании ЦФ с колебательной переходной характеристикой особых условий в работе медленнодействующей ступени защиты не возникает, благодаря чему она функционирует устойчиво и с требуемой селективностью.

Приведенные положения и рекомендации основываются на результатах научных исследований, полученных авторами с использованием метода вычисленного эксперимента при синусоидальных или близких к ним воздействиях.

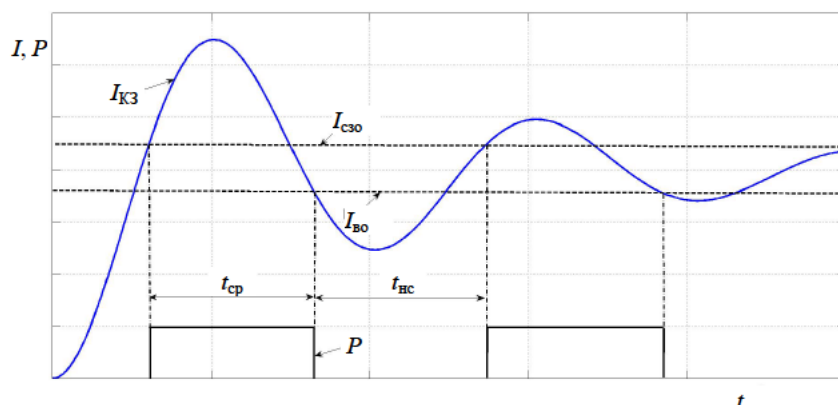


Рис. 5. К оценке поведения защиты при колебательной переходной характеристике цифрового фильтра

Fig. 5. Towards the protection behavior in case of oscillatory transient characteristics of digital filters

При сложных входных сигналах, приближенных к реальным вторичным токам трансформаторов тока, общие тенденции влияния переходных характеристик ЦФ на поведение микропроцессорной токовой защиты существенных изменений не претерпевают.

ВЫВОДЫ

1. Цифровые фильтры с монотонной переходной характеристикой обеспечивают устойчивое функционирование и селективное действие микропроцессорной токовой защиты при повреждениях на основном и смежном участках.
2. Фильтры с аperiodической переходной характеристикой способствуют неселективной работе быстродействующей ступени защиты при коротких замыканиях в начале смежного участка.
3. Цифровые фильтры с колебательной переходной характеристикой могут обуславливать неустойчивое функционирование быстродействующей ступени защиты в особых условиях, когда токи КЗ близки по значениям к токам срабатывания и возврата.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федосеев, А. М. Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей: учеб. пособие для вузов / А. М. Федосеев. М.: Энергоатомиздат, 1984. 520 с.
2. Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.
3. Методика повышения быстродействия измерительных органов микропроцессорных защит электроустановок / Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев, И. В. Новаш, Ю. В. Румянцев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 5. С. 403–412. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-403-412>.

4. Фадке, А. Г. Компьютерная релейная защита в энергосистемах / А. Г. Фадке, Д. С. Торп. 2-е изд. М.: Техносфера, 2019. 370 с.
5. Испытания микропроцессорных токовых защит: теория, моделирование, практика / И. В. Новаш, Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев, Ю. В. Румянцев. Минск: БНТУ, 2021. 168 с.
6. Формирование ортогональных составляющих входных сигналов в микропроцессорных защитах / Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев, Ю. В. Румянцев, В. С. Каченя // 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>.
7. Совершенствование алгоритма формирования ортогональных составляющих входных величин в микропроцессорных защитах / Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев, Ю. В. Румянцев, И. В. Новаш // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 2. С. 95–108. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-2-95-108>.
8. Формирование ортогональных составляющих входных токов величин в микропроцессорных защитах электроустановок / Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев, Ю. В. Румянцев, И. В. Новаш // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 3. С. 191–201. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-191-201>.
9. Румянцев, Ю. В. Формирование информационных составляющих входных величин в цифровых органах релейной защиты / Ю. В. Румянцев, В. Ю. Румянцев, Ф. А. Романюк. Минск: БНТУ, 2024. 175 с.
10. Ерофеев, А. А. Теория автоматического управления / А. А. Ерофеев. СПб.: Политехника, 2022. 302 с.
11. Гельфанд, Я. С. Релейная защита распределительных сетей сетей / Я. С. Гельфанд. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1987. 368 с.
12. Чернобровов, Н. В. Релейная защита электроэнергетических систем: учеб. пособие для техникумов / Н. В. Чернобровов, В. А. Семенов. М.: Энергоатомиздат, 2007. 800 с.

Поступила 27.12.2024 Подписана в печать 27.02.2025 Опубликовано онлайн 31.03.2025

REFERENCES

1. Fedoseev A. M. (1984) *Relay Protection of Electric Power Systems. Relay Protection of Networks*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 520 (in Russian)
2. Schneerson E. M. (2007) *Digital Relay Protection*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 549 (in Russian).
3. Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V., Rumiantsev Yu. V. (2019) Technique of Performance Improvement of the Microprocessor-Based Protection Measuring Element. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (5), 403–412. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-403-412> (in Russian).
4. Phadke A. G., Thorp J. S. (2009) *Computer Relaying for Power Systems*. 2nd ed. Chichester, John Wiley & Sons, Ltd., 326. <https://doi.org/10.1002/9780470749722>.
5. Novash I. V., Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V. (2021) *Testing of Microprocessor Current Protections: Theory, Modeling, Practice*. Minsk, BNTU. 168 (in Russian).
6. Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V., Kachenya V. S. (2020) Orthogonal Components Forming of the Microprocessor-Based 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).
7. Romaniuk F. A., Rumiantsev Yu. V., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V. (2021) Improvement of Algorithm for Formation of Orthogonal Components of Input Quantities in Microprocessor

- Protection. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (2), 95–108. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-2-95-108> (in Russian).
8. Romaniuk F. A., Rumiantsev Yu. V., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V. (2021) Formation of Orthogonal Components of Input Currents in Microprocessor Protections of Electrical Equipment. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (3), 191–201. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-191-201> (in Russian).
 9. Rumiantsev Yu. V., Rumiantsev V. Yu., Romaniuk F. A. (2024) *Formation of Information Components of Input Quantities in Digital Relay Protection Devices*. Minsk, BNTU. 175 (in Russian).
 10. Erofeev A. A. (2008) *Automatic Control Theory*. Saint Petersburg, Politekhnik Publ. 302 (in Russian).
 11. Gel'fand Ya. S. *Relay Protection of Distribution Networks*. 2nd Ed. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 368 p. (in Russian).
 12. Chernobrovov N. V., Semenov V. A. (1998) *Relay Protection of Electric Energy Grids: Textbook for Technical Schools*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 800 (in Russian).

Received: 27 December 2024 Accepted: 27 February 2025 Published online: 31 March 2025