

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-5-419-425>

УДК 621.316.925

## Повышение устойчивости функционирования измерительных органов тока микропроцессорных защит

Чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. Ф. А. Романюк<sup>1)</sup>,  
канд. техн. наук, доц. В. Ю. Румянцев<sup>1)</sup>, канд. техн. наук Ю. В. Румянцев<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022  
Belarusian National Technical University, 2022

**Реферат.** В измерительных органах тока микропроцессорных защит контролируемые величинами обычно являются действующие значения основной гармоники тока. Они определяются по ортогональным составляющим входных сигналов, которые формируются цифровыми фильтрами Фурье. Вследствие инерционности указанных фильтров время получения достоверных действующих значений составляет один и более периодов входного тока, что преимущественно определяет быстродействие измерительного органа. При отклонении частоты входного сигнала от номинальной его действующие значения приобретают колебательный характер. В результате этого может иметь место неустойчивое функционирование указанного органа при величинах тока, находящихся вблизи областей срабатывания и возврата. Для повышения быстродействия измерительного органа предложено определить действующее значение тока путем умножения его величины, полученной с использованием ортогональных составляющих Фурье, на корректирующий коэффициент. Для обеспечения устойчивого функционирования органа тока рекомендовано осуществлять фильтрацию действующего значения тока с помощью цифрового фильтра скользящего среднего. Оценка эффективности предложенных решений выполнялась методом вычислительного эксперимента с использованием среды динамического моделирования MATLAB-Simulink. Предложенные решения обеспечивают повышение быстродействия измерительных органов тока и их устойчивое функционирование при отклонении частоты от номинальной. В результате проведенных исследований установлено, что предложенный цифровой измерительный орган тока в сравнении с органом на основе алгоритма Фурье имеет быстродействие в 1,4–2 раза больше. Кроме того, он устойчиво функционирует как при условии, когда ток срабатывания меньше тока повреждения, так и в случае, когда указанные токи соизмеримы при отклонении частоты от номинальной на  $\pm 2$  Гц. Предложенный цифровой измерительный орган может быть использован во многих микропроцессорных токовых защитах электроустановок.

**Ключевые слова:** измерительный орган тока, устойчивость функционирования, быстродействие, вычислительный эксперимент, MATLAB-Simulink

**Для цитирования:** Романюк, Ф. А. Повышение устойчивости функционирования измерительных органов тока микропроцессорных защит / Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев, Ю. В. Румянцев // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 5. С. 419–425. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-5-419-425>

## Improving of Functioning Stability of Current Measuring Elements in Microprocessor Protections

F. A. Romaniuk<sup>1)</sup>, V. Yu. Rumiantsev<sup>1)</sup>, Yu. V. Rumiantsev<sup>1)</sup>

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

**Abstract.** In the measuring elements of the current of microprocessor protection, the controlled values are usually the effective values of the fundamental harmonic of the currents. They are determined by the orthogonal components of the input

### 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

signals, which are formed by digital Fourier filters. Due to the inertia of these filters, the time for obtaining reliable effective values is one or more periods of the input current, which mainly determines the speed of the measuring element. When the frequency of the input signal deviates from the nominal value, its effective values become oscillatory. As a result of this, unstable functioning of the specified organ may occur at current values that are close to the operation and return areas. To increase the speed of the measuring body, it is proposed to determine the effective value of the current by multiplying its value obtained using the orthogonal Fourier components by a correction factor. To ensure the stable functioning of the current organ, it is recommended to filter the effective current value using a digital moving average filter. Evaluation of the effectiveness of the proposed solutions has been carried out by the method of computational experiment using the dynamic simulation environment MATLAB-Simulink. The proposed solutions provide an increase in the speed of the current measuring organs and their stable operation when the frequency deviates from the nominal. As a result of the research, it has been found that the proposed digital current measuring organ in comparison with an organ based on the Fourier algorithm has a speed of 1.4-2 times greater. In addition, it functions stably both under the condition when the tripping current is less than the fault current, and in the case when the indicated currents are comparable when the frequency deviates from the nominal by  $\pm 2$  Hz. The proposed digital measuring body can be used in many microprocessor-based current protection of electric installations.

**Keywords:** current measuring element, stability of functioning, speed of operation, computational experiment, MATLAB-Simulink

**For citation:** Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V. (2022) Improving of Functioning Stability of Current Measuring Elements in Microprocessor Protections. *Science and Technique*. 21 (5), 419–425. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-5-419-425> (in Russian)

## Введение

В основе действия измерительных органов тока (ИОТ) лежит принцип сравнения контролируемого информационного параметра, характеризующего входной сигнал, с заранее заданными значениями. По результатам этого сравнения фиксируется сработавшее либо несработавшее состояние ИОТ.

Измерительные органы тока с учетом свойств микропроцессорной защиты, в которой они используются, должны, помимо других требований, иметь высокое быстродействие и обеспечивать устойчивое состояние при контролируемом информационном параметре, находящемся вблизи областей срабатывания и возврата. В ИОТ микропроцессорных защит контролируемыми информационными параметрами, как правило, являются действующие значения основной гармоники токов. Для их определения широко используются ортогональные составляющие (ОС) входных сигналов. Формирование ОС указанных сигналов осуществляется главным образом с помощью дискретного преобразования Фурье (ДПФ) и его модификаций [1]. Реализация ДПФ в большинстве микропроцессорных защит производится нерекурсивными цифровыми фильтрами (ЦФ) в силу их простоты и устойчивости функционирования.

Вследствие инерционности ЦФ время получения достоверных значений действующих величин основной гармоники входного тока затягивается до одного и более периодов, что преимущественно определяет быстродействие ИОТ. Для его повышения в [2] предложено вычислять указанные величины по эквивалентным ОС, которые формируются на основе ОС Фурье.

При отклонении частоты входного тока от номинальной действующие значения эквивалентного сигнала приобретают незатухающий колебательный характер [3]. Это приводит к неустойчивому функционированию ИОТ при величинах указанного тока, находящихся вблизи областей срабатывания и возврата. В результате может возникнуть необходимость введения ограничений на величину коэффициента возврата ИОТ, что, в конечном итоге, явится сдерживающим фактором в обеспечении высокой чувствительности микропроцессорной защиты. Для устранения данного недостатка могут использоваться формирователи ОС с соответствующей адаптивностью [4] либо специализированные алгоритмы с коррекцией коэффициентов ЦФ при отклонении частоты от номинальной. Наиболее простым решением, позволяющим уменьшить амплитуду колебаний действующих значений эквивалентного сигнала, является использование цифрового фильтра скользящего среднего [5].

## Основная часть

Для повышения динамических свойств ИОТ реализуется следующая последовательность действий.

С использованием нерекурсивных ЦФ Фурье по выборкам входного тока  $i_n$  выделяются его косинусная  $i_{cn}$  и синусная  $i_{sn}$  ОС основной частоты:

$$\begin{aligned} i_{cn} &= \sum_{n=0}^{N-1} a_{cn} i_n; \\ i_{sn} &= \sum_{n=0}^{N-1} a_{sn} i_n, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $N$  – число выборок на периоде основной частоты;  $a_{cn}$ ,  $a_{sn}$  – коэффициенты косинусного и синусного ЦФ соответственно.

Вычисляется амплитуда основной гармоники тока для произвольной выборки  $n$

$$I_{mn} = \sqrt{i_{cn}^2 + i_{sn}^2}. \quad (2)$$

Амплитуда  $I_{mn}$  пропускается через цифровое усилительное звено с нелинейным коэффициентом усиления, который в дальнейшем будем называть корректирующим  $k_{rn}$ . В результате этого формируется амплитуда эквивалентного тока

$$I_{meqn} = k_{rn} I_{mn}. \quad (3)$$

Для получения положительного эффекта, помимо прочего,  $k_{rn}$  задается с учетом характера изменения во времени амплитуды  $I_{mn}(t)$ . При этом необходимо обеспечить: в случае возрастания  $I_{mn}(t)$   $k_{rn} > 1$ ; когда уровень  $I_{mn}(t)$  не изменяется,  $k_{rn} = 1$ ; при снижении  $I_{mn}(t)$   $k_{rn} < 1$ .

Перечисленным выше характерным изменениям  $I_{mn}(t)$  присваивается признак  $l$ . Для этой цели фиксируются две смежные выборки амплитуды основной гармоники тока  $I_{mn}$  и  $I_{m(n-1)}$ , по которым с использованием методики и выражений, приведенных в [6, 7], вычисляется признак  $l$ . В результате, если  $l = 1$ , это свидетельствует о возрастании  $I_{mn}(t)$ , при  $l = 0$   $I_{mn}(t)$  не изменяется, а когда  $l = -1$ , это указывает на снижение  $I_{mn}(t)$ .

Выражения, по которым рассчитываются численные значения  $k_{rn}$ , определяются призна-

ком  $l$  и соотношением амплитуд сложного входного тока  $I_{mnd}$  и его основной гармоники  $I_{mn}$ . При этом амплитуда  $I_{mnd}$  для произвольной выборки  $n$  вычисляется по выражению

$$I_{mnd} = \sqrt{\frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i_n^2}. \quad (4)$$

На основе проведенных исследований [2], а также изложенных в [8] результатов для определения  $k_{rn}$  предлагаются следующие соотношения:

$$\begin{aligned} k_{rn} &= \frac{I_{mnd}^2}{I_{mn}^2} \text{ при } l = 1; \\ k_{rn} &= 1 \text{ при } l = 0; \\ k_{rn} &= \frac{I_{mn}^3}{I_{mnd}^3} \text{ при } l = -1. \end{aligned} \quad (5)$$

Принимая во внимание изложенное выше, с учетом (5) общее выражение для  $k_{rn}$  запишем в виде

$$k_{rn} = (|l| + 1) \frac{I_{mnd}^2}{I_{mn}^2} + (|l| - 1) \frac{I_{mn}^3}{I_{mnd}^3} + 1 - |l|. \quad (6)$$

Реализация предложенного алгоритма и использование в качестве контролируемого информационного параметра эквивалентного тока позволят улучшить динамику ИОТ. Однако при отклонении частоты входного тока от номинальной амплитуда эквивалентного тока изменяется во времени с незатухающими колебаниями и содержит при длине ЦФ Фурье  $N = 24$ , помимо постоянной составляющей, наиболее ярко выраженную вторую гармонику [9]. Амплитуда составляющей двойной частоты в этом случае при синусоидальном входном токе не превышает величину [9]

$$\Delta I_{\max} = |0,15 - 0,03f| I_{meq}, \quad (7)$$

где  $f$  – частота входного тока.

Однако ее наличие может обуславливать неустойчивое функционирование ИОТ при величинах эквивалентного тока, находящихся около областей срабатывания и возврата.

Наиболее рациональным решением, обеспечивающим уменьшение амплитуды колебательного процесса, является использование ЦФ скользящего среднего, который формирует амплитуду подлежащего сравнению тока в соответствии с выражением [10]

$$I_{mrn} = I_{mr(n-1)} + \frac{1}{M} (I_{meqn} - I_{meq(n-m)}), \quad (8)$$

где  $M$  – количество используемых при реализации ЦФ выборок из общего числа  $N$ .

Решение задачи синтеза ЦФ скользящего среднего состоит в выборе оптимального  $M$ , при котором обеспечивается приемлемая степень снижения колебаний с выполнением условия  $M < N$ . Следует учитывать, что с увеличением  $M$  амплитуда колебательного процесса уменьшается, однако при этом возрастает вносимая в установление  $I_{mrn}$  задержка:

$$t_y = M\Delta t, \quad (9)$$

где  $\Delta t$  – шаг дискретизации входного тока.

На рис. 1 представлены амплитудно-частотные характеристики  $A(f)$  ЦФ скользящего среднего при  $N = 24$  и различных  $M$ . Их анализ позволяет определить оптимальное  $M$ , которое с учетом изложенного выше принято равным 10.

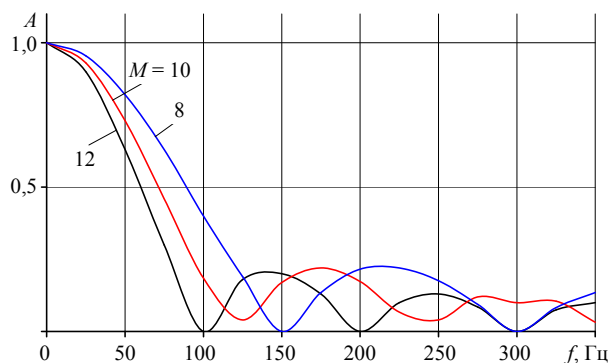


Рис. 1. Амплитудно-частотные характеристики цифрового фильтра скользящего среднего

Fig. 1. Frequency response of digital moving average filter

По амплитудному значению тока  $I_{mrn}$  определяется его действующее значение, которое сравнивается с параметрами срабатывания и возврата. По результатам сравнения вырабатывается исполнительная команда о сработавшем или несработавшем состоянии ИОТ.

Благодаря использованию ЦФ скользящего среднего будет обеспечено повышение устойчивости функционирования ИОТ при отклонении частоты тока от номинальной.

### Моделирование

Оценка эффективности предложенных решений, направленных на совершенствование ИОТ микропроцессорных защит, выполнялась с использованием цифровой модели, реализованной в среде динамического моделирования MATLAB-Simulink. С этой целью в системе динамического моделирования MATLAB-Simulink-SimPowerSystems реализована структура модели энергосистемы [11] для испытаний ИОТ (рис. 2а), включающая в себя модель энергосистемы, модель трансформатора тока (ТТ), которая позволяет воспроизводить насыщение его магнитной системы, нагрузку, блок задания вида короткого замыкания (КЗ), а также испытуемый блок ИОТ – Max Relay.

**Энергосистема (System)** представляется блоком модели трехфазного источника напряжения *3-Phase Source* из библиотеки SimPowerSystems (SPS).

**Трехфазная группа ТТ** с соединением вторичных обмоток и нагрузок по схеме «звезда с нулевым проводом» (блок *CT*). Поскольку библиотечный блок ТТ в библиотеке SPS отсутствует, из стандартных блоков Simulink была создана модель ТТ, в которой все геометрические параметры, необходимые для моделирования ТТ, рассчитываются по его паспортным данным [12].

**Короткое замыкание** (блок *Three-Phase Fault*) представляется блоком модели из библиотеки SPS, который моделирует трехфазное устройство, замыкающее фазы между собой, а также на землю.

**Нагрузка** (блок *Three-Phase Series RLC Load*) задается активными и реактивными мощностями.

**Модель ИОТ** выполнена в соответствии с вышеизложенной методикой и реализована в виде подсистемы (*Max Relay*).

В составной блок *ph. A signals* передаются все моделируемые сигналы, которые выводятся на осциллограф Scope.

На рис. 2б приведена структурная схема ИОТ фазы *A* (подсистема *Max Relay*), состоящая из библиотечных блоков среды моделирования MATLAB-Simulink.

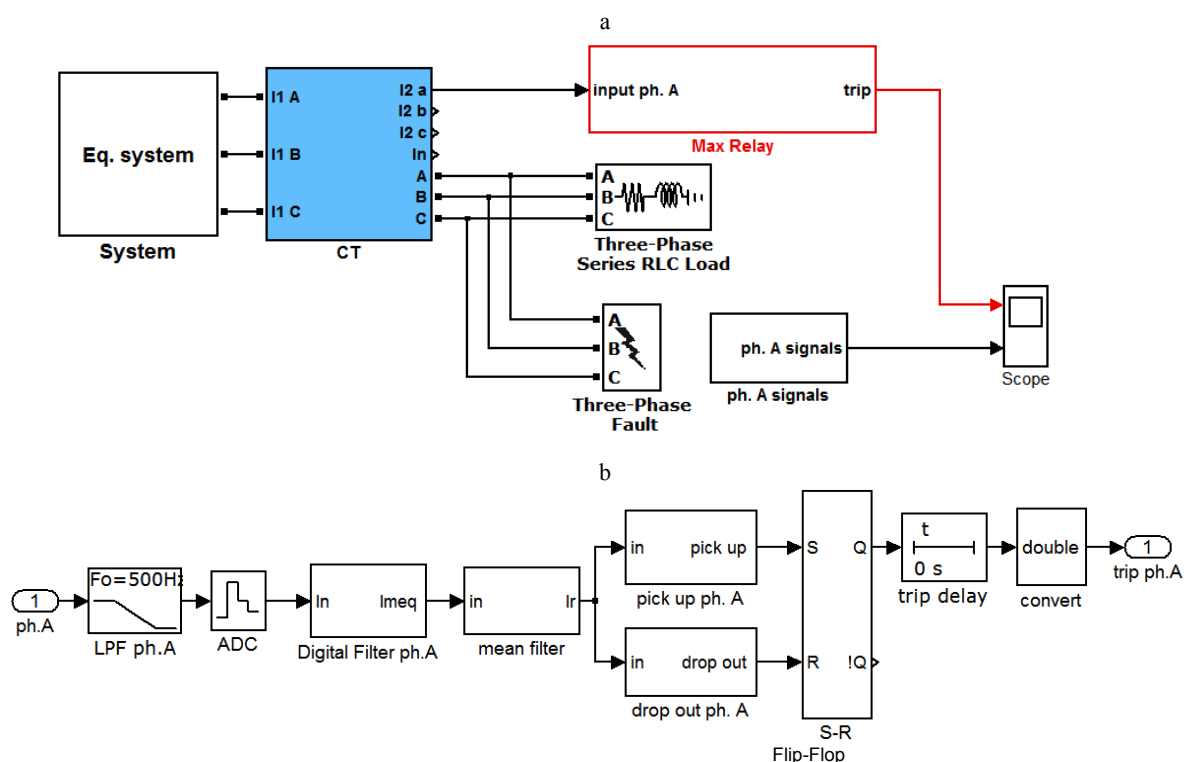


Рис. 2. Структура модели энергосистемы (а) и структурная схема измерительного органа тока фазы А (б)

Fig. 2. Structure of power system model (a) and block diagram of phase current measuring organ A (b)

Вторичный ток ТТ, являющийся входным сигналом для ИОТ, подается на антиалязинговый фильтр нижних частот (ФНЧ) второго порядка (*LPF ph. A*), частота среза которого выбирается равной половине частоты дискретизации. Выход ФНЧ соединяется с аналого-цифровым преобразователем (блок *ADC*), преобразующим непрерывный выходной сигнал ФНЧ в дискретный с числом отсчетов на период основной частоты, равным 24. В подсистеме *Digital Filter ph. A* определяется амплитуда эквивалентного тока в соответствии с (3). Далее эквивалентный ток  $I_{meq}$  поступает на вход ЦФ скользящего среднего (*mean filter*), где в соответствии с (8) формируется амплитудное, а затем и действующее значение выходного тока  $I_{mr}$ , в котором колебания подавлены до приемлемого уровня.

Для надежного функционирования ИОТ необходимо, чтобы условие его пуска (возврата) выполнялось в течение определенного времени. Эти операции реализуют блоки «Пуск» / «Возврат» (*pick up ph. A* / *drop out ph. A*). Если условие пуска (возврата) выполняется (не выполняется), то на выходе соответствующего блока формируются логические сигналы 1 (0). Сигнал с выхода блока «Пуск» поступает

на *S*-вход (установить), а сигнал с выхода блока «Возврат» – на *R*-вход (сбросить) *RS*-триггера, представленного блоком модели *S-R Flip-Flop*. Прямой выход *RS*-триггера *Q* подключается к блоку «Выдержка времени», представленному *trip delay*, который начинает отсчет выдержки времени (при условии ее задания), если на его входе присутствует логическая 1. Блок *convert* реализован стандартным блоком *Data Type Conversion*, который преобразует логический сигнал в сигнал удвоенной точности *double*.

На рис. 3 приведены результаты функционирования ИОТ, реализованного в соответствии с рассмотренной структурной схемой (рис. 2b), в сравнении с ИОТ, выполненным по такой же схеме, но на основе ЦФ Фурье (в дальнейшем – ИОТ Фурье) при тестовом воздействии, приближенном к реальному вторичному току ТТ.

В промежутке времени  $t = 0-0,1$  с моделируется доаварийный режим, при котором вторичный ток ТТ синусоидален. В момент времени  $t = 0,1$  с происходит трехфазное КЗ – аварийный режим, при котором форма вторичного тока ТТ искажается (рис. 3, кривая 1). Кривая 2 отражает работу ИОТ Фурье, а 4 – функционирование предлагаемого ИОТ.

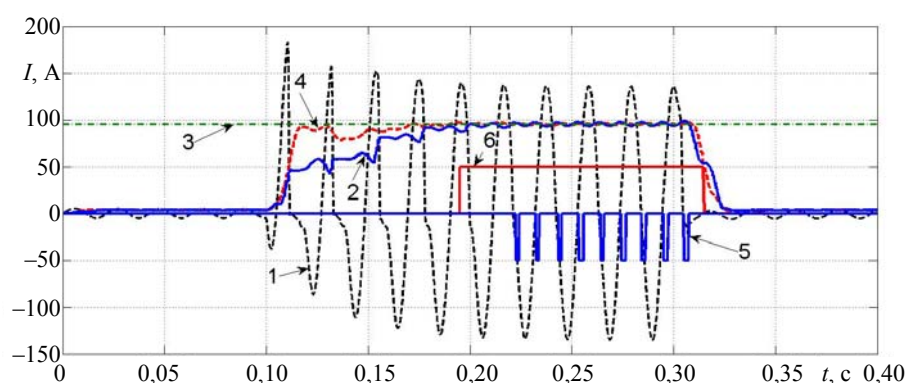


Рис. 3. Результаты моделирования двух измерительных органов тока – предлагаемого и выполненного на основе цифровых фильтров Фурье

Fig. 3. Simulation results of two current measuring elements – proposed and implemented on the basis of digital Fourier filters

Срабатывание ИОТ – *trip* (рис. 3, кривые 5, 6) происходит при условии превышения контролируемым сигналом уставки срабатывания (прямая 3) через время, установленное параметром успешных отсчетов, превышающих уставку срабатывания (в приведенных расчетах равно трем). Параметр *trip* принимает значение 1 – срабатывание ИОТ и 0 – несрабатывание ИОТ (для наглядности эти значения умножены на  $\pm 50$ ). На рис. 3 показан случай, когда КЗ, помимо искажения формы кривой тока, сопровождается понижением частоты до 48 Гц, что проявляется в колебательном характере действующего значения выходного сигнала ИОТ Фурье. При этом, если ток КЗ близок к уставке срабатывания ИОТ (принята равной 95 А), как изображено на рис. 3, нарушается устойчивость функционирования последнего, которая выражается в регулярном переключении параметра *trip* у ИОТ Фурье (рис. 3, кривая 5) из состояния несрабатывания в состояние срабатывания и наоборот.

Предлагаемый ИОТ выполнен с использованием сглаживающего ЦФ скользящего среднего, который снижает уровень колебаний выходного сигнала. При этом несколько ухудшается динамика работы ИОТ при возрастании и уменьшении сигнала. Однако при использовании для его реализации 10 из 24 выборок на период основной частоты снижение динамики не является критичной. Поэтому предлагаемый ИОТ будет устойчиво функционировать как при условии, когда ток срабатывания защиты и ток КЗ соизмеримы, так и в случае, когда ток срабатывания меньше тока КЗ. В последнем

случае, если понизить уставку срабатывания, например, до 75 А (мысленно провести прямую 3 на указанном уровне), то время нарастания выходных сигналов рассматриваемых ИОТ до уровня срабатывания у предлагаемого ИОТ наступает в момент времени, равный 0,12 с, а у ИОТ Фурье – 0,16 с, т. е. последний срабатывает на два периода промышленной частоты позже.

## ВЫВОДЫ

1. Предложены алгоритмические решения для построения быстродействующих цифровых измерительных органов тока, обеспечивающие их устойчивое функционирование при отклонении частоты от номинального значения.
2. Реализованные на основе разработанных и исследованных решений цифровые измерительные органы тока могут быть использованы во многих микропроцессорных токовых защитах электроустановок.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.
2. Методика повышения быстродействия измерительных органов микропроцессорных защит электроустановок / Ф. А. Романюк [и др.] // 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>.
3. Снижение влияния изменений частоты на формирование ортогональных составляющих входных сигналов релейной защиты / Ф. А. Романюк [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений

- СНГ. 2020. Т. 63, № 1. С. 42–54. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-42-54>.
4. Kasztenny, B. Two Measuring Algorithms for Generator and Transformer Relaying / B. Kasztenny, E. Rosolowski // IEEE Transactions on Power Delivery. 1998. Vol. 13, Iss. 4. P. 1053–1059. <https://doi.org/10.1109/61.714447>.
  5. Фадке Арун, Г. Компьютерная релейная защита в энергосистемах / Г. Фадке Арун, С. Торп Джеймс. 2-е изд. М.: Техносфера, 2019. 370 с.
  6. Совершенствование алгоритма формирования ортогональных составляющих входных величин в микропроцессорных защитах / Ф. А. Романюк [и др.] // 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>.
  7. 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>.
  8. Компенсация динамической фазовой погрешности при формировании ортогональных составляющих входных сигналов в микропроцессорных защитах / Ф. А. Романюк [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 3. С. 197–208. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-197-208>.
  9. 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. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-5-397-417>.
  10. Обработка сигналов в интеллектуальных сетях энергосистем / Ф. П. Рибейро [и др.]. М.: Техносфера, 2020. 496 с.
  11. 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>.
  12. Испытания микропроцессорных токовых защит: теория, моделирование, практика / И. В. Новаш [и др.]. Минск: БНТУ, 2021. 168 с.
- Поступила 12.05.2022  
Подписана в печать 11.07.2022  
Опубликована онлайн 30.09.2022
- REFERENCES
1. Schneerson E. M. (2007) Digital relay protection. Moscow, Energoatomizdat Publ. 549 (in Russian).
  2. Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Novash I. A., 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).
  3. Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V., Dziaruhina A. A. (2020) Reducing the Impact of the Frequency Change on the Formation of Orthogonal Components of the Relay 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 (1), 42–54. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-42-54> (in Russian).
  4. Kasztenny B., Rosolowski E. (1998) Two Measuring Algorithms for Generator and Transformer Relaying. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 13 (4), 1053–1059. <https://doi.org/10.1109/61.714447>.
  5. Phadke Arun G., Thorp James S. (2019) *Computer Relaying for Power Systems*. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Tekhnosfera Publ. 370 (in Russian).
  6. 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).
  7. 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).
  8. Romaniuk F. A., Rumiantsev Yu. V., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V. (2022) Compensation of Dynamic Phase Error in the Formation of Orthogonal Components of Input Signals in Microprocessor Protections. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (3), 197–208. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-197-208> (in Russian).
  9. Rumiantsev Yu. V., Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., 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. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-5-397-417> (in Russian).
  10. Rebeiro P. F., Duque C. A., da Silveira P. M., Cerqueira A. S. (2013) *Power Systems Signal Processing for Smart Grids*. Wiley. 448.
  11. 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).
  12. Novash I. V., Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V. (2021) *Testing of Microprocessor Current Protection: Theory, Modeling, Practice*. Minsk, Belarusian National Technical University. 168 (in Russian).
- Received: 12.05.2022  
Accepted: 11.07.2022  
Published online: 30.09.2022