

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-191-201>

УДК 621.316.925

## Формирование ортогональных составляющих входных токов в микропроцессорных защитах электроустановок

Ф. А. Романюк<sup>1)</sup>, Ю. В. Румянцев<sup>1)</sup>, В. Ю. Румянцев<sup>1)</sup>, И. В. Новаш<sup>1)</sup>

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

© Белорусский национальный технический университет, 2021  
Belarusian National Technical University, 2021

**Реферат.** Используемые в микропроцессорных защитах электроустановок методы формирования ортогональных составляющих входных токов обеспечивают достоверное их выделение после изменения режима по истечении одного или нескольких периодов основной частоты. Это обусловлено инерционностью функциональных элементов, в частности цифровых частотных фильтров, а также насыщением стали магнитопроводов трансформаторов тока. Для повышения быстродействия выделения ортогональных составляющих входных токов предложено формировать их как эквивалентные по значениям косинусной и синусной составляющих, полученных с использованием цифровых фильтров Фурье, путем умножения на результирующий коэффициент. Разработанная методика определения указанного коэффициента обеспечивает компенсацию запаздывания, обусловленного инерционностью цифровых фильтров, а также насыщением стали магнитопроводов трансформаторов тока. Предложенный метод формирования ортогональных составляющих отличается высокой эффективностью в режимах сильного насыщения магнитопровода при сложном входном воздействии при наличии в нем аperiodической составляющей с большой постоянной времени затухания. Оценка эффективности функционирования разработанного метода выполнялась с помощью комплексной цифровой модели, реализованной в среде динамического моделирования MatLab-Simulink. В результате исследований установлено, что при отсутствии насыщения магнитопровода трансформаторов тока, а также при незначительной и средней его степени разработанный метод формирования эквивалентных ортогональных составляющих входных токов обладает динамическими свойствами, близкими к характеристикам ранее предложенных. При сильном насыщении магнитопровода трансформаторов тока обеспечивается повышение быстродействия получения достоверных значений указанных составляющих в 1,5–2 раза.

**Ключевые слова:** ортогональные составляющие входных токов, микропроцессорная защита, цифровые фильтры Фурье, насыщение стали магнитопровода трансформаторов тока, корректирующий коэффициент, цифровая модель, тестовое воздействие, MatLab-Simulink, результаты исследования, быстродействующий метод

**Для цитирования:** Формирование ортогональных составляющих входных токов в микропроцессорных защитах электроустановок / Ф. А. Романюк [и др.] // *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>

---

### 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

---

## Formation of Orthogonal Components of Input Currents in Microprocessor Protections of Electrical Equipment

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

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

**Abstract.** The methods used in the microprocessor protection of electrical equipment for forming orthogonal components of input currents ensure their reliable isolation after changing the mode followed by one or more periods of the fundamental frequency. This is due to the inertia of the functional elements, in particular, digital frequency filters, as well as the saturation of the steel magnetic cores of current transformers. To increase the speed of the selection of orthogonal components of the input currents, it is proposed to form them as equivalent ones in terms of the cosine and sine components obtained using digital Fourier filters by multiplying by the resulting coefficient. The method that has been developed for determining the specified coefficient provides compensation for the delay caused by the inertia of digital filters, as well as the saturation of the steel of magnetic cores of current transformers. The proposed method of forming orthogonal components is highly effective in the modes of strong saturation of the magnetic core with a complex input action in the presence of an aperiodic component with a large damping time constant. The evaluation of the efficiency of the proposed method was performed using a complex digital model implemented in the dynamic modeling environment MatLab-Simulink. As a result of the performed studies, it was found that in the absence of saturation of the magnetic core of current transformers, as well as in the presence of a small and medium degree of saturation, the proposed method for forming equivalent orthogonal components of input currents has dynamic properties close to the ones of those that had been previously proposed. With a strong saturation of the magnetic core of current transformers, the speed of obtaining reliable values of these components is increased by 1.5–2 times.

**Keywords:** orthogonal components of input currents, microprocessor protection, digital Fourier filters, saturation of the steel of the magnetic core of current transformers, correction factor, digital model, test effect, MatLab-Simulink, research results, fast-acting method

**For citation:** 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. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (3), 191–201. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-191-201> (in Russian)

### Введение

Традиционно применяемые в микропроцессорных защитах электроустановок методы выделения ортогональных составляющих (ОС) входных токов обеспечивают возможность достоверных измерений после изменения режима лишь по истечении времени, равного одному или нескольким периодам основной частоты [1]. Это обусловлено в основном двумя главными причинами.

Первая из них связана с инерционностью функциональных элементов, с помощью которых реализуется формирование ОС, в частности частотных цифровых фильтров (ЦФ) [2]. Например, классический ЦФ Фурье позволяет получить достоверные результаты лишь через время одного периода основной частоты.

Вторая причина обусловлена появлением при повреждениях в токах апериодических и гармонических составляющих, в результате чего происходит насыщение стали магнитопроводов трансформаторов тока (ТТ) [3–5]. При этом искажаются формы входных токов и значительно уменьшаются их величины, а вносимое замедление в получение истинных значений ОС измеряется несколькими периодами основной частоты.

В результате влияния названных выше причин затягивается время получения достоверных значений ОС, которое в основном и определяет быстрдействие цифровых измерительных органов защиты.

Для повышения быстрдействия выделения ОС входных токов в [6] предложено формировать эквивалентные ортогональные составляющие, которые, в сущности, можно рассматривать как прогнозные. Эквивалентные косинусная  $i_{eqcn}$  и синусная  $i_{eqsn}$  ОС являются функцией так называемого корректирующего коэффициента  $k_m$  и одноименных ОС основной частоты входного тока  $i_{cn}$ ,  $i_{sn}$ , выделяемых с помощью ЦФ Фурье:

$$\begin{aligned} i_{eqcn} &= k_m i_{cn}; \\ i_{eqsn} &= k_m i_{sn}. \end{aligned} \quad (1)$$

При этом текущие значения  $k_m$  должны определяться таким образом, чтобы осуществлялась компенсация запаздывания выделения ОС, обусловленного как инерционностью ЦФ, так и насыщением стали магнитопровода ТТ.

### Основная часть

Принимая во внимание изложенное выше, корректирующий коэффициент  $k_m$  можно представить в виде произведения двух аналогичных коэффициентов  $k_{Zn}$  и  $k_{Nn}$ , первый из которых обеспечивает компенсацию запаздывания вследствие инерционности ЦФ, а второй – насыщения стали магнитопровода ТТ:

$$k_m = k_{Zn} k_{Nn}. \quad (2)$$

Выражение для текущих значений корректирующего коэффициента  $k_{Zn}$ , полученное по изложенной в [7] методике, имеет вид

$$k_{Zn} = \frac{I_{вхн}^2}{I_{1n}^2}, \quad (3)$$

где  $I_{вхн}$  – текущее действующее значение входного тока;  $I_{1n}$  – то же основной гармоники входного тока.

Признаком насыщения магнитопровода ТТ считается наличие в полном вторичном токе, который является входным, кроме основной, высших гармоник [8, 9]. При возрастании степени указанного насыщения происходит увеличение состава высших гармоник во входном токе, а текущее действующее значение основной гармоники  $I_{1n}$  уменьшается. Вследствие этого корректирующий коэффициент  $k_{Zn}$ , определяемый по (3), увеличивается, благодаря чему достигается частичная компенсация запаздывания, обусловленного насыщением стали магнитопровода ТТ.

В результате выполненных исследований установлено, что корректирующий коэффициент  $k_{Zn}$  обеспечивает компенсацию запаздывания, вносимого как инерционностью ЦФ, так и насыщением стали магнитопровода ТТ при незначительной и средней его степени. При глубокой степени указанного насыщения, когда в первичном токе присутствует значительная аperiodическая составляющая с большой постоянной времени затухания, необходим отдельный дополнительный его учет с помощью корректирующего коэффициента  $k_{Nn}$ . В основе получения выражения для  $k_{Nn}$  лежат следующие соображения.

Для фиксации режима насыщения магнитопровода ТТ можно пользоваться коэффициентом гармонических искажений  $THD_n$ , текущие значения которого определяются уровнем содержания высших гармоник во входном токе. При неучете постоянной составляющей в указанном токе, что вполне допустимо, значения  $THD_n$  рассчитываются по выражению

$$THD_n = \sqrt{1 - \frac{I_{1n}^2}{I_{вхн}^2}}. \quad (4)$$

Степень искажения входного тока вследствие насыщения магнитопровода ТТ оценивается коэффициентом искажения  $KI_n$ , который является функцией  $THD_n$ .

В режимах глубокого насыщения магнитопровода ТТ при наличии в первичном токе аperiodической составляющей с большой постоянной времени затухания значения  $KI_n$  должны существенно возрасти в соответствии с увеличением  $THD_n$ , достигая наибольшей величины при  $THD_n = 1$ . При медленном выходе из указанных режимов из-за большой постоянной времени затухания необходимо обеспечить плавное снижение  $KI_n$  до значения, равного нулю, при полном затухании аperiodической составляющей.

Простая нелинейная зависимость  $KI_n = f(THD_n)$ , позволяющая выполнить указанные условия, имеет вид

$$KI_n = mTHD_n^2 = m \left( 1 - \frac{I_{1n}^2}{I_{вхн}^2} \right), \quad (5)$$

где  $m$  – постоянный коэффициент, посредством которого задается диапазон изменения  $KI_n$ .

В установившихся режимах при отсутствии насыщения, когда  $THD_n = 0$ , коэффициент  $KI_n = 0$ , а в случае глубокого насыщения при  $THD_n \rightarrow 1$  значение  $KI_n \rightarrow m$ .

Корректирующий коэффициент  $k_{Nn}$  должен возрастать с увеличением  $KI_n$  и плавно снижаться по мере затухания переходного процесса, принимая в установившемся режиме, когда  $KI_n = 0$ , значение, равное 1. Принимая во внимание изложенное выше, получим выражение для текущих значений корректирующего коэффициента  $k_{Nn}$

$$k_{Nn} = KI_n + 1 = m \left( 1 - \frac{I_{1n}^2}{I_{вхн}^2} \right) + 1. \quad (6)$$

После подстановки в (2) значений  $k_{Zn}$  и  $k_{Nn}$  соответственно из (3) и (6) формула для расчета текущих значений результирующего коэффициента  $k_m$  примет вид

$$k_m = (m+1) \frac{I_{\text{вх}n}^2}{I_{1n}^2} - m. \quad (7)$$

Текущее действующее значение входного тока  $I_{\text{вх}n}$  вычисляется по выражению

$$I_{\text{вх}n} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N i_{\text{вх}n}^2}, \quad (8)$$

где  $N$  – число выборок за период основной частоты, которому соответствует окно наблюдения;  $n = 1 \dots N$  – номер выборки входного тока в окне наблюдения;  $i_{\text{вх}n}$  – выборки входного тока.

Определение текущего действующего значения основной гармоники входного тока  $I_{1n}$  осуществляется по косинусной  $i_{cn}$  и синусной  $i_{sn}$  ОС путем реализации формулы

$$I_{1n} = \sqrt{\frac{i_{cn}^2 + i_{sn}^2}{2}}. \quad (9)$$

При этом формирование ОС основной гармоники входного тока производится с помощью ЦФ Фурье по выражениям:

$$\begin{aligned} i_{cn} &= \sum_{n=1}^N a_{cn} i_{\text{вх}n}; \\ i_{sn} &= \sum_{n=1}^N a_{sn} i_{\text{вх}n}, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $a_{cn}$ ,  $a_{sn}$  – коэффициент соответственно косинусного и синусного ЦФ Фурье.

Входные токи, подводимые к микропроцессорной защите, могут изменяться в зависимости от имеющего место режима работы электроустановки. В нормальном режиме и в установившемся режиме короткого замыкания (КЗ) указанные токи остаются практически неизменными, возрастают при возникновении КЗ и спадают после его отключения. Согласно этому на кривой изменения действующего значения входного тока  $I_{\text{вх}}(t)$  всегда можно выделить три характерных участка с присвоением признаку  $c$  численного значения:  $c = 1$  – ток возрастает;  $c = 0$  – ток не изменяется;  $c = -1$  – ток снижается.

Определение признака  $c$  осуществляется по двум смежным выборкам  $I_{\text{вх}}(t)$  с использованием методики, представленной в [7].

Эквивалентные косинусная  $i_{eqcn}$  и синусная  $i_{eqsn}$  ОС в пределах участка возрастающего входного тока  $I_{\text{вх}}(t)$ , где  $c = 1$ , вычисляются согласно (1) с использованием текущих значений  $k_m$ , рассчитываемых по (7). На участке неизменного  $I_{\text{вх}}(t)$ , когда  $c = 0$ , выполняется то же самое, но при  $k_m = 1$ . При этом значения эквивалентных ОС полностью совпадают со значениями ОС, сформированных ЦФ Фурье. Для участка снижающегося  $I_{\text{вх}}(t)$ ,

где  $c = -1$ , характерно наличие в токе переходного режима, помимо составляющей основной гармоники, постоянной составляющей и высших гармоник, амплитуды которых вначале возрастают, а затем снижаются до нулевых значений при наступлении установившегося режима. При этом текущее действующее значение основной гармоники постепенно уменьшается до достижения соответствующей величины после завершения переходного процесса.

Это позволяет на основании приведенных в [7] результатов исследований использовать для формирования эквивалентных ОС на участке  $I_{вх}(t)$  при  $c = -1$  корректирующий коэффициент, вычисляемый как отношение квадратов текущих действующих значений основной гармоники входного тока  $I_{1n}$  и его полной величины  $I_{вхl}$ :

$$k_m = \frac{I_{1n}^2}{I_{вхl}^2}. \quad (11)$$

С учетом изложенного выше общее выражение для определения результирующего корректирующего коэффициента для произвольной выборки  $n$ , расположенной на любом из участков кривой  $I_{вх}(t)$ , будет иметь вид

$$k_m = 0,5(|c| + c) \left[ (m + 1) \frac{I_{вхl}^2}{I_{1n}^2} - m \right] + 0,5(|c| - c) \frac{I_{1n}^2}{I_{вхl}^2} - |c| + 1. \quad (12)$$

Следует отметить, что с увеличением постоянного коэффициента  $m$  возрастает быстродействие формирования эквивалентных ОС. Вместе с тем при превышении  $m$  некоторой величины на переходной характеристике эквивалентного тока  $I_{eqn}$  появляются выбросы. Оптимальным является значение  $m$ , при котором обеспечивается высокое быстродействие получения эквивалентных ОС при гладкой переходной характеристике  $I_{eqn}$  с отсутствием на ней выбросов.

В результате проведенных методом вычислительного эксперимента исследований установлено, что оптимальная величина коэффициента  $m$  находится в диапазоне 0,3–0,4.

### Моделирование

Оценка работоспособности и эффективности функционирования предлагаемого метода формирования ОС входных токов в микропроцессорных защитах выполнялась с помощью комплексной цифровой модели, реализованной в среде динамического моделирования MatLab-Simulink.

В структуре указанной модели содержатся энергосистема, трехфазная группа ТТ, нагрузка, блок КЗ, а также модели элементов, обеспечивающих реализацию описанного выше метода получения ОС входных токов [10]. Моделирование функциональных блоков и элементов цифровой структуры выполнено с использованием методов и правил, изложенных в [11–14].

### Результаты исследования

Исследование работоспособности и эффективности предложенного метода формирования ОС входных токов в микропроцессорных защитах производилось при различных тестовых воздействиях.

В результате проведенных исследований установлено, что текущие значения результирующего корректирующего коэффициента  $k_m$ , определяемые по (12), в переходных режимах могут значительно возрасти. Это является следствием влияния случайных факторов, а также скачкообразного изменения входного тока, когда в первые моменты коммутации в ЦФ происходит замещение доаварийных выборок аварийными. В результате этого на переходной характеристике эквивалентного тока  $I_{eqn}$  могут появляться выбросы. Для их исключения и получения гладкой переходной характеристики указанного тока необходимо ограничить текущие значения  $k_m$  максимальным уровнем  $k_{rmax}$ . Аналитическое определение  $k_{rmax}$  является относительно сложной задачей, решение которой существенно упрощается с использованием результатов вычислительного эксперимента.

На рис. 1 приведены результаты расчетов при гармоническом входном воздействии (кривая 1) изменения относительного действующего значения эквивалентного тока (кривая 2) в различных режимах работы электроустановки: нормальный режим – возникновение КЗ – установившийся режим КЗ – отключение КЗ – бестоковая пауза – успешное повторное включение.

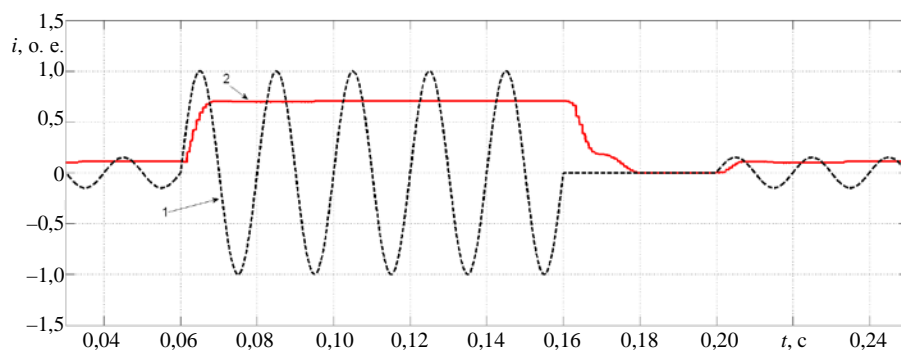


Рис. 1. Изменение относительного действующего значения эквивалентного тока в различных режимах гармонического входного воздействия

Fig. 1. Change in the relative effective value of the equivalent current in different modes of harmonic input action

На рис. 2 представлено согласованное по времени с рис. 1 изменение текущих значений результирующего корректирующего коэффициента. Как видно из указанного рисунка, в нормальном режиме и режиме установившегося КЗ, а также после успешного повторного включения  $k_m = 1$ . Любое скачкообразное изменение входного воздействия с нулевого уровня или до него сопровождается возрастанием коэффициента  $k_m$ , что подтверждает необходимость его ограничения. В переходном режиме КЗ, возникающего с уровня нормального режима в момент времени  $t = 0,06$  с, наибольшая величина  $k_m$  достигает значения порядка 2. Поэтому с учетом возможного влияния различных факторов можно принять  $k_{rmax} = 2,5$ .

При отсутствии насыщения магнитопровода ТТ, а также при незначительной и средней его степени предложенный метод формирования ОС входных токов обладает такими же быстродействием и переходной характеристикой  $I_{eqn}$ , как и реализованный ранее, описанный в [7]. Это подтверждается приведенными на рис. 3 результатами исследований. При сложном вход-

ном воздействии (кривая 1) и несущественном насыщении магнитопровода ТТ переходные характеристики  $I_{eqn}$  предложенного метода формирования ОС (кривая 2) и реализованного ранее (кривая 3) практически совпадают.

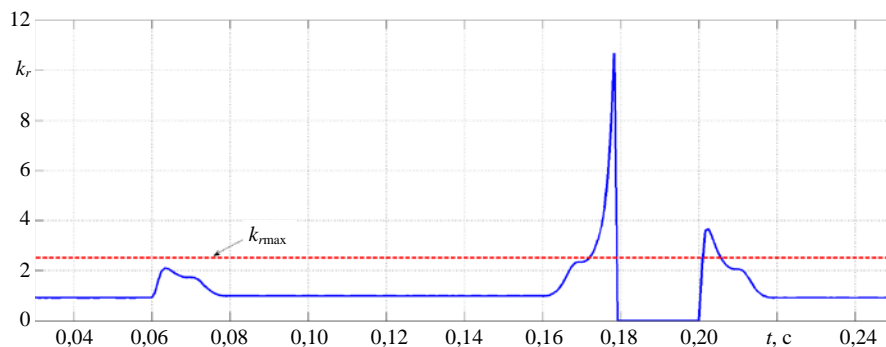


Рис. 2. Изменение значений результирующего корректирующего коэффициента  
Fig. 2. Changing the values of the resulting correction factor

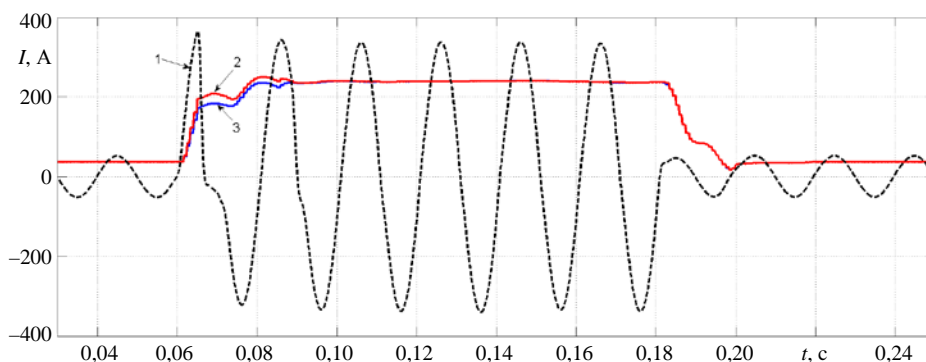


Рис. 3. Изменение действующего значения эквивалентного тока при несущественном насыщении магнитопровода трансформаторов тока  
Fig. 3. Change in the effective value of the equivalent current in conditions of insignificant saturation of the magnetic core of current transformers

Более высокая эффективность разработанного метода формирования ОС в сравнении с описанным в [7] имеет место в режимах сильного насыщения магнитопровода ТТ. Как следует из представленных на рис. 4 результатов исследований, при сложном входном воздействии (кривая 1) и сильном насыщении магнитопровода ТТ переходная характеристика эквивалентного тока предложенного метода (кривая 2) располагается выше (при более быстром достижении установившегося значения) аналогичной характеристики реализованного ранее метода (кривая 3). В результате обеспечивается повышение быстродействия формирования эквивалентных ОС в 1,5–2 раза.

Как видно из рис. 3, 4, при спаде входного тока предложенный и известный методы формирования ОС функционируют идентично.

В качестве параметра для относительной оценки динамических свойств различных методов формирования ОС можно использовать изменение отно-



шения действующих значений эквивалентных токов, полученных с помощью сравниваемых методов. При значениях указанного параметра, близких к единице, методы являются практически идентичными, и чем больше они отличаются от единицы, тем более высокими динамическими свойствами обладает один из них для условий конкретного режима входного тока.

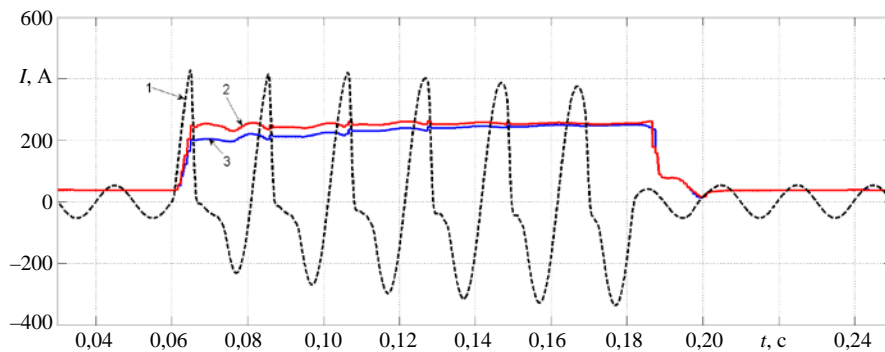


Рис. 4. Изменение действующего значения эквивалентного тока при сильном насыщении магнитопровода трансформаторов тока

Fig. 4. Change in the effective value of the equivalent current at high saturation of the magnetic core of current transformers

На рис. 5 приведено согласованное по времени с рис. 3, 4 изменение отношения действующих значений эквивалентных токов  $k$ , полученных с помощью предложенного и известного методов, при сильном (кривая 1) и слабом (кривая 2) насыщения магнитопровода ТТ. Анализ представленных зависимостей свидетельствует о более высоких динамических свойствах разработанного метода формирования ОС входных токов в сравнении с предложенным в [7] для условий глубокого насыщения магнитопровода ТТ и о практическом совпадении указанных свойств при его малой степени либо отсутствии.

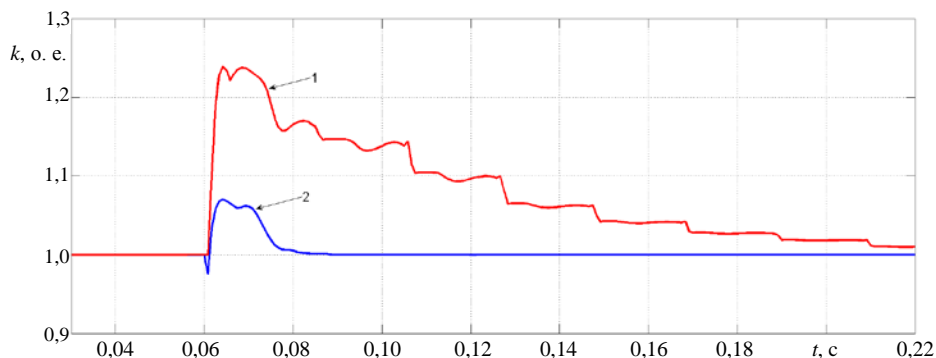


Рис. 5. Отношение действующих значений эквивалентных токов, полученных предложенным и известным методами, при сильном (кривая 1) и слабом (кривая 2) насыщения магнитопровода трансформаторов тока

Fig. 5. The ratio of the effective values of equivalent currents obtained by the proposed and known methods for strong (curve 1) and weak (curve 2) saturation of the magnetic core of current transformers

Дальнейшее повышение быстродействия формирования ОС входных токов может быть осуществлено за счет реализации принципа адаптивности путем соответствующего текущего изменения входящего в (12) коэффициента  $m$ .

### ВЫВОДЫ

1. Предложенный быстродействующий метод формирования ортогональных составляющих входных токов в микропроцессорных защитах электроустановок отличается высокой эффективностью в условиях глубокого насыщения магнитопровода трансформаторов тока.

2. Разработанные положения могут составить основу для создания адаптивных методов формирования ОС входных величин в микропроцессорных защитах.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.
2. 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>.
3. Cosse, R. E. CT Saturation Calculations: are they Applicable in the Modern World? Part I: The Question / R. E. Cosse, D. G. Dunn, R. M. Spiewak // IEEE Transactions on Industry Applications. 2005. Vol. 43, No 2. P. 444–452. <https://doi.org/10.1109/tia.2006.890023>.
4. Benmouyal, G. The Impact of High Fault Current and CT Rating Limits on Overcurrent Protection / G. Benmouyal, S. E. Zocholl // Proceedings of the 29<sup>th</sup> Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA. 2002.
5. Instantaneous Overcurrent Element for Heavily Saturated Current in a Power System: pat. US US6757146 B2 / G. Benmouyal, S. E. Zocholl, A. Guzman-Casillas. Publ. date 29.06.2004.
6. 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>.
7. 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>.
8. Федосеев, А. М. Релейная защита электрических систем. Релейная защита сетей / А. М. Федосеев. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1992. 528 с.
9. Чернобровов, Н. В. Релейная защита энергетических систем / Н. В. Чернобровов, В. А. Семенов. М.: Энергоатомиздат, 1998. 800 с.
10. 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>.
11. SimPowerSystems. User's Guide. Version 5 [Electronic resource]. The MathWorks, 2011. Mode of access: <https://all-guidesbox.com/manual/545991/matlab-simpowersystems-5-operation-user-s-manual-403.html>.
12. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2011. 288 с.

13. Дэбни, Дж. Б. *Simulink 4. Секреты мастерства* / Дж. Б. Дэбни, Т. Л. Харман; пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003. 403 с.
14. Цифровой измерительный орган 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>.

Поступила 16.02.2021 Подписана в печать 20.04.2021 Опубликована онлайн 31.05.2021

#### REFERENCES

1. Sheyerson E. M. (2007) *Digital Relay Protection*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 549 (in Russian).
2. 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).
3. Cosse R. E., Dunn D. G., Spiewak R. M. (2005) CT Saturation Calculations: are they Applicable in the Modern World? Part I: The Question. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 43 (2), 444–452. <https://doi.org/10.1109/tia.2006.890023>.
4. Benmouyal G., Zocholl S. E. (2002) The Impact of High Fault Current and CT Rating Limits on Overcurrent Protection. *Proceedings of the 29<sup>th</sup> Annual Western Protective Relay Conference*. Spokane, WA.
5. Benmouyal G., Zocholl S. E., Guzman-Casillas A. (2004) *Instantaneous Overcurrent Element for Heavily Saturated Current in a Power System*. Pat. US US6757146 B2.
6. 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).
7. Romaniuk F. A., Rumiantsev Yu. V., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V. (2021) Enhancement of the Orthogonal Components Forming Algorithm for the Microprocessor-Based 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*, 64 (2), 95–108. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-2-95-108> (in Russian).
8. Fedoseyev A. M. (1992) *Relay Protection of Electric Power Grids. Relay Protection of Electric Power Networks*. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Energoatomizdat Publ. 528 (in Russian).
9. Chernobrovov N. V., Semenov V. A. (1998) *Relay Protection of Electric Energy Grids*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 800 (in Russian).
10. 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).
11. *SimPowerSystems. User's Guide. Version 5*. The MathWorks, 2011. Available at: <https://allguidesbox.com/manual/545991/matlab-simpowersystems-5-operation-user-s-manual-403.html>.
12. Chernykh I. V. (2011) *Modeling of Electrical Devices in MatLab, SimPowerSystems and Simulink*. Moscow, DMK Press Publ.; Saint-Petersburg, Piter Publ. 288 (in Russian).
13. Dabney J. B., Harman T. L. (2003) *Simulink 4. Secret of Skills*. Moscow, BINOM Publ. 403 (in Russian).
14. 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).

Received: 16 February 2021

Accepted: 20 April 2021

Published online: 31 May 2021