

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-197-208>

УДК 621.316.925

Компенсация динамической фазовой погрешности при формировании ортогональных составляющих входных сигналов в микропроцессорных защитах

Ф. А. Романюк¹⁾, Ю. В. Румянцев¹⁾, В. Ю. Румянцев¹⁾, И. В. Новаш¹⁾

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

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

Реферат. В микропроцессорных защитах электроэнергетических систем определение контролируемых информационных параметров входных сигналов осуществляется с использованием их ортогональных составляющих. Для формирования указанных составляющих наиболее широко применяются цифровые фильтры Фурье, которые обладают инерционностью. Вследствие этого переходные режимы формирования ортогональных составляющих сопровождаются появлением динамической погрешности. Она состоит из динамических амплитудной и фазовой погрешностей, которые могут существенно влиять на функционирование соответствующих измерительных органов и создавать возможность для их излишних срабатываний при внешних коротких замыканиях и замедления срабатывания при внутренних коротких замыканиях. Снижение влияния указанных факторов на поведение измерительных органов обеспечивается использованием для выделения ортогональных составляющих быстродействующих формирователей, а также посредством компенсации динамической фазовой погрешности. Предлагаемый метод основывается на получении ортогональных составляющих Фурье с последующим определением по их выборкам расчетных составляющих, которые совпадают или сдвинуты по фазе относительно первых соответственно в установившемся и переходном режимах. По выборкам расчетных ортогональных составляющих Фурье вычисляются результирующие ортогональные составляющие с минимальными динамическими фазовыми погрешностями. Оценка эффективности предложенного решения выполнялась методом вычислительного эксперимента с помощью цифровой модели, реализованной в среде динамического моделирования MATLAB-Simulink. При этом в качестве тестовых воздействий использовались как синусоидальные входные сигналы, так и сложные с содержанием аperiodической составляющей и высших гармоник. В результате исследований установлено, что предлагаемый метод компенсации динамической фазовой погрешности при формировании ортогональных составляющих является работоспособным и эффективным как при синусоидальном, так и при сложном входных сигналах. Разработанный метод компенсации обеспечивает снижение динамической фазовой погрешности цифровых фильтров Фурье в три-четыре раза.

Ключевые слова: микропроцессорная защита, динамическая погрешность, динамическая фазовая погрешность, ортогональные составляющие, цифровые фильтры Фурье, модель, тестовое воздействие, вычислительный эксперимент, MATLAB-Simulink

Для цитирования: 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>

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

Compensation of Dynamic Phase Error in the Formation of Orthogonal Components of Input Signals in Microprocessor Protections

F. A. Romaniuk¹⁾, Yu. V. Rumiantsev¹⁾, V. Yu. Rumiantsev¹⁾, I. V. Novash¹⁾

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

Abstract. In microprocessor protections of electric power systems, the controlled information parameters of input signals are determined using their orthogonal components. To form these components, digital Fourier filters which have inertia are most widely used. As a result, transient modes of orthogonal components formation are accompanied by the appearance of a dynamic error. It consists of dynamic amplitude and phase errors, which can significantly affect the functioning of the corresponding measuring elements and cause the possibility of their excessive triggering during external short circuits and slowing down the triggering during internal short circuits. The reduction of the influence of these factors on the behavior of measuring elements is ensured by the use of high-speed shapers to isolate orthogonal components, as well as by compensating for dynamic phase error. The proposed method of forming orthogonal components of a signal with compensation for dynamic phase error is based on obtaining orthogonal Fourier components, followed by determining from their samples the calculated components that coincide or are shifted in phase relative to the orthogonal Fourier components, respectively, in steady-state and transient modes. The resulting orthogonal components with minimal dynamic phase errors are calculated in accordance with samples of calculated orthogonal components and Fourier components. The efficiency of the proposed solution was evaluated by a computational experiment using a digital model implemented in the MATLAB-Simulink dynamic modeling environment. At the same time, both sinusoidal input signals and complex ones with an aperiodic component and higher harmonics were used as test actions. As a result of the studies carried out, it has been found that the proposed method of compensation for dynamic phase error in the formation of orthogonal components is workable and effective for both sinusoidal and complex input signals. The developed compensation method reduces the dynamic phase error of digital Fourier filters by three to four times.

Keywords: microprocessor protection, dynamic error, dynamic phase error, orthogonal components, digital Fourier filters, model, test action, computational experiment, MATLAB-Simulink

For citation: 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. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (3), 197–208. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-197-208> (in Russian)

Введение

В микропроцессорных защитах электроэнергетических систем определение информационных параметров входных сигналов осуществляется главным образом с использованием их ортогональных составляющих (ОС) [1]. Для формирования ОС в современных защитах преимущественно применяются цифровые фильтры (ЦФ) на основе дискретного преобразования Фурье [2], которые обладают инерционностью. Вследствие этого переходные режимы формирования ОС сопровождаются появлением в них дина-

мической погрешности, изменяющейся с течением времени и исчезающей вообще при наступлении установившегося режима. Указанная погрешность как функция времени представляет собой разность между выходным и входным сигналами формирователя ОС. Она состоит из динамических амплитудной и фазовой погрешностей, которые могут существенно влиять на функционирование соответствующих измерительных органов (ИО) и создавать возможность для их излишних срабатываний при внешних коротких замыканиях и замедления срабатывания при внутренних коротких замыканиях. Для снижения влияния на поведение ИО микропроцессорных защит первого фактора необходимо обеспечить быстрое затухание в переходных режимах динамической амплитудной погрешности за счет использования для выделения ОС быстродействующих формирователей. Принципы реализации и основные характеристики указанных формирователей приведены в [3]. Уменьшение влияния на функционирование ИО второго фактора является задачей более сложной, для решения которой требуется несколько иной подход.

Основная часть

Динамическая фазовая погрешность как функция времени представляет собой разность текущих значений фаз выходного и первой гармоники входного сигналов. Она имеет место в переходном режиме, обусловленном коррекцией амплитуды, текущей фазы либо их одновременным изменением.

При формировании ОС первой гармоники с помощью классических ЦФ Фурье максимальная фазовая погрешность может достигать абсолютного значения 90° [4]. Снижение влияния указанной погрешности на поведение определенных ИО микропроцессорных защит может быть получено за счет отстройки от ее неприемлемых уровней путем введения соответствующего запаздывания в срабатывании органа либо посредством ее компенсации, хотя бы частичной. Второй подход представляется более предпочтительным, поскольку не вызывает ухудшения быстродействия ИО.

Предлагаемый метод формирования ОС сигнала с компенсацией динамической фазовой погрешности основывается на получении ортогональных составляющих Фурье с последующим определением по их выборкам расчетных ОС, которые совпадают или сдвинуты по фазе относительно ОС Фурье соответственно в установившемся и переходном режимах. По выборкам расчетных ортогональных составляющих и ОС Фурье вычисляются результирующие ОС входного сигнала с минимальными динамическими фазовыми погрешностями.

На рис. 1 приведена упрощенная структурная схема формирователя ОС, в каждом блоке которой осуществляется определенное преобразование сигнала или реализуется математическое выражение в соответствии с рассмотренным выше алгоритмом.

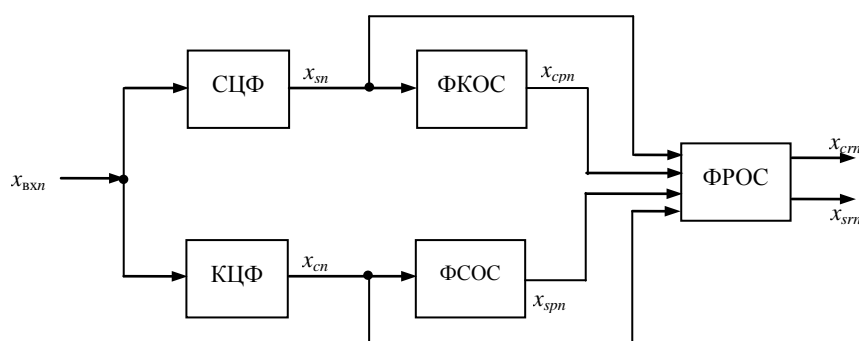


Рис. 1. Упрощенная структурная схема формирования ортогональных составляющих сигнала с компенсацией динамической фазовой погрешности

Fig. 1. Simplified block diagram of the formation of orthogonal components of the signal with compensation of dynamic phase error

Выборки входного сигнала $x_{вxn}$, полученные в результате его обработки, аналоговой фильтрации и аналого-цифрового преобразования, поступают на входы синусного цифрового фильтра (СЦФ) и косинусного цифрового фильтра (КЦФ) Фурье, которые формируют одноименные ОС основной гармоники x_{sn} и x_{cn} согласно выражениям:

$$x_{sn} = \sum_{n=1}^N a_{sn} x_{вxn};$$

$$x_{cn} = \sum_{n=1}^N a_{cn} x_{вxn},$$
(1)

где $x_{вxn}$ – выборка входного сигнала; a_{sn} , a_{cn} – коэффициенты синусного и косинусного ЦФ; $n = 1 \dots N$ – номер выборки входного сигнала в окне наблюдения; N – число используемых выборок.

По смежным выборкам, разделенным шагом дискретизации Δt , синусной ОС x_{sn} и $x_{s(n-1)}$, а также косинусной ОС x_{cn} и $x_{c(n-1)}$, которые подаются на входы соответственно косинусного формирователя ортогональных составляющих (ФКОС) и синусного формирователя ортогональных составляющих (ФСОС), определяются расчетные значения ОС x_{cpn} и x_{spn} :

$$x_{cpn} = \frac{x_{sn} \cos \omega \Delta t - x_{s(n-1)}}{\sin \omega \Delta t};$$
(2)

$$x_{spn} = \frac{x_{c(n-1)} - x_{cn} \cos \omega \Delta t}{\sin \omega \Delta t},$$
(3)

где ω – угловая частота сигнала.

С использованием выборок ОС Фурье x_{sn} , x_{cn} , а также расчетных ОС x_{spn} , x_{cpn} в формирователе результирующих ортогональных составляющих (ФРОС)

определяются синусная x_{sm} и косинусная x_{cm} ОС выходного сигнала по выражениям:

$$\begin{aligned}x_{sm} &= x_{sn} - l_1(x_{sn} - x_{spn}); \\x_{cm} &= x_{cn} - l_2(x_{cn} - x_{cpn}),\end{aligned}\tag{4}$$

где l_1, l_2 – постоянные, являющиеся действительными числами.

В установившемся режиме ввиду отсутствия динамической фазовой погрешности: $x_{sn} = x_{spn}$; $x_{cn} = x_{cpn}$, поэтому результирующие ОС полностью совпадают с ОС Фурье: $x_{sm} = x_{sn}$; $x_{cm} = x_{cn}$. Когда по любой из названных выше причин наступает переходный режим, то $x_{sn} \neq x_{spn}$, $x_{cn} \neq x_{cpn}$ и вследствие появления разностей соответствующих ОС выполняется фазовая коррекция результирующих ОС. Степень этой коррекции можно регулировать путем изменения значений l_1, l_2 .

В конечном итоге благодаря указанной коррекции реализуется компенсация динамической фазовой погрешности текущей фазы выходного сигнала.

Моделирование

Оценка эффективности предложенного решения, обеспечивающего компенсацию динамической фазовой погрешности при формировании ОС входных сигналов, выполнялась методом вычислительного эксперимента с использованием цифровой модели, реализованной в среде динамического моделирования MATLAB-Simulink [5–7].

В структуре указанной модели содержатся энергосистема, группы трансформаторов тока и трансформаторов напряжения, нагрузка, блок изменения режима входного сигнала, а также модели элементов, обеспечивающие реализацию процедуры компенсации динамической фазовой погрешности в соответствии со структурной схемой, представленной на рис. 1. Входящие в цифровую структуру модели элементы и блоков, а также их компьютерное воспроизведение подробно рассмотрены в [8–11].

Результаты вычислительного эксперимента

Для сравнительной оценки эффективности предложенного метода компенсации получены численные значения динамической фазовой погрешности при тестовом воздействии в форме синусоидального входного сигнала для режимов изменения его амплитуды, а также при одновременном изменении амплитуды и текущей фазы в заданные моменты времени. Соответствующие зависимости, позволяющие дать оценку рассматриваемому методу, представлены на рис. 2, 3. Там же приведены аналогичные зависимости при формировании ОС сигнала ЦФ Фурье.

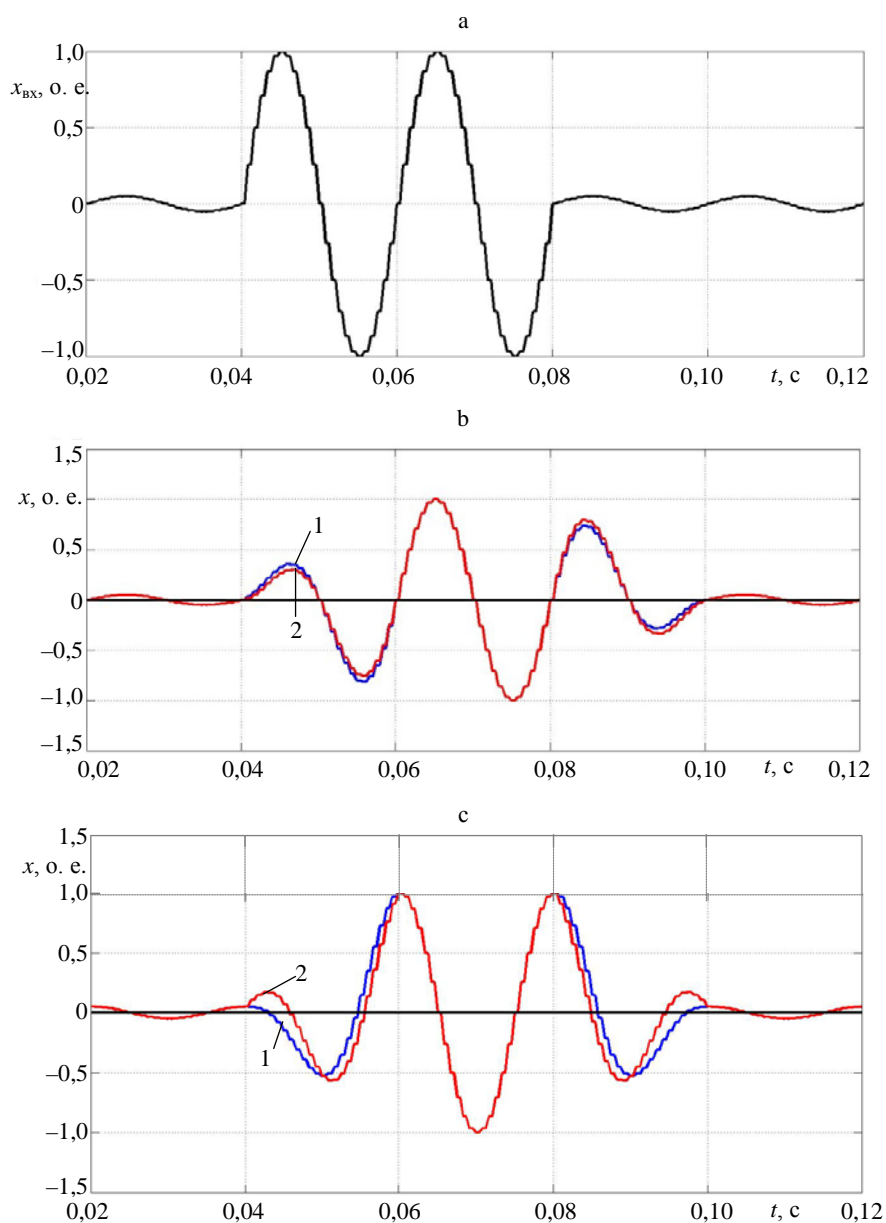


Рис. 2. Результаты компенсации динамической фазовой погрешности при изменении амплитуды входного синусоидального сигнала: а – входной синусоидальный сигнал; б, с – синусные и косинусные ортогональные составляющие, сформированные: 1 – цифровыми фильтрами Фурье; 2 – предложенным методом с компенсацией; д – динамические фазовые погрешности: 1 – цифровых фильтров Фурье; 2 – предложенного метода с компенсацией (окончание рис. на с. 203)

Fig. 2. The results of compensation of dynamic phase error when the amplitude of the input sinusoidal signal changes: а – input sinusoidal signal; б, с – respectively sine and cosine orthogonal components formed by: 1 – digital Fourier filters; 2 – the proposed method with compensation; д – dynamic phase errors of: 1 – digital Fourier filters; 2 – the proposed method with compensation (ending of the Fig. is on p. 203)

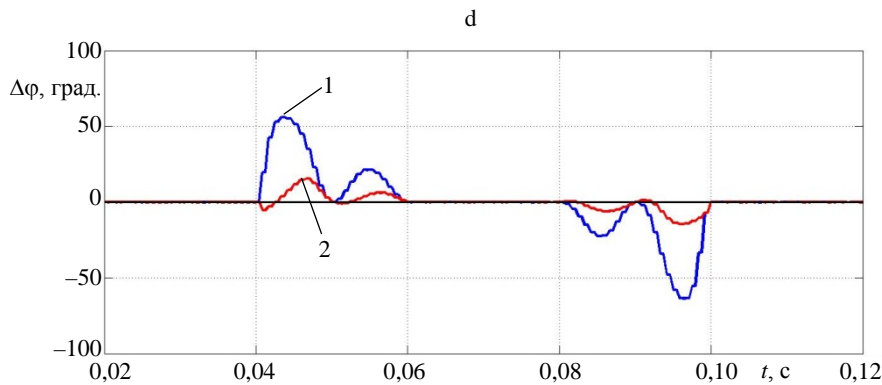


Рис. 2. Окончание
Fig. 2. Ending

В результате выполненных исследований определены оптимальные значения постоянных l_1 , l_2 по критерию минимизации фазовых погрешностей при наступлении переходного режима в различные моменты времени по любой из рассматриваемых причин, находящиеся в диапазонах соответственно 0,70–0,75 и 0,75–0,80.

На рис. 2 показано, как изменяются соответствующие сигналы и величины для вариантов формирования ОС цифровыми фильтрами Фурье (кривые 1) и предложенным методом (кривые 2), при нарастании и спаде входного синусоидального сигнала с кратностью 20. На отрезке времени $t = 0,00–0,04$ с имеет место нормальный установившийся режим входного сигнала $x_{вх}(t)$ (рис. 2а). При этом синусные ОС, сформированные ЦФ Фурье (кривая 1) и предложенным методом (кривая 2), совпадают (рис. 2б). Также совпадают и косинусные ОС, полученные указанными методами (рис. 2с, кривые 1, 2), а динамическая фазовая погрешность $\Delta\varphi$ при этом отсутствует (рис. 2д). Вследствие скачкообразного увеличения в 20 раз в момент времени $t = 0,04$ с амплитуды входного сигнала возникает переходный режим, который длится в течение периода изменения указанного сигнала до $t = 0,06$ с, после чего наступает установившийся аварийный режим. В переходном режиме синусные ОС Фурье и полученные предложенным методом имеют одинаковые амплитуды, но сдвинуты по фазе (рис. 2б). Наличие углового сдвига между ними, который с течением времени изменяется, является признаком действия фазовой компенсации. Аналогичным образом ведут себя и косинусные ОС сравниваемых методов (рис. 2с).

Динамические фазовые погрешности, возникающие в переходном режиме (рис. 2д), для вариантов формирования ОС ЦФ Фурье (рис. 2д, кривая 1) и предложенным методом (рис. 2д, кривая 2) имеют примерно одинаковый характер изменения, но существенно различаются по уровню.

Первому методу присущи более высокие динамические фазовые погрешности с превышением максимальными их значениями аналогичных величин, свойственных для второго метода, в три-четыре раза.

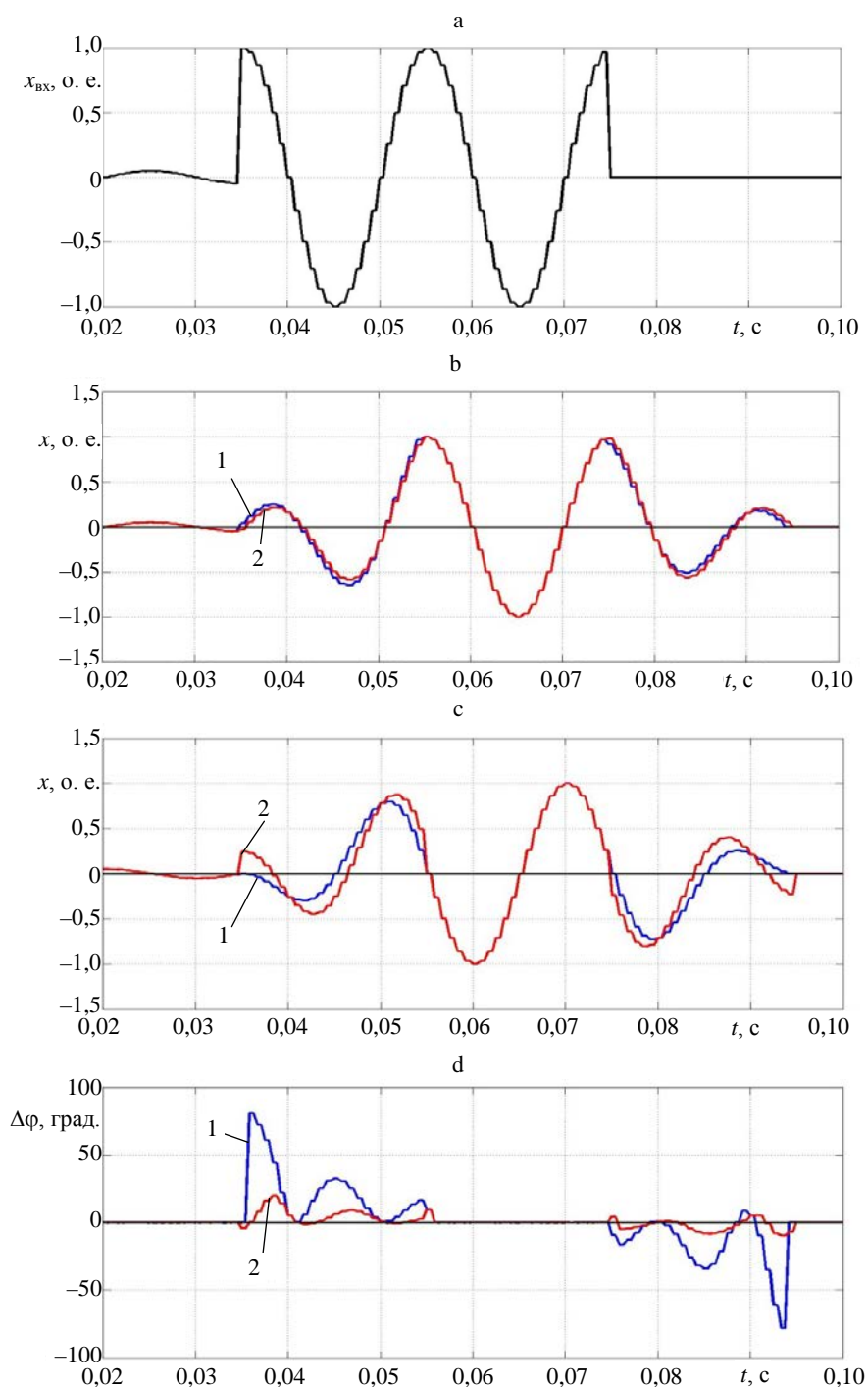


Рис. 3. Результаты компенсации динамической фазовой погрешности при изменении амплитуды и текущей фазы входного синусоидального сигнала: а–д, 1, 2 – то же, что на рис. 2

Fig. 3. The results of compensation of the dynamic phase error when changing the amplitude and current phase of the input sinusoidal signal: а–д, 1, 2 – the same as in Fig. 2

В момент времени $t = 0,08$ с происходит скачкообразное снижение амплитуды входного сигнала до уровня нормального режима и возникает переходный процесс, обусловленный спадом сигнала, который заканчивается при $t = 0,1$ с. При этом анализируемые сигналы и величины изменяются с сохранением закономерностей, как и при нарастании входного синусоидального сигнала $x_{вх}(t)$ (рис. 2а). Динамические фазовые погрешности приобретают отрицательный знак, а соотношения между ними для анализируемых методов формирования ОС сохраняются. После завершения переходного процесса при $t > 0,1$ с указанные погрешности исчезают.

На рис. 3 показаны, как и на рис. 2, зависимости для режимов нарастания и спада входного синусоидального сигнала с одновременным увеличением в момент скачкообразного изменения амплитуды указанного сигнала и его текущей фазы на угол π .

Анализ представленных зависимостей позволяет отметить, что отличительной особенностью исследуемого режима являются более высокие уровни динамической фазовой погрешности с сохранением в основном характера изменений и соотношений оцениваемых величин.

Эффективность и качество функционирования предложенного метода компенсации динамической фазовой погрешности также оценивались на основе анализа изменений соответствующих сигналов и величин при тестовых воздействиях в форме сложных входных токов.

На рис. 4 представлены наиболее характерные результаты, включающие изменяющиеся во времени значения текущей фазы φ основной гармоники (рис. 4б), динамической фазовой погрешности $\Delta\varphi$ (рис. 4с) для вариантов формирования ОС ЦФ Фурье (кривая 1) и разработанным методом (кривая 2) при скачкообразном изменении входного тока $i_{вх}$ (рис. 4 а), содержащем в аварийном режиме, помимо основной, апериодическую составляющую и спектр высших гармоник, что соответствует максимальному приближению $i_{вх}$ к реальному вторичному току короткого замыкания.

На отрезке времени $t = 0,00-0,04$ с существует нормальный установившийся режим. При этом текущие фазы выходного тока, определяемые по ОС Фурье и ОС с компенсацией динамической погрешности (рис. 4б), совпадают и изменяются так же, как текущая фаза входного тока (рис. 4б, кривая 3). В момент времени $t = 0,04$ с возникает аварийный режим, который можно квалифицировать как короткое замыкание, с появлением в токе дополнительно к основной высших гармоник и апериодической составляющей. При этом текущая фаза выходного тока, полученная по ОС с компенсацией (рис. 4б, кривая 2), меньше расходится с изменением фазы входного тока (рис. 4б, кривая 3), чем рассчитанная по ОС Фурье (рис. 4б, кривая 1).

Как видно из рис. 4с, при сложном входном сигнале динамические фазовые погрешности предложенного метода получения ОС значительно меньше аналогичных величин при использовании для этой цели ЦФ Фурье (кривые 1, 2).

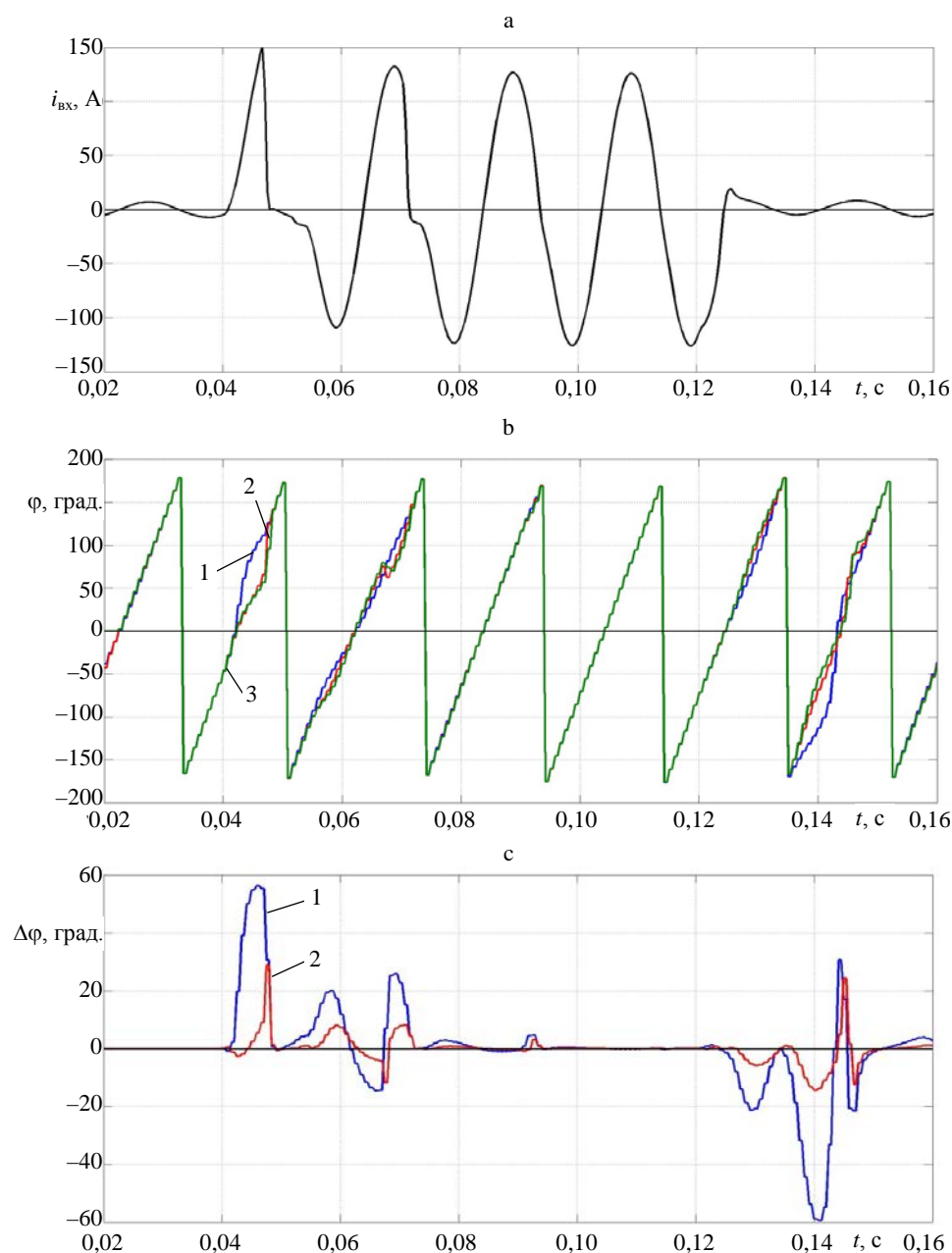


Рис. 4. Результаты компенсации динамической фазовой погрешности при сложном входном сигнале: а – входной ток; б – текущая фаза сигнала: 1, 2 – выходного при определении соответственно по ортогональной составляющей Фурье и ортогональной составляющей с компенсацией; 3 – входного; с – динамическая фазовая погрешность: 1 – цифровых фильтров Фурье; 2 – предложенного метода с компенсацией

Fig. 4. The results of compensation of dynamic phase error when a input signal is complex: а – input current; б – current phase of the signal: 1, 2 – of an output one when determined respectively by the orthogonal Fourier component and the orthogonal component with compensation; 3 – of an input one; с – dynamic phase error of: 1 – digital Fourier filters; 2 – the proposed method with compensation

В заключение необходимо отметить, что предложенный метод компенсации динамической фазовой погрешности при формировании ОС является работоспособным и достаточно эффективным как при синусоидальном, так и при сложном входном сигнале.

ВЫВОДЫ

1. Предложенный метод компенсации обеспечивает снижение динамической фазовой погрешности классических цифровых фильтров Фурье в три-четыре раза.

2. Реализованные на основе разработанного метода формирователи ортогональных составляющих сигналов могут быть использованы как в простых, так и в сложных измерительных органах с двумя и более входными величинами микропроцессорных защит.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.
2. Schweitzer III, E. O. Filtering for Protective Relays / E. O. Schweitzer III, D. Hou // WESCANEX 93. Communications, Computers and Power in the Modern Environment. Conference Proceedings. IEEE, 1993. P. 15–23. <https://doi.org/10.1109/wescan.1993.270548>.
3. 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>.
4. Формирование ортогональных составляющих входных сигналов в микропроцессорных защитах с отстройкой от фазовых динамических погрешностей / Ф. А. Романюк [и др.] // Энергетическая стратегия. 2022. № 1. С. 32–34.
5. Испытания микропроцессорных токовых защит: теория, моделирование, практика / И. В. Новаш [и др.]. Минск: БНТУ, 2021. 168 с.
6. Дьяконов, В. П. MATLAB и Simulink для радиоинженеров / В. П. Дьяконов. М.: ДМК Пресс, 2011. 975 с.
7. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2011. 288 с.
8. 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>.
9. SimPowerSystems. User's Guide. Version 5. The MathWorks, 2011.
10. Дэбни, Дж. Simulink 4. Секреты мастерства / Дж. Дэбни, Т. Харман; пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003. 403 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>.

REFERENCES

1. Schneerson E. M. (2007) *Digital Relay Protection*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 549 (in Russian).
2. Schweitzer III E. O., Hou D. (1993) Filtering for Protective Relays. *WESCANEX 93. Communications, Computers and Power in the Modern Environment. Conference Proceedings. IEEE*, 15–23. <https://doi.org/10.1109/wescan.1993.270548>.
3. 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).
4. Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Bulochik E. V., Rumiantsev Yu. V. (2022) Formation of Orthogonal Components of Input Signals in Microprocessor Protection of Electric Installations that Have Detuning from Phase Dynamic Errors. *Energeticheskaya Strategiya [Energy Strategy]*, (1), 32–34 (in Russian).
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. D'yakonov V. P. (2011) *MATLAB and Simulink for Radio Engineers*. Moscow, DMK Press Publ. 975 (in Russian).
7. Chernykh I. V. (2011) *Modeling of Electrical Devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink*. Moscow, DMK Press Publ; Saint-Petersburg, Piter Publ. 288 (in Russian).
8. 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 the 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).
9. *SimPowerSystems. User's Guide. Version 5*. The MathWorks, 2011.
10. Dabney J., Harman T. (2003) *Mastering Simulink 4*. Moscow, BINOM Publ. 403 (in Russian).
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 the 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: 8 February 2022

Accepted: 19 April 2022

Published online: 31 May 2022