https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-1-5-15

УДК 621.316.925

Быстродействующий метод определения амплитуды сигнала в микропроцессорных системах автоматизации и управления при колебаниях частоты

Ю. В. Румянцев[1)], Ф. А. Романюк[1)], В. Ю. Румянцев[1)]

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

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. В микропроцессорных системах автоматизации и управления в качестве информационных параметров контролируемых величин широко используются амплитудные (действующие) значения основной гармоники входных сигналов. Наиболее часто они определяются по выборкам одной или пары ортогональных составляющих сигнала, для формирования которых преимущественно применяются цифровые фильтры Фурье и их модификации. При номинальной частоте в энергосистеме указанные фильтры обеспечивают достоверное получение амплитуды сигнала без дополнительной погрешности. В случае отклонения частоты от номинальной количество выборок за период сигнала не является целым числом и дискретизация становится асинхронной. Вследствие этого в амплитуде сигнала появляется соответствующая погрешность, а ее изменение приобретает колебательный характер. При незначительных колебаниях частоты в нормальном режиме погрешность амплитуды несущественна. Однако в анормальных ситуациях частота может иметь значительные вариации. При этом в критических ситуациях не исключены отказ систем автоматизации и управления, а также некорректная работа их функциональных алгоритмов. Известные методы определения амплитуды сигнала при колебаниях частоты обеспечивают решение имеющейся проблемы, однако отличаются невысоким быстродействием. Предлагаемый быстродействующий метод определения амплитуды при колебаниях частоты ориентирован на использование в качестве исходной информации выборок мгновенных значений косинусной ортогональной составляющей сигнала, которые формируются с помощью соответствующего цифрового фильтра Фурье. По указанным выборкам рассчитываются динамические косинус и синус угла одной выборки, использование которых при вычислении амплитуды обеспечивает ее независимость от частоты. Обработка полученной амплитуды усилительным элементом с нелинейным коэффициентом позволяет достичь приемлемого быстродействия. Оценка эффективности предложенного решения выполнялась методом вычислительного эксперимента с помощью цифровой модели, реализованной в среде динамического моделирования MATLAB-Simulink. В качестве тестовых воздействий при этом использовались как синусоидальные входные сигналы, так и сложные, приближенные к реальным вторичным сигналам измерительных трансформаторов. В результате исследований установлено, что предлагаемый метод определения амплитуды при колебаниях частоты

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

имеет быстродействие на уровне четверти периода и обеспечивает эффективное устранение частотной погрешности как в нагрузочных режимах, так и в режимах повреждений.

Ключевые слова: микропроцессорные системы автоматизации и управления, амплитуда, частота, колебания, модель, тестовое воздействие, вычислительный эксперимент, MATLAB-Simulink

Для цитирования: Румянцев, Ю. В. Быстродействующий метод определения амплитуды сигнала в микропроцессорных системах автоматизации и управления при колебаниях частоты / Ю. В. Румянцев, Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 67, № 1. С. 5–15. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-67-1-5-15

A Fast-Response Method for Determining the Amplitude of a Signal in Microprocessor Automation and Control Systems with Frequency Fluctuations

Yu. V. Rumiantsev[1)], F. A. Romaniuk[1)], V. Yu. Rumiantsev[1)]

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

Abstract. In microprocessor automation and control systems, the amplitude (effective) values of the fundamental harmonic of the input signals are widely used as information parameters of the controlled quantities. They are most often determined by samples of one or a pair of orthogonal components of the signal, for the formation of which digital Fourier filters and their modifications are mainly used. At the rated frequency in the power system, these filters ensure reliable reception of the signal amplitude without additional error. If the frequency deviates from the rated one, the number of samples per signal period is not an integer and the discretization becomes asynchronous. As a result, a corresponding error appears in the amplitude of the signal, and its change becomes oscillating. With minor frequency fluctuations in the normal mode, the amplitude error is insignificant. However, in abnormal situations, the frequency can have significant variations. At the same time, in critical situations, failure of automation and control systems, as well as incorrect operation of their functional algorithms, cannot be excluded. Known methods for determining the amplitude of a signal with frequency fluctuations provide a solution to the existing problem, but they are characterized by a slow response. The proposed high-response method for determining the amplitude during frequency fluctuations is focused on using as initial information samples of instantaneous values of the cosine orthogonal component of the signal, which are formed using an appropriate digital Fourier filter. Based on these samples, the dynamic cosine and sine of the angle of one sample are calculated, the use of which in calculating the amplitude ensures its independence from frequency. Processing of the received amplitude with an amplifying element with a nonlinear coefficient makes it possible to achieve acceptable performance. The effectiveness of the proposed solution was evaluated by a computational experiment using a digital model implemented in the MATLAB-Simulink dynamic modeling environment. In this case, both sinusoidal input signals and complex ones, close to the real secondary signals of measuring transformers, were used as test actions. As a result of the research, it was found that the proposed method for determining the amplitude during frequency fluctuations has a performance at the level of a quarter of the period and provides effective elimination of frequency error both in load modes and in damage modes.

Keywords: microprocessor automation and control systems, amplitude, frequency, oscillations, model, test action, computational experiment, MATLAB-Simulink

For citation: Rumiantsev Yu. V., Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu. (2024) A Fast-Response Method for Determining the Amplitude of a Signal in Microprocessor Automation and Control Systems with Frequency Fluctuations. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc*. 67 (1), 5–15. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-1-5-15 (in Russian)

Введение

В микропроцессорных системах автоматизации и управления в качестве информационных параметров контролируемых величин достаточно часто выступают амплитудные (действующие) значения основной гармоники входных сигналов [1]. Преимущественно они определяются по выборкам одной или пары ортогональных составляющих (ОС) указанной гармоники [2]. В сложившейся практике для выделения ОС наиболее широко используются нерекурсивные цифровые фильтры (ЦФ) Фурье и их модификации [3].

При номинальной частоте в энергосистеме ЦФ Фурье обеспечивает достоверное определение амплитуды сигнала без дополнительной погрешности. В случае отклонения частоты от номинальной количество выборок за период сигнала не является целым числом и дискретизация становится асинхронной [4]. Вследствие этого в амплитуде сигнала появляется соответствующая погрешность.

На рис. 1 показана оценка амплитуды при использовании для ее определения ЦФ Фурье с частотой дискретизации 1200 Гц.

При отклонении частоты от номинальной 50 Гц в пределах ±5 Гц амплитуда сигнала изменяется и находится в области, ограниченной минимальными (кривая 1) и максимальными (кривая 2) значениями (рис. 1a). Изменение амплитуды сигнала с частотой 48 Гц, отличной от номинальной 50 Гц, представлено на рис. 1b. Из данного рисунка видно, что амплитуда колеблется в пределах от минимального до максимального значений с удвоенной частотой (период T_{50} сигнала номинальной частоты в два раза больше периода колебаний амплитуды T). Это же наблюдается и при других частотах сигнала.

Следует отметить, что по обсуждаемому вопросу проведены полезные и всесторонние исследования, результаты которых представлены в [5].

Из приведенных на рис. 1 зависимостей можно сделать вывод, что при незначительных колебаниях частоты в энергосистеме, имеющих место в нормальном режиме, погрешность амплитуды несущественна, и на практике с нею можно не считаться. Однако в анормальных ситуациях частота может иметь значительные вариации. Такие режимы должны предотвращаться системами автоматизации и управления, которые обеспечивают возврат колебаний частоты в допустимые пределы. Однако в критических случаях не исключен их отказ в срабатывании. Кроме того, при значительных отклонениях частоты от номинальной многие из функциональных алгоритмов систем автоматизации и управления будут работать некорректно.

Предотвращение изменений амплитуды сигнала при уходе частоты может быть достигнуто за счет реализации соответствующих операций с выборками амплитудных значений синусной и косинусной ОС Фурье, как это сделано в [6]. Частичную коррекцию амплитудной погрешности можно обеспечить путем обработки выборок амплитуды ЦФ скользящего среднего [7].

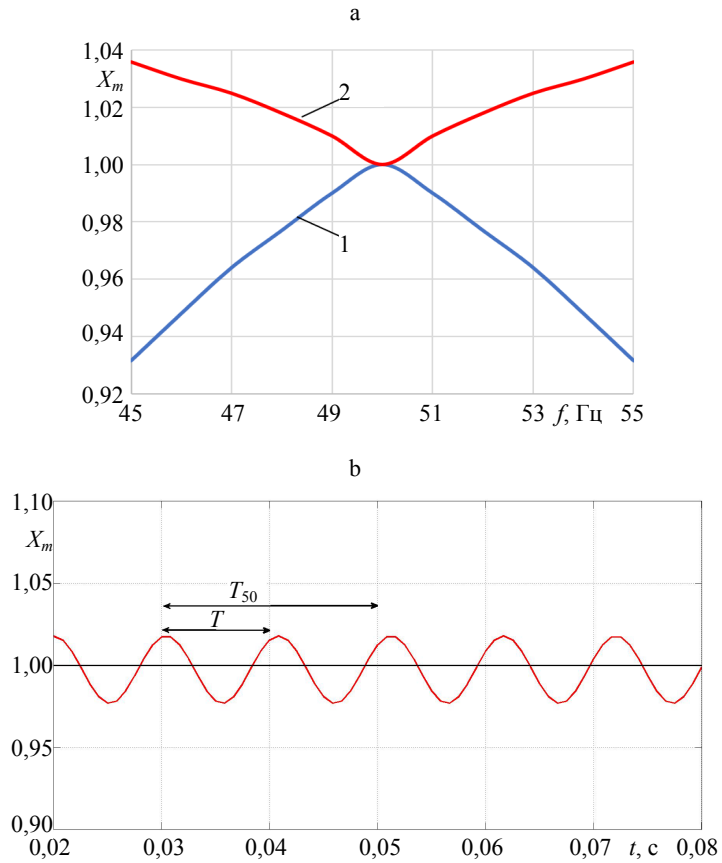

Рис. 1. Погрешность определения амплитуды сигнала, обусловленная отклонением частоты от номинальной при использовании ЦФ Фурье с частотой дискретизации 1200 Гц:
a – оценка амплитуды при отклонении частоты от –5 до 5 Гц;
b – изменение амплитуды сигнала с частотой 48 Гц, отличной от номинальной 50 Гц

Fig. 1. Error in determining the amplitude of the signal due to a frequency deviation from the nominal one when using the Fourier digital filters with a sampling frequency of 1200 Hz:
a – estimation of the amplitude with a frequency deviation from –5 to 5 Hz; b – change in the amplitude of the signal with a frequency of 48 Hz which is other than the rated one of 50 Hz

При этом следует отметить, что упомянутые методы определения амплитуды сигнала обеспечивают возможность достоверных измерений после изменения режима по истечении времени, равного одному периоду номинальной частоты и более. Использование известных модификаций ЦФ Фурье позволяет сократить указанное время в лучшем случае до половины периода.

Основная часть

Предлагаемый быстродействующий метод определения амплитуды при колебаниях частоты ориентирован на использование в качестве исходной

информации выборок мгновенных значений косинусной ОС сигнала, которые формируются с помощью соответствующего ЦФ Фурье. По указанным выборкам рассчитываются динамические косинус и синус наиболее вероятного угла одной выборки, использование которых при вычислении амплитуды обеспечивает ее независимость от частоты [8].

Обработка полученной амплитуды усилительным элементом с нелинейным коэффициентом, называемым корректирующим, позволяет достичь приемлемого быстродействия [9]. При этом основу предлагаемого метода определения амплитуды составляет выполнение следующих вычислительных операций.

Путем реализации функции косинусного нерекурсивного ЦФ по выборкам входного сигнала x_n формируется соответствующая ОС основной частоты

$$x_{cn} = \sum_{n=1}^{N} a_{cn} x_n, \tag{1}$$

где N – число выборок сигнала в окне наблюдения; n – номер выборки сигнала; a_{cn} – коэффициенты косинусного ЦФ.

По трем смежным выборкам косинусной ОС x_{cn}, $x_{c(n-1)}$, $x_{c(n-2)}$ вычисляется динамический косинус вероятного угла одной выборки с использованием выражения [10]

$$\cos(\omega\Delta t)_n = \frac{x_{cn} + x_{c(n-2)}}{2x_{c(n-1)}}. \tag{2}$$

Если на расчетном шаге n величина $x_{c(n-1)}$ близка к нулю, что определяется выполнением условия $\dfrac{|x_{c(n-1)}|}{X_{m(n-1)*}} < x_{*\min}$, где $X_{m(n-1)*}$ – амплитуда Фурье на предыдущем шаге; $x_{*\min}$ – относительное минимальное значение выборки сигнала, то $\cos(\omega\Delta t)_n$ не вычисляется, а ему присваивается значение с предыдущего шага, в противном случае осуществляется проверка на наличие выбросов. Выбросы фиксируются по выходу $\cos(\omega\Delta t)_n$ за пределы диапазона, граничные значения которого устанавливаются заданными частотами. При обнаружении выбросов $\cos(\omega\Delta t)_n$ присваивается значение, равное $\cos\dfrac{2\pi}{N}$. Затем вычисляется динамический синус вероятного угла одной выборки с учетом, что всегда $\omega\Delta t < \dfrac{\pi}{2}$

$$\sin(\omega\Delta t)_n = \sqrt{1 - \cos^2(\omega\Delta t)_n}. \tag{3}$$

Амплитуда сигнала определяется по текущим x_{cn} и предыдущим $x_{c(n-1)}$ выборкам косинусной ОС, зафиксированным через шаг дискретизации с использованием известного выражения

$$X_{mn} = \frac{\sqrt{x_{cn}^2 - 2x_{cn}x_{c(n-1)}C + x_{c(n-1)}^2}}{S}, \quad (4)$$

где C, S – соответственно косинус и синус угла одной выборки.

При вычислении по (4) амплитуды Фурье X_{mnf} значения косинуса и синуса задаются жестко равными: $C = \cos\frac{2\pi}{N}$; $S = \sin\frac{2\pi}{N}$.

Независимая от колебаний частоты амплитуда X_{mns} вычисляется по (4) с использованием динамических косинуса и синуса в соответствии с (2), (3): $C = \cos(\omega\Delta t)_n$; $S = \sin(\omega\Delta t)_n$.

Быстродействующее формирование результирующей амплитуды сигнала X_{mnr} осуществляется путем умножения X_{mns} на корректирующий коэффициент k_{kn} [11, 12]

$$X_{mnr} = k_{kn}X_{mns}. \quad (5)$$

Теоретические предпосылки для определения указанного коэффициента приведены в [13], а основанное на них выражение для k_{kn} имеет вид

$$k_{kn} = m\left(\frac{X_{mnd}}{X_{mnf}} - \frac{X_{mnf}}{X_{mnd}}\right) + 1, \quad (6)$$

где $X_{mnd} = \sqrt{\frac{2}{N}\sum_{n=1}^{N} x_n^2}$ – амплитуда входного сигнала; m – задаваемый параметр, с помощью которого можно изменять быстродействие формирования амплитуды.

Организация и проведение вычислительного эксперимента

Оценка работоспособности и эффективности функционирования предлагаемого быстродействующего метода определения амплитуды сигнала при колебаниях частоты выполнялась методом вычислительного эксперимента с использованием модели, реализованной в среде динамического моделирования MATLAB-Simulink-SimPowerSystems [14]. В ее структуре содержатся отдельные блоки моделей энергосистемы, трехфазной группы трансформаторов тока (ТТ), нагрузки и блока короткого замыкания. Модель позволяет формировать тестовые воздействия в форме как синусоидального сигнала, так и сигнала, приближенного к реальному вторичному току измерительного ТТ при коротком замыкании (КЗ), сопровождающемся понижением частоты. Особенности моделирования представленных блоков и элементов цифровой структуры подробно рассмотрены в [1].

Модель, реализующая предлагаемый частотно-независимый метод формирования амплитуды сигнала, представлена на рис. 2. Она содержит четыре подсистемы, каждая из которых выполняет одну или несколько из рассмотренных выше операций и состоит из стандартных блоков библиотеки MATLAB-Simulink. Входные и выходные порты подсистем на рис. 2 имеют такие же обозначения, как и в приведенных выше выражениях (1)–(6).

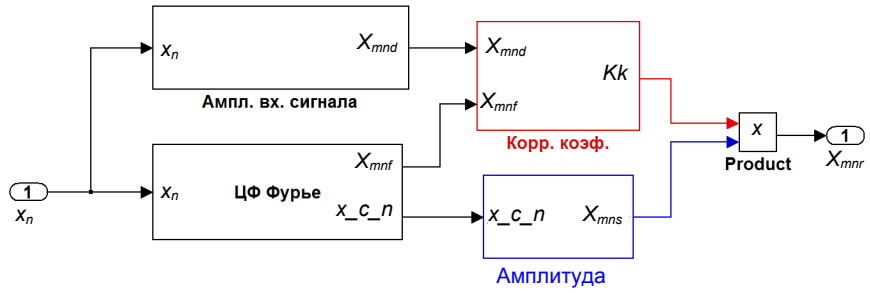

Рис. 2. Структура модели частотно-независимого метода формирования амплитуды сигнала

Fig. 2. The structure of the model of the frequency-independent method of signal amplitude formation

В подсистеме «ЦФ Фурье» по выражению (1) определяется косинусная x_{cn} ОС, а также амплитуда X_{mnf} основной гармоники входного сигнала x_n. Амплитуда входного сигнала X_{mnd} вычисляется в одноименной подсистеме «Ампл. вх. сигнала».

Значение корректирующего коэффициента k_{kn} определяется в соответствующей подсистеме по результатам расчета значений X_{mnf}, X_{mnd} и m по выражению (6).

Независимая от колебаний частоты амплитуда X_{mns} формируется в подсистеме «Амплитуда» согласно выражениям (2)–(4).

Формирование быстродействующей результирующей амплитуды X_{mnr} по выражению (5) производится путем перемножения на каждом шаге расчета выходных сигналов подсистем «Амплитуда» и «Корр. коэф.».

Результаты исследования

Для сравнительной оценки эффективности разработанного метода получены численные значения амплитуды при различных формах тестовых воздействий для режимов отклонений частоты от номинальной, изменений амплитуды, а также при одновременных их вариациях в заданные моменты времени. Соответствующие зависимости, позволяющие дать оценку предлагаемому методу определения амплитуды сигнала в различных режимах, представлены на рис. 3–5. Там же приведены аналогичные зависимости для амплитуды Фурье.

Необходимо отметить, что в результате выполненных исследований найдены оптимальные значения параметра m в (6) по критерию минимизации перерегулирования при наступлении переходного режима, которые находятся в диапазоне 1,2 – 1,5.

На рис. 3 показаны оценки амплитуды при синусоидальном сигнале (кривая 1) для вариантов определения предложенным методом (кривая 2) и методом Фурье (кривая 3).

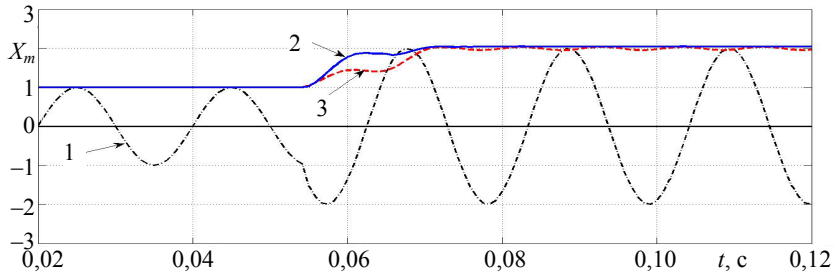

Рис. 3. Оценки амплитуды сигнала при набросе нагрузки со снижением частоты до 48 Гц

Fig. 3. Estimates of the amplitude of the signal when the load is surged with a decrease in frequency to 48 Hz

На отрезке времени t = 0,020–0,055 с имеет место нормальный установившийся режим входного сигнала 1 с номинальной частотой 50 Гц. Амплитуда, полученная разработанным методом (кривая 2), и амплитуда Фурье (кривая 3) в этом случае полностью совпадают. В момент времени t = 0,055 с происходит резкий наброс нагрузки с одновременным снижением частоты до 48 Гц, в результате чего возникает переходный режим, который длится в течение порядка периода номинальной частоты, после чего наступает новый установившийся режим. При этом время определения амплитуды с погрешностью, не превышающей ± 5% установившегося значения, предложенным методом находится на уровне четверти периода номинальной частоты, а получение амплитуды Фурье занимает около периода указанной частоты. Из рис. 3 видно, что разработанный метод обеспечивает устранение колебаний амплитуды при уходе частоты от номинального значения, чего не наблюдается для амплитуды Фурье. Следует отметить, что подобным образом протекают процессы при резком сбросе нагрузки и подъеме частоты сигнала выше номинальной.

Проведенные исследования по оценке амплитуды предложенным методом в других нагрузочных режимах с колебаниями частоты показывают, что он отличается адаптивностью к изменениям частоты и обладает достаточно высоким быстродействием.

Степень снижения частоты при коротких замыканиях определяется длительностью их существования и возникающим дефицитом мощности, наибольшая величина которого будет иметь место в сетях 110 кВ и выше. Принимая во внимание, что указанные сети оснащены быстродействующими защитами от КЗ, частота в этих режимах не будет успевать снижаться существенно. Однако с возможностью значительного снижения частоты при КЗ необходимо считаться из-за наброса активной мощности вследствие роста потерь в маломощных изолированных энергосистемах с реактированными кабельными линиями.

В этой связи оценка возможности использования предложенного метода для получения амплитуды при КЗ со снижением частоты представляет определенный интерес.

На рис. 4 представлены оценки амплитуды при близком к реальному вторичном токе в режиме КЗ (кривая 1) для вариантов определения разработанным методом (кривая 2) и методом Фурье (кривая 3).

На отрезке времени t = 0,05–0,10 с существует нормальный установившийся режим с частотой 50 Гц, в котором амплитуды, полученные обоими методами, совпадают (кривые 2, 3).

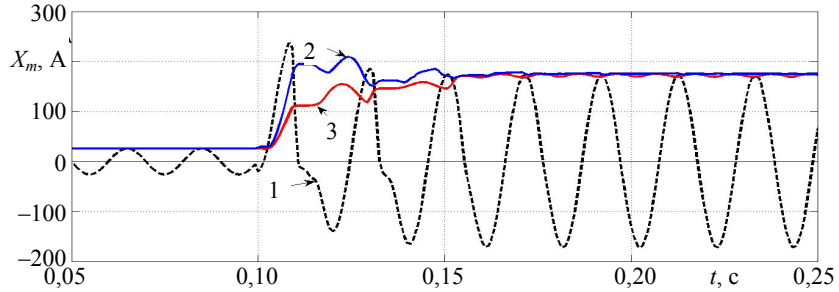

Рис. 4. Оценки амплитуды сигнала при КЗ со снижением частоты до 48 Гц

Fig. 4. Estimates of the amplitude of the signal at short circuit with a decrease in frequency to 48 Hz

В момент времени t = 0,1 с возникает КЗ со снижением частоты до 48 Гц, переходный режим которого длится около 2,5 периода номинальной частоты, после чего наступает установившийся режим КЗ. Из рис. 4 видно, что на различных участках определение амплитуды предложенным методом (кривая 2) осуществляется в 2–4 раза быстрее, чем методом Фурье (кривая 3). При этом в установившемся режиме КЗ разработанный метод устраняет колебания амплитуды, чего не происходит с амплитудой Фурье.

Для сравнительной оценки поведения рассматриваемых методов получены численные значения амплитуды, определяемой каждым из них, при КЗ с номинальной частотой 50 Гц. На рис. 5 показаны оценки амплитуды при близком к реальному вторичном токе (кривая 1) для вариантов ее нахождения предложенным методом (кривая 2) и методом Фурье (кривая 3).

Из рис. 5 видно, что в рассматриваемом режиме амплитуда X_{mns} (кривая 4), используемая в процессе реализации предложенного метода в качестве промежуточной величины, практически полностью совпадает с амплитудой Фурье (кривая 3). Поскольку X_{mns} связана с результирующей амплитудой сигнала X_{mnr} простой зависимостью (5), осуществляемой посредством корректирующего коэффициента k_{kn}, сравниваемые методы в режиме КЗ с номинальной частотой будут одинаково реагировать на изменение амплитуды сигнала.

Основное различие между ними, как следует из рис. 5, находится во временной области. Предлагаемый метод определения амплитуды имеет более высокие динамические свойства в сравнении с методом, основанным на ее вычислении с использованием исключительно положений Фурье.

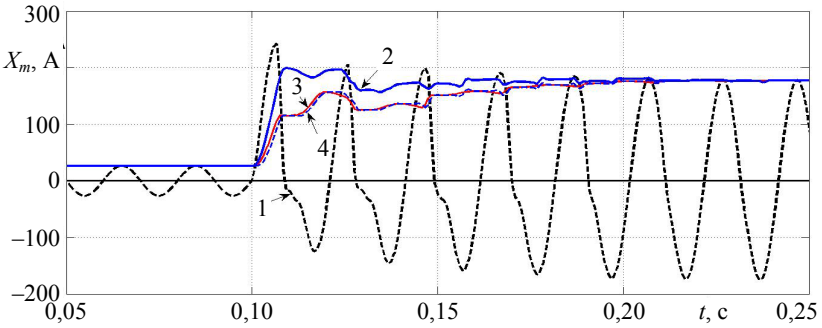

Рис. 5. Оценки амплитуды сигнала при КЗ с номинальной частотой 50 Гц

Fig. 5. Estimates of the amplitude of the signal at short circuit with a nominal frequency of 50 Hz

ВЫВОДЫ

1. Предложенный метод определения амплитуды сигнала обеспечивает устранение колебаний ее расчетных значений при отклонении частот от номинальной в заданных пределах как в нагрузочных, так и в аварийных режимах работы.

2. Результаты выполненных исследований показали, что разработанный метод обладает повышенным быстродействием во всех реально возможных режимах электроустановки, что позволяет получать достоверные значения амплитуды сигнала после ее изменения за время порядка четверти периода номинальной частоты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Испытания микропроцессорных токовых защит: теория, моделирование, практика / И. В. Новаш [и др.]. Минск: БНТУ, 2021. 168 с.
2. Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.
3. Фадке Арун, Г. Компьютерная релейная защита в энергосистемах / Арун Г. Фадке, Джеймс С. Торп; пер. с англ. под ред. Г. С. Нудельмана. 2-е изд. М.: Техносфера, 2019. 370 с.
4. Обработка сигналов в интеллектуальных сетях энергосистем / Ф. Рибейро Пауло [и др.]. М.: Техносфера, 2020. 496 с.
5. Солопов, Р. В. Оценка погрешностей при работе фильтров Фурье в устройствах релейной защиты / Р. В. Солопов, В. С. Ковженкин, Л. В. Вайтеленок // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22, № 10. С. 117–128. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-117-128.
6. 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.
7. 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.
8. Романюк, Ф. А. Способы формирования ортогональных составляющих входных сигналов для релейной защиты / Ф. А. Романюк, М. С. Ломан, В. С. Каченя // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 1. С. 5–14. https://doi.org/10. 21122/1029-7448-2019-62-1-5-14.
9. Романюк, Ф. А. Формирование ортогональных составляющих входных сигналов в цифровых измерительных органах защит с коррекцией динамических погрешностей / Ф. А. Романюк, Ю. В. Румянцев, В. Ю. Румянцев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 4. С. 289–300. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-4-289-300.
10. Принципы выполнения цифрового органа направления мощности в микропроцессорных токовых защитах / Ф. А. Романюк [и др.] // Наука и техника. 2023. Т. 22, № 4. С. 317–325. https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-317-325.
11. 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.
12. 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.
13. Цифровой измерительный орган тока релейной защиты электроэнергетической системы: пат. РБ №23972 / Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев, Ю. В. Румянцев. Опубл. 30.04.2023.
14. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2011. 288 с.

Поступила 17.10.2023 Подписана в печать 19.12.2023 Опубликована онлайн 31.01.2024

REFERENCES

1. 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).
2. Schneerson E. M. (2007) *Digital Relay Protection*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 549 (in Russian).
3. Phadke A.G., Thorp J.S. (2009) *Computer Relaying for Power Systems*. 2nd ed. Chichister, John Wiley & Sons, Ltd., 326. https://doi.org/10.1002/9780470749722.
4. Ribeiro P. F., Duque C. A., Silveira P. M. da, Cerqueira, A. S. (eds.) (2014) *Power Systems Signal Processing For Smart Grids.* John Wiley & Sons, Ltd. 417. https://doi.org/10.1002/9781118639283.
5. Solopov R. V., Kovzhenkin V. S., Vaitelenok L. V. (2018) Error Estimation under Fourier Filter Operation in Protective Relays. *Vestnik Irkutskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 22 (10), 117–128 (in Russian). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-117-128.
6. 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 (in Russian). https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-42-54.
7. Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V. (2022) Improving of Functioning Stability of Current Measuring Elements in Microprocessor Protections. *Nauka i Tehnika = Science & Technique,* 21 (5), 419–425 (in Russian). https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-5-419-425.
8. Romaniuk F. A., Loman M. S., Kachenya V. S. (2019) Methods of Forming Orthogonal Components of Input Signals for Relay Protection. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations,* 62 (1), 5–14 (in Russian). https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-5-14.
9. Romaniuk F. A., Rumiantsev Yu. V., Rumiantsev V. Yu. (2022) Formation of Orthogonal Components of Input Signals in Digital Measuring Protection Elements with Correction of Dynamic Errors. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations,* 65 (4), 289–300 (in Russian). https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-4-289-300.
10. Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V., Dziaruhina A. A., Klimkovich P. I. (2023) Principles for Implementation of Digital Power Direction Control in Microprocessor Current Protections. *Nauka i Tehnika = Science & Technique,* 22 (4), 317–325 (in Russian). https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-317-325.
11. 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 (in Russian). https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-2-95-108.
12. 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 (in Russian). https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-403-412.
13. Romanyuk F. A., Rumyantsev V. Yu., Rumyantsev Yu. V. (2023) *Digital Measuring Element of Relay Protection Current of an Electric Power System*. Patent Republic of Belarus. No 23972 (in Russian).
14. Chernykh I. V. (2011) *Simulation of Electrical Devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink*. Moscow, DMK Press; St. Petersburg, Peter. 288 (in Russian).

Received: 17 October 2023 Accepted: 19 December 2023 Published online: 31 January 2024