

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-2-99-109>

УДК 621.316.925

Формирование амплитуды сигнала в цифровых органах релейной защиты при отклонении частоты от номинальной

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

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

Реферат. В цифровых органах релейной защиты контролируемые параметрами сигналов достаточно часто выступают их амплитудные значения. Они обычно определяются по выборкам ортогональных составляющих сигналов, которые формируются нерекурсивными цифровыми фильтрами Фурье. При нормальной частоте амплитудные значения определяются без дополнительной погрешности. В режимах с отклонением частоты от номинальной возникают колебания полученных значений амплитуды в пределах от минимального до максимального уровней. Вследствие использования для формирования ортогональных составляющих фильтров Фурье время определения амплитуды находится на уровне периода промышленной частоты. Разработанная ранее методика формирования амплитуды сигнала обеспечивает исключение ее колебаний при частоте, отличной от номинальной. В ее основе лежит использование динамических косинуса и синуса угла выборки, которые вычисляются по мгновенным значениям ортогональных составляющих. При отклонении частоты от номинальной вследствие возникающих колебаний выборок указанных составляющих ограничивается частотный диапазон достоверного получения динамических косинуса и синуса, что создает препятствия для определения амплитуды с приемлемой погрешностью. Быстродействующее определение амплитуды сигнала достигается благодаря использованию в процедуре ее формирования нелинейного корректирующего коэффициента. Однако его получение с учетом возможного характера изменения контролируемого сигнала является громоздким. В настоящей работе амплитуда сигнала определяется как полусумма амплитуд синусной и косинусной ортогональных составляющих. При этом уход частоты от номинального значения не вызывает существенных изменений величины контролируемой амплитуды. Использование переходной характеристики для амплитуды сигнала, состоящей из близких к линейным участков, позволило упростить методику определения режима изменения сигнала. Проведенные вычислительные эксперименты подтвердили, что разработанная методика определения амплитуды сигнала достаточно просто реализуется на программном уровне и предотвращает ее колебания в диапазоне изменения частоты 45–55 Гц. Предложенная методика обеспечивает получение амплитудного значения сигнала за время менее половины периода промышленной частоты.

Ключевые слова: амплитуда сигнала, цифровые органы, отклонение частоты, быстродействие, вычислительный эксперимент, Matlab, Simulink

Для цитирования: Формирование амплитуды сигнала в цифровых органах релейной защиты при отклонении частоты от номинальной / Ф. А. Романюк [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2026. Т. 69, № 2. С. 99–109. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-2-99-109>

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

Formation of the Signal Amplitude in Digital Relay Protection Devices when the Frequency Deviates from the Nominal One

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

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

Abstract. In digital relay protection systems, the controlled parameters of signals are often their amplitude values. They are usually determined from samples of the orthogonal components of the signals, which are formed by non-recursive digital Fourier filters. At a normal frequency, the amplitude values are determined without additional error. In modes with frequency deviation from the nominal frequency, fluctuations in the received amplitude values occur in the range from minimum to maximum levels. Due to the use of Fourier filters for the formation of orthogonal components, the amplitude determination time is at the level of the power frequency period. The previously developed method of forming the signal amplitude ensures that it does not oscillate at a frequency other than the nominal one. It is based on the use of dynamic cosine and sine of the sampling angle, which are calculated from the instantaneous values of the orthogonal components. When the frequency deviates from the nominal frequency due to the resulting oscillations in the samples of these components, the frequency range of reliable obtaining of dynamic cosine and sine is limited, which causes obstacles to determining the amplitude with an acceptable error. Fast determination of the signal amplitude is achieved through the use of a nonlinear correction factor in the procedure for its formation. However, it is cumbersome to obtain it, taking into account the possible nature of the change in the controlled signal. In this paper, the signal amplitude is determined as the half-sum of the amplitudes of the sine and cosine orthogonal components. At the same time, frequency deviation from the nominal value does not cause significant changes in the magnitude of the controlled amplitude. The use of a transition characteristic for the amplitude of the signal, consisting of sections close to linear, made it possible to simplify the method for determining the mode of signal variation. The conducted computational experiments have confirmed that the developed method for determining the signal amplitude is quite simply implemented at the program level and prevents its oscillations in the frequency range of 45-55 Hz. The proposed technique ensures that the amplitude value of the signal is obtained in less than half of the power frequency period.

Keywords: signal amplitude, digital elements, frequency deviation, speed, computational experiment, Matlab, Simulink

For citation: Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V., Dziaruhina A. A. (2026) Formation of the Signal Amplitude in Digital Relay Protection Devices when the Frequency Deviates from the Nominal One // *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 69 (2), 99–109 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-2-99-109>

Введение

В цифровых органах релейной защиты амплитуда контролируемого сигнала в большинстве случаев определяется по выборкам одной или пары его ортогональных составляющих (ОС), которые формируются нерекурсивными цифровыми фильтрами (ЦФ) Фурье или их модификациями [1, 2]. При этом обеспечивается получение амплитудных значений сигнала с номинальной частотой без дополнительной погрешности. В режимах с отклонением частоты от номинального значения амплитуда определяется с погрешностью. При этом возникают колебания полученных значений амплитуды в пределах от минимального до максимального уровней с удво-

енной частотой [3]. Быстродействие определения амплитуды сигнала вследствие использования для формирования ОС фильтров Фурье составляет порядка периода промышленной частоты.

В [4, 5] содержится методика определения амплитуды сигнала, обеспечивающая исключение ее колебаний при отличной от номинальной частоте. Она основывается на использовании динамических косинуса и синуса угла выборки, которые вычисляются по смежным отсчетам мгновенных значений ОС. В режимах с отклонением частоты от номинальной вследствие возникающих колебаний отсчетов ОС ограничивается частотный диапазон достоверного получения динамических косинуса и синуса, что создает препятствия для определения амплитуды с приемлемой погрешностью.

Быстродействие формирования амплитуды сигнала по методике, описанной в [5], обеспечивается благодаря использованию в данной процедуре нелинейного корректирующего коэффициента, теоретические предпосылки и выражения для расчета которого приведены в [6]. Однако методика получения указанного коэффициента с учетом возможного характера изменения контролируемого сигнала представляется излишне громоздкой.

Основная часть

В основе предлагаемой методики определения амплитуды сигнала при отклонении частоты от номинальной лежит использование косинусной x_{cn} и синусной x_{sn} ОС Фурье, которые формируются по выборкам входного сигнала $x_{вхn}$ с помощью соответствующих ЦФ:

$$\begin{aligned} x_{cn} &= \sum_{n=1}^N a_{cn} \cdot x_{вхn}; \\ x_{sn} &= \sum_{n=1}^N a_{sn} \cdot x_{вхn}, \end{aligned} \quad (1)$$

где N – число выборок сигнала в окне наблюдения; n – номер выборки входного сигнала; a_{cn} , a_{sn} – коэффициенты соответственно косинусного и синусного ЦФ.

Принципиально возможно формирование с помощью соответствующего ЦФ только одной ОС, например косинусной, с последующим вычислением по ее смежным выборкам x_{cn} , $x_{c(n-1)}$ синусной составляющей

$$x_{sn} = \frac{x_{c(n-1)} - x_{cn} \cos \frac{2\pi}{N}}{\sin \frac{2\pi}{N}}. \quad (2)$$

Для текущего момента времени t_n определяются амплитуды $X_{\min}$ ($i = s, c$) синусной ($i = s$) и косинусной ($i = c$) ОС по смежным выборкам x_{in} , $x_{i(n-1)}$ ($i = s, c$), зафиксированным через шаг дискретизации [7]:

$$X_{\min} = \frac{x_{in}^2 - 2x_{in}x_{i(n-1)} \cos \frac{2\pi}{N} + x_{i(n-1)}^2}{\sin \frac{2\pi}{N}} \quad (i = s, c). \quad (3)$$

Подставляя поочередно в (3) выборки синусной ($x_{sn}, x_{s(n-1)}$) и косинусной ($x_{cn}, x_{c(n-1)}$) ОС, вычисляются соответственно их амплитуды X_{msn} и X_{mcn} . Независимая от изменения частоты амплитуда сигнала X_{mqn} определяется как полусумма амплитуд синусной и косинусной ОС [3]

$$X_{mqn} = 0,5(X_{msn} + X_{mcn}). \quad (4)$$

В случаях отклонения частоты от номинальной амплитуды X_{msn} и X_{mcn} приобретают колебательный характер, находясь в противофазе. Благодаря этому уход частоты от номинального значения не вызывает существенных колебаний X_{mqn} .

Характеристики $X_{mqn} = f(t_n)$ в переходных областях являются практически линейными зависимостями, что обеспечивается в диапазоне частот 45–55 Гц [7].

В основе идеи быстрого получения амплитудных значений сигнала в переходных режимах лежит формирование эквивалентной амплитуды X_{meqn} , являющейся функцией текущих значений нелинейного корректирующего коэффициента k_{krn} и вычисляемых по (4) значений X_{mqn}

$$X_{meqn} = k_{krn} X_{mqn}. \quad (5)$$

Скорость нарастания (спада) X_{meqn} в переходных режимах зависит от характера изменения k_{krn} . Для формирования последнего необходимо знать текущие значения базового корректирующего коэффициента k_{kn} и режим изменения сигнала.

Теоретическое обоснование и методика определения k_{kn} подробно изложены в [6]. Руководствуясь их содержанием, на основе результатов многочисленных исследований определено оптимальное выражение для базового корректирующего коэффициента применительно к решаемой задаче

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

где $X_{mnd} = \sqrt{\frac{2}{N} \sum_{n=1}^N x_{\text{вх}}^2(n)}$ – амплитуда входного сигнала; $X_{mn} = \sqrt{x_{sn}^2 + x_{cn}^2}$ –

то же основной гармоники входного сигнала; m – постоянный безразмерный коэффициент, равный 2.

Характерными режимами сигнала тока являются установившийся и переходные при возникновении и отключении повреждений. В соответствии с этим во временной области сигнал может находиться в следующих состояниях: нарастать, не изменяться, спадать.

Информация об указанных состояниях достаточно просто может быть получена по значениям амплитуды X_{mqn} на переходной характеристике с учетом, что она состоит из практически линейных участков.

На приведенной характеристике (рис. 1) можно выделить три участка, соответствующих вышеуказанным режимам и состояниям сигнала: a – участок нарастания сигнала; b – то же неизменного состояния сигнала; c – то же спада сигнала.

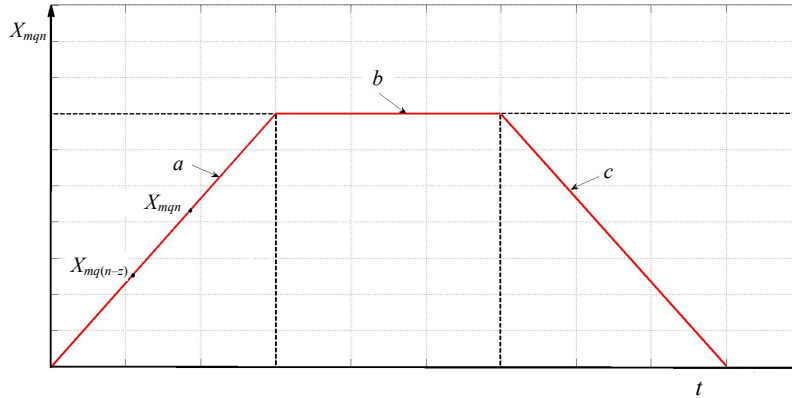


Рис. 1. Переходная характеристика

Fig. 1. Transient characteristic

Если выборка n находится на участке a , то состоянию сигнала присваивается признак $C = 1$, если n расположена на участке b , то $C = 0$, а при ее нахождении на участке c признак $C = -1$.

Для получения признака C фиксируются два смежных значения амплитуды $X_{mq(n-z)}$ и X_{mqn} , по которым вычисляется параметр P_n :

$$P_n = \frac{X_{mqn}}{X_{mq(n-z)}}. \quad (7)$$

Если $P_n \geq (1 + \varepsilon)$, то $C = 1$, в противном случае проверяется условие $P_n \leq (1 - \varepsilon)$. При его выполнении $C = -1$, в противном случае $C = 0$. Постоянная $0 < \varepsilon \leq 0,1$ обеспечивает отстройку от небольших колебаний амплитуды X_{mqn} .

Следует отметить, что изложенная выше методика определения характера изменения сигнала является более простой по сравнению с аналогичной методикой, приведенной в [8].

Результирующий корректирующий коэффициент k_{krn} , входящий в (5), вычисляется по величине базового корректирующего коэффициента k_{kn} с учетом значений C по выражению [9]

$$k_{krn} = 0,5(|C| + C)k_{kn} + 0,5(|C| - C)\frac{1}{k_{kn}} + 1 - |C|. \quad (8)$$

Эквивалентная амплитуда сигнала X_{meqn} , независимая от изменений частоты, определяется как произведение k_{kn} и X_{meqn} .

Предложенная методика формирования амплитуды сигнала в цифровых органах релейной защиты при отклонении частоты от номинальной реализуется на программном уровне, обеспечивая при этом возможность для улучшения основных свойств указанных органов.

Организация и проведение вычислительного эксперимента

Оценка эффективности предлагаемого метода формирования амплитуды сигнала проводилась с использованием цифровой модели, реализованной в среде динамического моделирования MATLAB-Simulink [10, 11]. На рис. 2 приведена укрупненная структура модели. Она содержит 8 подсистем, в каждой из которых выполняются рассмотренные выше операции, и состоит из стандартных блоков библиотеки MATLAB-Simulink. Выходные порты подсистем на рис. 2 имеют такие же обозначения сигналов, как и в математических выражениях, используемых в настоящей работе.

Тестовое воздействие на систему формируется в блоке «Вх. сигнал» и позволяет воспроизводить рабочий, аварийный и послеаварийный режимы в форме идеального синусоидального сигнала с возможностью изменения в каждом из перечисленных режимов амплитуд, фазовых сдвигов и частот.

В подсистеме «ЦФ Фурье» по выражению (1) определяется косинусная x_{cn} и синусная x_{sn} ОС, а также амплитуда X_{mnd} основной гармоники входного сигнала $x_{вх}$.

Амплитуда входного сигнала X_{mn} вычисляется в подсистеме «ЦФ амплитуды», согласно [6].

Независимая от изменения частоты амплитуда сигнала X_{mqn} определяется в блоке «Независимая амплитуда» по выборкам косинусной x_{cn} и синусной x_{sn} ОС по выражениям (3), (4).

В подсистеме «Базовый коэффициент» по амплитудам X_{mnd} и X_{mn} и формуле (6) определяется текущее значение базового корректирующего коэффициента k_{kn} , а в блоке «Признак» формируется признак C , согласно рис. 1. С использованием последних в подсистеме «Кор. коэффициент» по выражению (8) определяется значение результирующего корректирующего коэффициента k_{krn} .

Формирование эквивалентной амплитуды сигнала осуществляется в блоке «Эквив. амплитуда», согласно выражению (5), и выводится на осциллограф Scope.

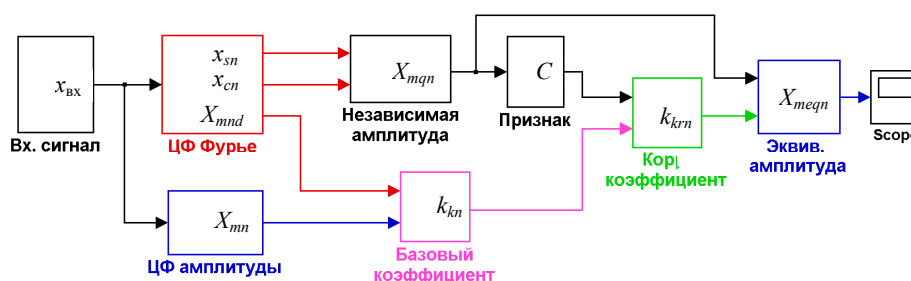


Рис. 2. Структура модели

Fig. 2. A model structure

Результаты исследования

Для сравнительной оценки эффективности разработанной методики получены численные значения амплитуды при синусоидальных тестовых воздействиях для режимов отклонений частоты от номинальной, изменений амплитуды, а также при одновременных их вариациях в заданные моменты времени. Соответствующие зависимости, позволяющие дать оценку предлагаемой методике определения амплитуды сигнала в различных режимах, представлены на рис. 3–5. Там же приведены аналогичные зависимости при получении амплитуды с помощью цифрового фильтра Фурье. Выбор ЦФ Фурье в качестве эталона для сравнения обусловлен тем, что на его основе строится большинство пусковых органов (ПО), используемых в микропроцессорных системах автоматизации и релейной защиты [5].

На рис. 3 показаны оценки амплитуды при синусоидальном сигнале (кривая 1) для вариантов определения по предложенной методике (кривая 3) и с использованием ЦФ Фурье (амплитуда Фурье) (кривая 2).

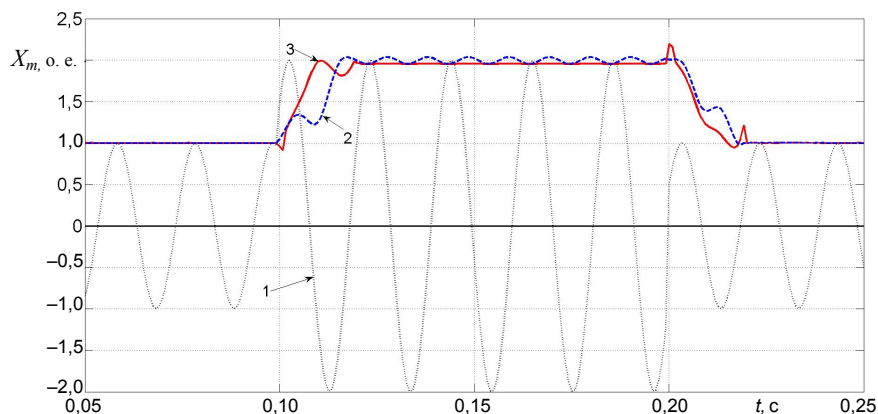


Рис. 3. Оценка амплитуды сигнала при набросе нагрузки со снижением частоты до 48 Гц с последующим сбросом и восстановлении частоты до 50 Гц

Fig. 3. Estimation of the signal amplitude during loading with frequency reduction to 48 Hz, followed by resetting and restoring the frequency to 50 Hz

На отрезке времени $t = 0,05\text{--}0,10$ с имеет место нормальный установившийся режим входного сигнала 1 с номинальной частотой 50 Гц. Амплитуда, полученная разработанным методом (кривая 3), и амплитуда Фурье (кривая 2) в этом случае полностью совпадают. В момент времени $t = 0,1$ с происходит наброс нагрузки (в 2 раза по сравнению с установившимся режимом) с одновременным снижением частоты до 48 Гц. В результате возникает переходный режим, который длится в течение времени порядка периода номинальной частоты, после чего, до момента отключения, наступает новый установившийся режим. Из рис. 3 видно, что разработанная методика обеспечивает повышенное быстродействие в определении амплитуды, а также устранение ее колебаний при уходе частоты от номинального значения, чего не наблюдается у амплитуды Фурье. Подобным образом протекают процессы при резком сбросе нагрузки и подъеме частоты сигнала выше номинальной.

На рис. 4 представлены оценки амплитуды при резком увеличении входного сигнала (кривая 1) для вариантов определения по разработанной методике (кривая 3) и использовании ЦФ Фурье (кривая 2).

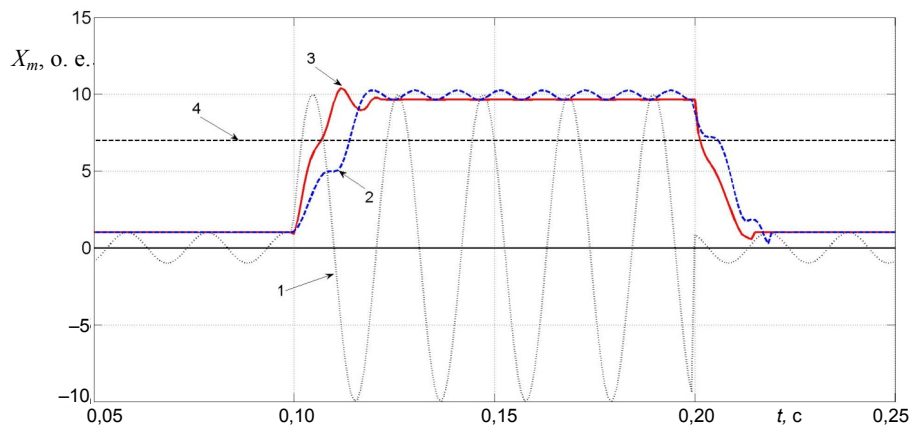


Рис. 4. Оценка амплитуды сигнала при КЗ со снижением частоты до 47 Гц с последующим отключением КЗ и восстановлением частоты до 50 Гц

Fig. 4. Estimation of the amplitude of the short-circuit signal with frequency reduction to 47 Hz, followed by short-circuit shutdown and frequency restoration to 50 Hz

На отрезке времени $t = 0,05–0,10$ с существует нормальный установившийся режим с частотой 50 Гц, в котором амплитуды, полученные по обоим методикам, совпадают, затем в момент времени $t = 0,10$ с моделируется КЗ со снижением частоты до 47 Гц. Из рис. 4 видно, что достижение амплитудой уставки срабатывания (прямая 4, расположенная на уровне 7 о. е.) по предложенной методике (кривая 3) происходит в момент времени $t = 0,107$ с, а амплитудой Фурье – при $t = 0,114$ с. Разница составляет 0,007 с, т. е. ПО, реализованный на основе предложенной методики, срабатывает на 30 % быстрее, чем ПО на основе ЦФ Фурье (кривая 2). При этом в установившемся режиме КЗ разработанный метод устраняет колебания амплитуды, чего не происходит с амплитудой Фурье.

Следует отметить, что не все и не всегда короткие замыкания сопровождаются снижением частоты. Такую вероятность необходимо учитывать вследствие роста потерь в маломощных изолированных энергосистемах с реактированными кабельными линиями. Поэтому для указанных случаев использование предложенной методики получения амплитуды при КЗ со снижением частоты представляет определенный интерес [5].

Кроме того, не вся протяженность переходной характеристики одинаково используется для срабатывания ПО. Как известно, одним из основных требований, предъявляемых к релейной защите, является требование чувствительности, которое характеризуется одноименным коэффициентом $k_{\text{ч}}$ и для ПО тока определяется как

$$k_{\text{ч}} = \frac{X_{kz \min}}{X_{\text{сп}}}, \quad (9)$$

где $X_{kz \min}$ – минимальное значение тока двухфазного КЗ; $X_{\text{сп}}$ – ток срабатывания защиты.

Применительно к токовым защита величина коэффициента чувствительности лежит в пределах $k_{\text{ч}} = 1,2-2,0$, при этом ток срабатывания ПО всегда больше (в несколько раз) длительно допустимого рабочего тока нормального режима [12].

На рис. 5 приведена переходная характеристика X пускового органа тока на основе типового ЦФ при номинальной частоте сети, на которой можно выделить несколько областей. До момента времени $t < 0,10$ с длится нормальный режим и ПО фиксирует ток нагрузки. В момент времени $t = 0,10$ с происходит трехфазное КЗ, ток растет и достигает уровня срабатывания $X_{\text{ср}}$ к моменту времени t_1 . При $X > X_{\text{ср}}$, т. е. при $t > t_1$, начинается зона действия ПО, которая принципиально может располагаться до момента окончания переходного процесса ($t = 0,02$ с). Однако начиная со времени $t > t_2$ перестает выполняться требование чувствительности. В этой зоне срабатывание ПО возможно, но неэффективно из-за того, что величина $k_{\text{ч}}$ становится меньше допустимого значения.

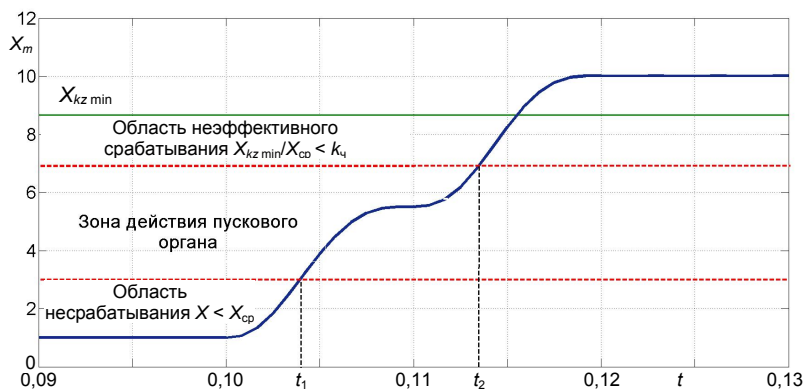


Рис. 5. Переходная характеристика пускового органа тока

Fig. 5. Transient characteristic of the starting element of current

Таким образом, наиболее важный участок переходной характеристики ограничен промежутком времени $t_1 - t_2$, и располагается он в ее центральной части, не затрагивая верхней области, где и проявляется колебательность. В силу вышеизложенного на рис. 4 и 6 уставку срабатывания, по которой оценивается динамика предлагаемой методики формирования амплитуды в сравнении с амплитудой ЦФ Фурье, выбрана на уровне 7 о. е.

На рис. 6 показана оценка амплитуды при КЗ с номинальной частотой 50 Гц (кривая 1) для вариантов ее нахождения предложенным (кривая 3) и существующим (кривая 2) методами. Как следует из рис. 6, предлагаемая методика определения амплитуды имеет более высокие динамические показатели в сравнении с методом вычисления амплитуды Фурье. Так, при уровне уставки срабатывания 7 о. е. выигрыш в быстродействии по предложенной методике составляет примерно половину периода промышленной частоты.

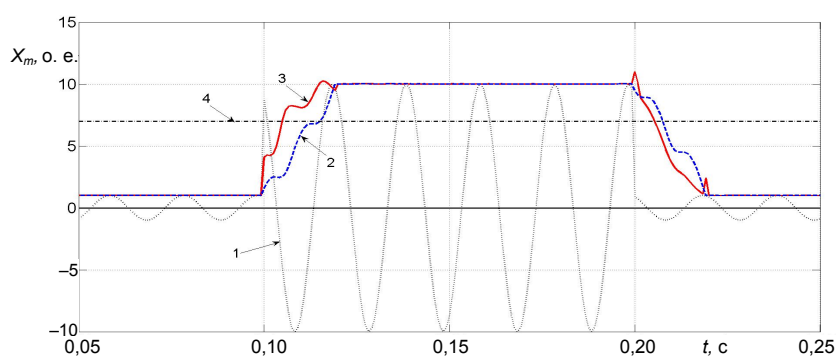


Рис. 6. Оценка амплитуды сигнала при КЗ и после его отключения с номинальной частотой до 50 Гц

Fig. 6. Estimation of the amplitude of the signal during short circuit and after its shutdown disconnection with a nominal frequency of up to 50 Hz

ВЫВОДЫ

1. Разработанная методика формирования амплитуды сигнала в цифровых органах релейной защиты отличается простотой реализации и практически исключает колебания ее значений при отклонении частоты от номинальной в диапазоне 45–55 Гц.

2. Выполненные методом вычислительного эксперимента исследования показали, что предложенная методика обеспечивает формирование амплитуды сигнала за время менее половины периода промышленной частоты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федосеев, А. М. Релейная защита электроэнергетических систем / А. М. Федосеев. М.: Энергоатомиздат, 1984. 520 с.
2. Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.
3. Снижение влияния изменений частоты на формирование ортогональных составляющих входных сигналов релейной защиты / Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев, Ю. В. Румянцев, Е. А. Дерюгина // 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. Романюк, Ф. А. Коррекция амплитудной и фазовой погрешностей сигнала в микропроцессорных системах автоматизации и релейной защиты при изменении частоты / Ф. А. Романюк, Ю. В. Румянцев, В. Ю. Румянцев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2025. Т. 68, № 1. С. 5–16. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-1-5-16>
5. 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. 2024. Т. 67, № 1. С. 5–15. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-1-5-15>
6. Румянцев, Ю. В. Формирование информационных составляющих входных величин в цифровых органах релейной защиты / Ю. В. Румянцев, В. Ю. Румянцев, Ф. А. Романюк. Минск: БНТУ, 2024. 175 с.
7. Повышение быстродействия цифрового фильтра Фурье в измерительных органах микропроцессорных защит / В. Ю. Румянцев, Ю. В. Румянцев, Ф. А. Романюк, Е. А. Дерюгина // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2025. Т. 68, № 3. С. 193–208. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-3-193-208>
8. Совершенствование алгоритма формирования ортогональных составляющих входных величин в микропроцессорных защитах / Ф. А. Романюк, Ю. В. Румянцев, В. Ю. Румянцев, И. В. Новаш // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 2. С. 95–108. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-2-95-108>
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. заве-

- дений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 4. С. 289–300. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-4-289-300>
10. Дэбни, Дж. Simulink 4. Секреты мастерства / Дж. Дэбни, Т. Харман; пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003. 403 с.
11. Гилат, А. MATLAB. Теория и практика / А. Гилат; пер. с англ. М.: ДМК Пресс, 2016. 416 с.
12. Беркович, М. А. Основы техники релейной защиты / М. А. Беркович, В. В. Молчанов, В. А. Семенов. М.: Энергоатомиздат, 1984. 376 с.
- Поступила 01.09.2025 Подписана в печать 14.11.2025 Опубликовано онлайн 31.03.2026

REFERENCES

1. Fedoseev A. M. (1984) *Relay Protection for Electrical Power Systems*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 520 (in Russian).
2. Schneerson E. M. (2007) *Digital Relay Protection*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 549 (in Russian).
3. Romaniuk E. 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>
4. Romaniuk F. A., Rumiantsev Yu. V., Rumiantsev V. Yu. (2025) Correction of Amplitude and Phase Errors of the Signal in Microprocessor Automation and Relay Protection Systems when Frequency Changes. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 68 (1), 5–16 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-1-5-16>
5. 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. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (1), 5–15 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-1-5-15>
6. Rumiantsev Yu. V., Rumiantsev V. Yu., Romaniuk F. A. (2024) *Formation of Information Components of Input Quantities in Digital Relay Protection Devices*. Minsk, BNTU. 175 (in Russian).
7. Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V., Romaniuk F. A., Dziaruhina A. A. (2025) Performance Increase of the Digital Fourier Filter in Measuring Bodies of Microprocessor Protections. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 68 (3), 193–208 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-3-193-208>
8. 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>
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. Dabney J., Harman T. (2003) *Mastering Simulink 4*. Moscow, BINOM. Laboratoriya Znanii Publ. 403 (in Russian).
11. Gilat A. (2015) *MATLAB. An Introduction with Applications*. Fifth ed. NJ, Wiley. 418.
12. Berkovich M. A., Molchanov V. V., Semenov V. A. (1984) *Fundamentals of Relay Protection Technology*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 376 (in Russian).

Received: 01 September 2025 Accepted: 14 November 2025 Published online: 31 March 2026