

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-1-23-33>

УДК 621.316.925

## Определение текущей частоты в цифровых органах релейной защиты

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

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

**Реферат.** В цифровых органах релейной защиты в качестве полезной информации используются сигналы основной гармоники. Для их выделения из сложных входных токов и напряжений защищаемого объекта применяются нерекурсивные цифровые фильтры Фурье. Полученные в результате фильтрации сигналы являются базой для определения информационных параметров контролируемых цифровыми органами величин. При номинальной частоте в энергосистеме информационные параметры вычисляются без дополнительной погрешности. В случае отклонения частоты от номинальной в силу ряда причин в информационных параметрах контролируемых величин появляется дополнительная составляющая погрешности. Когда колебания частоты незначительны, указанная составляющая несущественна и на практике ею можно пренебречь. При заметных отклонениях частоты в энергосистеме дополнительная составляющая погрешности в информационных параметрах может негативно сказаться на работе функциональных алгоритмов релейной защиты. Один из путей решения данной проблемы – коррекция указанной составляющей при отклонении частоты от номинальной. Для ее осуществления необходимо располагать результатами оценки частоты. Наиболее рациональным для целей коррекции частотной составляющей погрешности представляется использование текущей частоты. Определение указанной частоты переменного тока заключается в измерении мгновенной частоты в разные моменты времени и усреднении этих значений за определенный интервал. Мгновенная частота вычисляется по мгновенному значению динамического косинуса угла выборки, для определения которого разработаны и исследованы два функциональных алгоритма. В основе первого из них лежит использование трех последовательных значений одного из пары ортогональных сигналов. Второй алгоритм реализуется по двум смежным значениям каждого из взаимно ортогональных сигналов. Результаты выполненных исследований показали, что разработанные алгоритмы определения текущей частоты в цифровых органах релейной защиты обеспечивают ее получение с приемлемой достоверностью в диапазоне изменения 47–51 Гц при скорости изменения до 4 Гц/с.

**Ключевые слова:** цифровые органы релейной защиты, текущая частота, мгновенная частота, динамический косинус, функциональный алгоритм, модель, вычислительный эксперимент, MATLAB-Simulink, результаты исследований

**Для цитирования:** Романюк, Ф. А. Определение текущей частоты в цифровых органах релейной защиты / Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев, Ю. В. Румянцев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2026. Т. 69, № 1. С. 23–33. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-1-23-33>

---

### 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

---

## Determining the Current Frequency in Digital Relay Protection Devices

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

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

**Abstract.** In digital relay protection devices, fundamental harmonic signals are used as useful information. To isolate them from complex input currents and voltages of the protected object, non-recursive digital Fourier filters are used. The signals obtained as a result of filtering are the basis for determining the information parameters of the quantities controlled by digital organs. At the nominal frequency in the power system, the information parameters are calculated without additional error. In the event of a frequency deviation from the nominal value due to a number of reasons, an additional error component appears in the information parameters of the controlled values. When there are minor frequency fluctuations, the specified component is insignificant and can be neglected in practice. In case of significant frequency deviations in the power system, the additional component of error in the information parameters can negatively affect the operation of the functional algorithms of the relay protection. One of the ways to solve this problem is to correct the specified component when the frequency deviates from the nominal one. To implement this, it is necessary to have the results of frequency assessment. The most rational way to correct the frequency component of the error is to use the current frequency. Determining the specified frequency of alternating current consists of measuring the instantaneous frequency at different points in time and averaging these values over a certain interval. The instantaneous frequency is calculated from the instantaneous value of the dynamic cosine of the sampling angle, for the determination of which two functional algorithms have been developed and studied. The first of these is based on the use of three consecutive values of one of a pair of orthogonal signals. The second algorithm is implemented using two adjacent values of each of the mutually orthogonal signals. The results of the conducted studies showed that the developed algorithms for determining the current frequency in digital relay protection devices ensure its receipt with acceptable reliability in the range of 47–51 Hz at a change rate of up to 4 Hz/s.

**Keywords:** digital relay protection devices, current frequency, instantaneous frequency, dynamic cosine, functional algorithms, model, computational experiment, MATLAB-Simulink, research results

**For citation:** Romanuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V. (2026) Determining the Current Frequency in Digital Relay Protection Devices // *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 69 (1), 23–33. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-1-23-33> (in Russian)

### Введение

В цифровых органах релейной защиты (ЦО) в качестве полезной информации, как правило, используются сигналы основной гармоники [1]. Для их выделения из сложных входных токов и напряжений защищаемого объекта преимущественно применяются нерекурсивные цифровые фильтры (ЦФ) Фурье и их различные вариации [2, 3]. По выборкам полученных в результате цифровой фильтрации сигналов вычисляются информационные параметры контролируемых ЦО величин.

При номинальной частоте в энергосистеме указанные информационные параметры определяются без дополнительной погрешности. В случае отклонения частоты от номинальной количество выборок входного сигнала за период оказывается не целым числом, а дискретизация становится асин-

хронной [1]. Это порождает появление в информационных параметрах контролируемых величин дополнительной составляющей погрешности, которую будем называть частотной. При незначительных колебаниях частоты в энергосистеме, имеющих место в нормальном режиме, частотная составляющая погрешности несущественна и на практике ею можно пренебречь. В аварийных ситуациях отклонения частоты от номинальной могут быть значительными. Такие режимы должны предотвращаться системами противоаварийной и режимной автоматики [5], которые обеспечивают возврат колебаний частоты в допустимые пределы. Однако в силу различных факторов указанные системы могут не действовать. Возрастающая при этом частотная составляющая погрешности может существенно исказить информационные параметры контролируемых ЦО величин. В результате создается реальная возможность возникновения нарушений в работе функциональных алгоритмов релейной защиты.

Одним из путей решения данной проблемы является коррекция частотной составляющей погрешности при уходе частоты от номинального значения.

В основе реализации данного подхода лежит непосредственная или косвенная оценка частоты с последующим ее использованием для осуществления коррекции.

## Основная часть

Для целей коррекции частотной составляющей погрешности информационных параметров величин, контролируемых ЦО релейной защиты, требуется оперативное определение частоты переменного тока. Это означает быстрое и точное измерение текущей частоты в реальном времени и с минимальной задержкой.

Для получения частоты переменного тока в реальном времени цифровыми методами преимущественно используются два основных подхода: метод прямого счета импульсов и метод обратного счета импульсов [6]. Необходимо отметить, что эти методы достаточно сложны в реализации и их применение для решения задачи коррекции частотной составляющей погрешности не является целесообразным.

Текущую частоту переменного тока, когда она меняется, можно оперативно определить путем измерения мгновенной частоты в разные моменты времени и усреднения этих значений за определенный интервал. Мгновенная частота представляет собой скорость изменения фазы указанного тока в конкретный момент времени [6]. Наиболее просто ее можно оценить на основе разности фаз сигнала между соседними дискретными значениями, которая в сущности является углом выборки  $\Delta\phi_n$ :

$$f_{in} = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta\phi_n}{\Delta t}, \quad (1)$$

где  $\Delta t$  – шаг дискретизации.

Для определения  $\Delta\phi_n$  можно воспользоваться мгновенным значением динамического косинуса угла выборки  $C_{in} = \cos\Delta\phi_n$ , являющегося параметром, когда имеет место изменение указанного угла во времени. Принимая во внимание, что входные токи и напряжения ЦО релейной защиты в результате их цифровой фильтрации преобразуются в гармонические и, как правило, представляются парой ортогональных составляющих (ОС) основной частоты, рассмотрим два алгоритма получения значений  $C_{in}$ .

В первом алгоритме мгновенное значение динамического косинуса угла выборки вычисляется по трем последовательным выборкам  $x_n$ ,  $x_{n-1}$ ,  $x_{n-2}$  одной из ОС, зафиксированным через шаг  $\Delta t$  [8–11]:

$$C_{in} = \frac{x_n + x_{n-2}}{2x_{n-1}}. \quad (2)$$

Очевидно, что когда выборка  $x_{n-1}$  равна 0, определение  $C_{in}$  не представляется возможным. В этом случае  $C_{in}$  вычисляется по (2) с использованием таких же выборок другой ОС. Критерием наступления такой ситуации может служить выполнение условия  $\left| \frac{x_{n-1}}{X_{mn}} \right| < x_{min}$ , где  $X_{mn}$  – амплитуда сигнала;  $x_{min}$  – минимально допустимое относительное значение выборки. Следует отметить, что данный алгоритм сохраняет работоспособность при угле сдвига фаз между ОС, отличном от  $\pi/2$ , что важно в условиях изменения частоты. Его собственное быстродействие при учете основных факторов оценивается двумя шагами дискретизации  $\Delta t$ .

Второй алгоритм определения мгновенного значения динамического косинуса угла выборки предполагает использование двух последовательных выборок  $x_n$ ,  $x_{n-1}$  одной из ОС и значения указанного косинуса с предыдущего шага расчета  $C_{i(n-1)}$ . По вышенназванным величинам вычисляется мгновенное значение динамического синуса угла выборки  $S_{i(n-1)}$

$$S_{i(n-1)} = \sqrt{1 - C_{i(n-1)}^2} \quad (3)$$

и формируется дополнительный сигнал  $x_{dn}$

$$x_{dn} = \frac{x_{n-1} - x_n C_{i(n-1)}}{S_{i(n-1)}}, \quad (4)$$

который ортогонален сигналу выбранной ОС  $x_n$  при частоте в конкретный момент времени.

Благодаря этому угол сдвига фаз между сигналами  $x_n$  и  $x_{dn}$  равен  $\pi/2$  и остается постоянным при изменении частоты.

Мгновенное значение динамического косинуса угла выборки определяется по разности фаз между соседними выборками  $\phi_n - \phi_{n-1}$ . Принимая во внимание, что  $C_{in} = \cos(\phi_n - \phi_{n-1})$ , его величину можно вычислить по выборкам  $x_n$ ,  $x_{n-1}$  и  $x_{dn}$ ,  $x_{d(n-1)}$

$$C_{in} = \frac{x_n x_{n-1} + x_{dn} x_{d(n-1)}}{x_n^2 + x_{dn}^2}. \quad (5)$$

Отличительной особенностью данного алгоритма является необходимость формирования дополнительного сигнала, ортогонального исходному при частоте, имеющей место на расчетном интервале. Его быстродействие такое же, как у первого алгоритма при гармоническом сигнале.

Выражения (2), (5) позволяют получать достоверные мгновенные значения динамического косинуса угла выборки при гармонических сигналах. Из-за искажения формы указанных сигналов под воздействием различных факторов  $C_{in}$  может определяться с большими погрешностями и возникающими при этом выбросами  $C_{in}$ . Для их ограничения устанавливается диапазон контролируемых значений  $C_{in}$ . При выходе мгновенным значением динамического косинуса угла выборки за установленные пределы  $C_{in}$  присваивается величина, равная  $\cos(100\pi\Delta t)$ .

В результате выполненных исследований подтверждена целесообразность определения текущей частоты не путем измерения ее мгновенной величины и усреднения результатов за определенный интервал, а посредством вначале усреднения мгновенных значений динамического косинуса угла выборки за принятый временной промежуток с последующим вычислением контролируемой частоты. Наиболее простым решением для получения усредненной величины динамического косинуса  $C_{cp,n}$  является использование для этой цели ЦФ скользящего среднего [4].

Текущая частота  $f_{cp,n}$  определяется по значению  $C_{cp,n}$

$$f_{cp,n} = \frac{1}{2\pi\Delta t} \arccos C_{cp,n}. \quad (6)$$

### Организация и проведение вычислительного эксперимента

Оценка эффективности определения текущей частоты предложенными алгоритмами проводилась с использованием цифровой модели, реализованной в среде динамического моделирования MATLAB-Simulink [12–14].

На рис. 1 приведена укрупненная структура модели. Она содержит 10 подсистем, в каждой из которых выполняются рассмотренные выше операции, и состоит из стандартных блоков библиотеки MATLAB-Simulink. Выходные порты подсистем на рис. 1 имеют такие же обозначения сигналов, как в математических выражениях, используемых в настоящей работе.

Тестовое воздействие на систему формируется в блоке «Вх. сигнал». Он позволяет воспроизводить рабочий, аварийный и послеаварийный режимы в форме как идеального синусоидального сигнала с возможностью изменения в каждом из перечисленных режимов амплитуд, фазовых сдвигов и частот, так и сигнала с наличием в нем высших гармоник, апериодической составляющей, а также синусоидальных колебаний, частота которых линейно изменяется во времени.

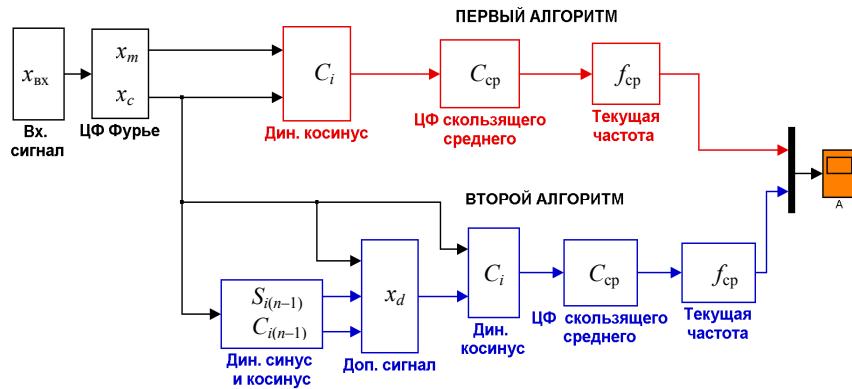


Рис. 1. Структура модели

Fig. 1. Model structure

В подсистеме «ЦФ Фурье» определяются синусная и косинусная ОС, из которых в дальнейшем используются косинусная  $x_c$ , а также амплитуда  $X_m$  основной гармоники входного сигнала.

Блоки «Вх. сигнал», «ЦФ Фурье» и осциллограф А являются общими для обоих алгоритмов определения частоты.

Для первого алгоритма используются три блока. В блоке «Дин. косинус» реализуется выражение (2) для определения мгновенного значения динамического косинуса  $C_i$  по трем выборкам косинусной ОС с учетом деления на нуль при  $x_{n-1} = 0$ . Далее в блоке «ЦФ скользящего среднего» по шести отсчетам  $C_i$  формируется усредненное значение  $C_{\text{ср}}$ , а в блоке «Текущая частота» по величине  $C_{\text{ср}}$  согласно выражению (6) определяется текущая частота входного сигнала.

Второй алгоритм определения текущей частоты содержит пять блоков. В блоке «Дин. синус и косинус» определяется динамический косинус с предыдущего шага расчета  $C_{i(n-1)}$ , а по формуле (3) – динамический синус  $S_{i(n-1)}$ . По двум последовательным выборкам косинусной ОС, а также значениям  $S_{i(n-1)}$  и  $C_{i(n-1)}$  согласно выражению (4) в блоке «Доп. сигнал» формируется ортогональный косинусному дополнительный сигнал  $x_{dn}$ . Мгновенное значение динамического косинуса  $C_{in}$  по выражению (5) формируется в блоке «Дин. косинус». Блоки «ЦФ скользящего среднего» и «Текущая частота» аналогичны подобным блокам в первом алгоритме.

### Результаты исследования

**Расчет частоты при различной скорости ее изменения и неизменном входном сигнале.** Предложенные алгоритмы ориентированы на определение частоты в диапазоне 47–51 Гц. При необходимости указанный диапазон может быть расширен. Однако это будет сопровождаться потерей точности главным образом в переходных режимах. На рис. 2 приведены результаты определения частоты  $f(t)$  в указанном диапазоне при скорости

ее изменения 4 Гц/с (рис. 2а) и в диапазоне 49–50 Гц при скорости ее изменения 1 Гц/с (рис. 2б) для первого (кривая 1) и второго (кривая 2) алгоритмов. В обоих случаях как первый, так и второй алгоритм вычисляют текущую частоту с достаточной точностью, однако первый алгоритм дает практически линейную зависимость  $f(t)$ , в то время как результаты расчетов частоты по второму алгоритму сопровождаются разбросом значений тем больше, чем больше частота отличается от номинальной.

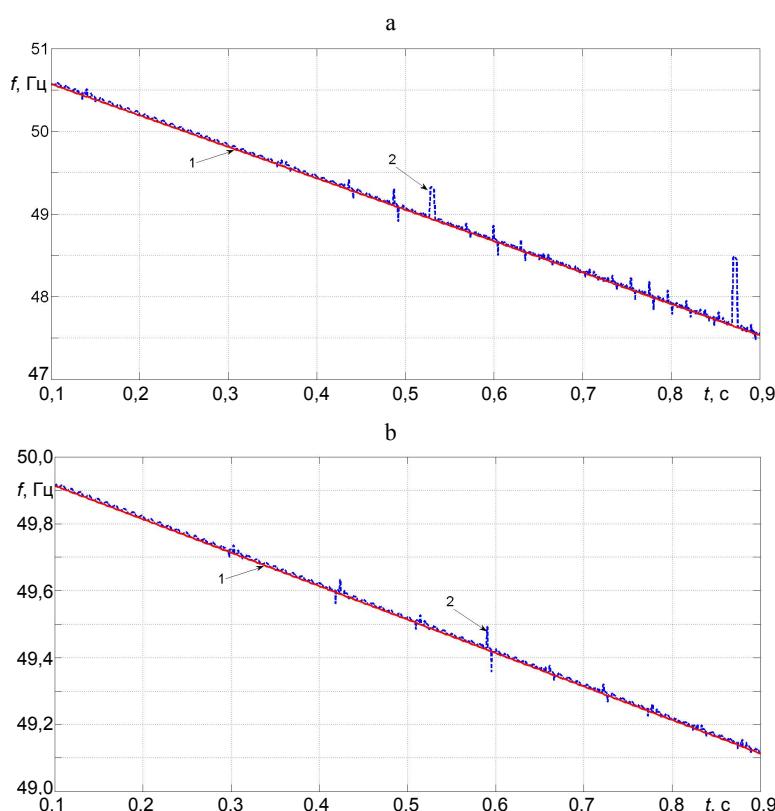
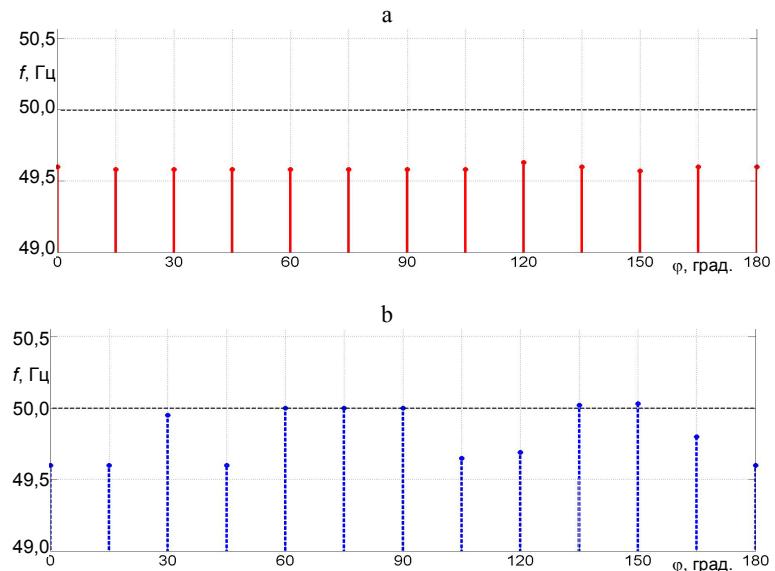


Рис. 2. Результаты определения частоты  $f(t)$  при скорости ее изменения 4 Гц/с (а) и 1 Гц/с (б) для первого (кривая 1) и второго (кривая 2) алгоритмов

Fig. 2. Results of determining the frequency  $f(t)$  at a rate of change of 4 Hz/s (a) and 1 Hz/s (b) for the first (curve 1) and the second (curve 2) algorithms

**Расчет частоты сигнала, содержащего переходный процесс различной интенсивности.** Для всех рассматриваемых ниже режимов входной сигнал изменяется во времени следующим образом. В промежутке времени  $t = 0\text{--}0,1$  с моделируется нормальный режим, в промежутке  $t = 0,1\text{--}0,4$  с – аварийный режим, уровень сигнала которого в 10 раз выше нормального режима, и в диапазоне времени  $t = 0,4\text{--}0,5$  с – послеаварийный режим с уровнем доаварийного сигнала. Для определения момента включения гармонического сигнала, при котором частота в переходном режиме вычисляется с наибольшей погрешностью, была проведена серия расчетов

в диапазоне изменения фазы включения  $\varphi = 0\text{--}180$  градусов с шагом 15 градусов (рис. 3а, б). Как видно из рисунков, один из вариантов угла включения, дающий наихудший результат для обоих алгоритмов  $\varphi = 0^\circ$ , принят для дальнейших расчетов.



*Rис. 3. Отличия расчетной частоты  $f$  от номинальной при включении синусоидального сигнала с различной фазой  $\varphi$ :*  
а – первый алгоритм; б – второй алгоритм

*Fig. 3. Differences between the calculated frequency  $f$  and the nominal frequency when a sinusoidal signal with different phase  $\varphi$  is applied:*  
a – first algorithm; b – second algorithm

Сравнивая результаты моделирования, представленные на рис. 4 и 5, можно утверждать, что текущая частота при синусоидальном воздействии определяется по обоим алгоритмам практически одинаково за время, не превышающее 1 период промышленной частоты, и с приемлемой погрешностью расчёта. При несинусоидальном сигнале точное определение текущей частоты затягивается на время затухания апериодической составляющей, причем значения частоты по второму алгоритму сопровождаются значительными колебаниями по сравнению с первым алгоритмом.

К достоинству второго алгоритма следует отнести пусть и незначительное, но увеличение быстродействия при синусоидальном воздействии в переходном режиме. На рис. 6 представлен увеличенный фрагмент зависимости  $f(t)$  при угле включения  $\varphi = 45^\circ$ . Как видно из рисунка, после короткого замыкания в момент времени  $t = 0,1$  с время определения текущей частоты  $t_2$  по второму алгоритму несколько меньше, чем время определения частоты  $t_1$  по первому алгоритму.

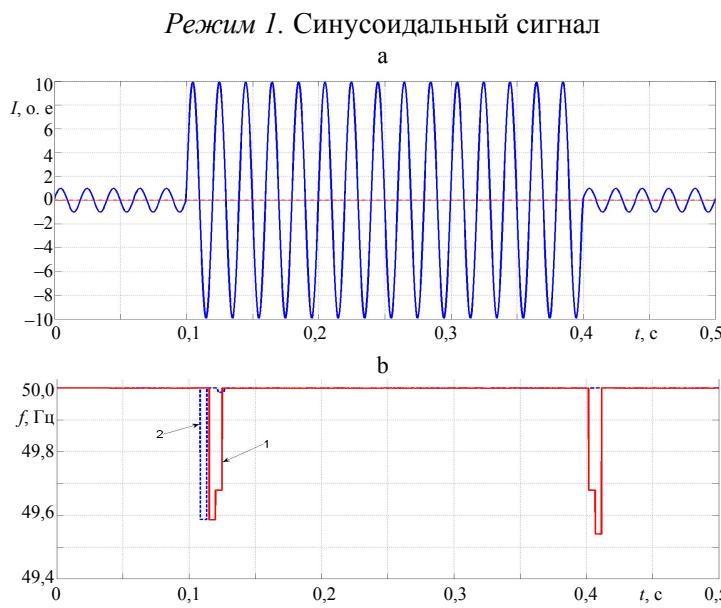


Рис. 4. а – входной синусоидальный сигнал  $i(t)$ ; б – результаты определения частоты  $f(t)$  для первого (кривая 1) и второго (кривая 2) алгоритмов

Fig. 4. a – input sinusoidal signal  $i(t)$ ; b – results of determining the frequency  $f(t)$  for the first (curve 1) and second (curve 2) algorithms

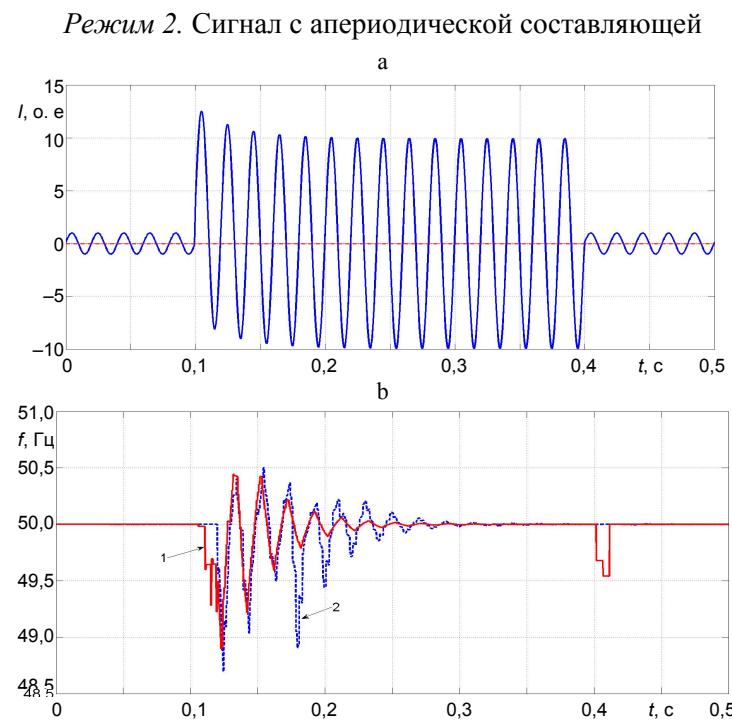
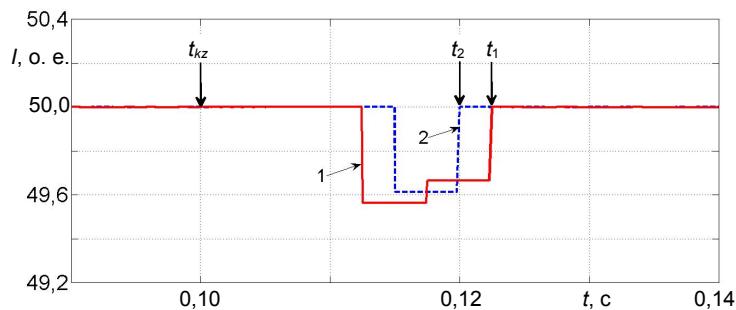


Рис. 5. а – входной сигнал с апериодической составляющей  $i(t)$ ; б – результаты определения частоты  $f(t)$  для первого (кривая 1) и второго (кривая 2) алгоритмов

Fig. 5. a – input signal with an aperiodic component  $i(t)$ ; b – results of determining the frequency  $f(t)$  for the first (curve 1) and second (curve 2) algorithms



*Рис. 6. Оценка быстродействия алгоритмов при угле включения  $\varphi = 45^\circ$ :  
кривая 1 – первый алгоритм; кривая 2 – второй алгоритм;  $t_{kz}$  – момент возникновения  
короткого замыкания;  $t_1$  и  $t_2$  – время определения частоты  
по первому и второму алгоритмам соответственно*

*Fig. 6. Evaluation of the algorithm performance at a switching angle of  $\varphi = 45^\circ$ :  
curve 1 – first algorithm; curve 2 – second algorithm;  $t_{kz}$  – short circuit occurrence time;  
 $t_1$  and  $t_2$  – frequency determination time according to the first and second algorithms, respectively*

## ВЫВОДЫ

1. Разработаны и исследованы функциональные алгоритмы оценки текущей частоты в цифровых органах релейной защиты для организации коррекции частотной составляющей погрешности определения контролируемых информационных параметров при уходе частоты от номинальной.
2. Сравнительный анализ полученных результатов, с учетом простоты реализации, позволяет считать предпочтительным для оценки текущей частоты алгоритм, основанный на использовании трех последовательных выборок каждой из ортогональных составляющих сигнала.

## 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. 594 с.
3. Фадке, А. Г. Компьютерная релейная защита в энергосистемах / А. 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 / П. Ф. Рибейро, К. А. Дуке, П. М. да Сильвейра, А. С. Серкейра. М.: Техносфера, 2020. 496 с.
5. Ананичева, С. С. Качество электроэнергии. Регулирование напряжения и частоты в энергосистемах: учеб. пособие / С. С. Ананичева, А. А. Алексеев, А. Л. Мызин. 3-е изд., испр. Екатеринбург: УрФУ, 2012. 93 с.
6. Аминев, А. В. Измерения в телекоммуникационных системах: учеб. пособие. 2-е изд., стер. / А. В. Аминев, А. В. Блохин. М.: Финита, 2018. 224 с.
7. Финк, Л. М. Сигналы, помехи, ошибки... Заметки о некоторых неожиданностях, парадоксах и заблуждениях в теории связи / Л. М. Финк. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1984. 256 с.
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. Зайцева, И. Н. О некоторых вопросах дискретизации и определения основных параметров гармонических сигналов / И. Н. Зайцева, В. Н. Угольков // Журнал радиоэлектроники. 2024. № 7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.7.2>.

10. 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>.
11. 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>.
12. Дэбни, Дж. Simulink 4. Секреты мастерства / Дж. Дэбни, Т. Харман; пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003. 403 с.
13. Испытания микропроцессорных токовых защит: теория, моделирование, практика / И. В. Новаш, Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев, Ю. В. Румянцев. Минск: БНТУ, 2021. 168 с.
14. Гилат, А. MATLAB. Теория и практика / А. Гилат; пер. с англ. М.: ДМК Пресс, 2016. 416 с.

Поступила 25.09.2025 Подписана в печать 27.11.2025 Опубликована онлайн 30.01.2026

#### REFERENCES

1. Fedoseev A. M. (1984) *Relay Protection of Electric Power Systems*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 520 (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*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470749722>.
4. Ribeiro P. F., Duque C. A., Silveira P. M. da, Cerqueira A. S. (eds.) (2013) *Power Systems Signal Processing For Smart Grids*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118639283>.
5. Ananicheva S. S., Alekseev A. A., Myzin A. L. (2012) *Power Quality. Voltage and Frequency Regulation in Power Systems*. 3<sup>rd</sup> ed. Ekaterinburg, Ural Federal University. 93 (in Russian).
6. Aminev A. V., Blokhin A. V. (2018) *Measurements in Telecommunication Systems*. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Finita Publ. 224 (in Russian).
7. Fink L. M. (1984) *Signals, Interference, Errors... Notes on Some Surprises, Paradoxes, and Misconceptions in Communication Theory*. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Radio i Svyaz Publ. 256 (in Russian).
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. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-5-14> (in Russian).
9. Zaitseva, I. N., & Ugol'kov, V. N. (2024). Some Problems of Discretization and Determination of Basic Parameters of Harmonic Signals. *Journal of Radio Electronics*, (7) (in Russian). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.7.2>.
10. 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. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-1-5-15> (in Russian).
11. 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. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-1-5-16> (in Russian).
12. Dabney J. B. (2001) *Simulink 4 Upper Saddle River*. New Jersey.
13. Novash I. V., Romanyuk F. A., Rumyantsev V. Yu., Rumyantsev Yu. V. (2021) *Testing of Microprocessor-Based Current Protection: Theory, Modeling, Practice*. Minsk, Belarusian National Technical University. 168 (in Russian).
14. Gilat A. (2015) *MATLAB: an introduction with applications*. Wiley.

Received: 25 September 2025 Accepted: 27 November 2025 Published online: 30 January 2026