

СУДОВЫЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

MARINE ELECTRICAL GENERATING COMPLEXES AND SYSTEMS

Научная статья
УДК 681.5
<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-3-77-81>

Расчет шага дискретизации контролируемых величин в каналах связи релейной защиты

Александр Сергеевич Бордюг

*Керченский государственный морской технологический университет,
Керчь, Россия, alexander.bordyug@mail.ru*

Аннотация. В устройствах релейной защиты с цифровой обработкой информации входными контролируемые величины являются получаемые от традиционных измерительных трансформаторов тока и напряжения защищаемого объекта, которые с помощью соответствующих преобразователей преобразуются в сигналы напряжения. Для ограничения частотного спектра эти сигналы подвергаются предварительной аналоговой фильтрации, после чего дискретизируются по времени с заданным шагом Δt и квантуются по уровню. Доказано, что разность смежных дискретных значений контролируемой величины зависит от ее амплитуды, а минимальная величина этой разности наблюдается в режиме минимального сигнала, т. е. при выборе минимального шага Δt определяющим является режим с минимальной амплитудой контролируемой величины. Подтверждено, что разность смежных дискретных значений контролируемой величины зависит от частоты и уменьшается со снижением последней, т. е. при выборе минимального шага дискретизации Δt необходимо принимать во внимание минимально возможное значение частоты. Приводится пример зависимости минимального шага дискретизации синусоидального сигнала частотой 50 Гц от разрядности АЦП. Согласно анализу представленных зависимостей минимальное значение шага дискретизации Δt в значительной степени определяется кратностью контролируемой величины и разрядностью АЦП. Сделаны выводы о возможности использования предложенной методики для ориентировочной оценки минимального значения шага дискретизации входных величин в устройствах релейной защиты с цифровой обработкой информации.

Ключевые слова: дискретизация, релейная защита, сигнал, информация, квантование

Для цитирования: Бордюг А. С. Расчет шага дискретизации контролируемых величин в каналах связи релейной защиты // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2022. № 3. С. 77–81. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-3-77-81>.

Original article

Calculating discretization step of controlled values in relay protection communication channels

Alexander S. Bordyug

*Kerch State Maritime Technological University,
Kerch, Russia, alexander.bordyug@mail.ru*

Abstract. In relay protection devices with information digital processing the input controlled values are the currents and voltages of the protected object received from traditional measuring transformers, which are converted into voltage signals using appropriate converters. To limit the frequency spectrum these signals are subjected to preliminary analog filtering, after which they are discretized in time with a desired step Δt and are quantized by level. The difference between adjacent discrete values of the controlled value is proved to depend on its amplitude, and the minimum value of this difference can be observed in the minimum signal mode. When choosing the minimum step Δt the mode with the minimum amplitude of the controlled value is decisive. It has been proved that the difference between adjacent discrete values of the controlled value depends on the frequency and decreases with a decrease in the latter, i.e. when choosing the minimum sampling step Δt it is necessary to take into account the minimum possible value of the frequency. There is shown an example of the dependence of the minimum sampling step of a sinusoidal signal with a frequency of 50 Hz on the ADC bit depth. The analysis of the presented dependences shows that the minimum value of the sampling step Δt is largely determined by the multiplicity of the controlled value and the ADC bit depth. There has been inferred the possibility of using the proposed methods for a rough estimation of the minimum value of a sampling step of input quantities in relay protection devices with information digital processing.

Keywords: discretization, relay protection, signal, information, quantization

For citation: Bordyug A. S. Calculating discretization step of controlled values in relay protection communication channels. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies.* 2022;3:77-81. (In Russ.) <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-3-77-81>.

Введение

Определение шага дискретизации Δt контролируемых величин – одна из основных задач при разработке устройств релейной защиты (РЗ) с цифровой обработкой информации. От выбора Δt в итоге зависят быстрдействие защиты и точность восстановления контролируемых сигналов.

Теоретическое обоснование выбора шага дискретизации аналоговых сигналов с ограниченным спектром частот содержит теорема Котельникова [1], согласно которой

$$\Delta t \leq \frac{1}{2f_{\text{гр}}},$$

где $f_{\text{гр}}$ – граничная частота спектра.

Следует отметить, что с уменьшением Δt повышается точность восстановления контролируемого сигнала, а также быстрдействие защиты. Вместе с тем при очень малом шаге дискретизации из-за влияния на результат преобразования различных ошибок можно не получить желаемого эффекта. Поэтому целесообразно ограничить величину Δt таким минимальным уровнем, чтобы смежные дискретные значения контролируемого сигнала были четко различимыми и не перекрывались вследствие действия ошибок. Для выполнения данного условия необходимо выбором шага дискретизации Δt обеспечить разность смежных дискретных значений сигнала, равную или больше шага квантования по уровню, с учетом влияния максимальных ошибок.

Материалы исследования

Пусть контролируемая величина подвергается предварительной аналоговой обработке, включающей преобразование ее в сигнал напряжения и частотную фильтрацию, и преобразуется в циф-

ровой эквивалент. При этом абсолютная ошибка предварительной обработки контролируемой величины определяется как

$$\varepsilon_u = \bar{u}_u - u,$$

где \bar{u}_u – приближенное значение аналоговой величины после предварительной обработки; u – фактическое значение величины.

Поскольку ε_u может иметь разные знаки, то

$$\bar{u}_u \varepsilon_u = \varepsilon_u \pm u(t).$$

В процессе преобразования аналоговой величины \bar{u}_u в цифровой эквивалент возникает ошибка аналого-цифрового преобразования $\pm \varepsilon_{\text{АЦП}}$, которая добавляется к преобразованному значению величины u , в результате чего

$$\bar{u} = \varepsilon_u \pm \varepsilon_{\text{АЦП}} \pm u, \quad (1)$$

где \bar{u} – приближенное значение контролируемой величины после предварительной аналоговой обработки и аналого-цифрового преобразования.

Ошибка $\varepsilon_{\text{АЦП}}$ включает две составляющие: аналоговую ε_a и квантования сигнала по уровню ε_k [2]. Аналоговая ошибка обусловлена главным образом погрешностями аналоговых элементов схемы аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Отметим, что наибольшее распространение получили АЦП с алгоритмом равномерного квантования сигнала по уровню. В этом случае максимальная ошибка квантования не превышает половины шага квантования по уровню

$$\varepsilon_k = \pm 0,5 \cdot 2^{-n} U_{\text{АЦП}}, \quad (2)$$

где n – количество разрядов АЦП без учета знакового направления; $U_{\text{АЦП}}$ – модуль максимального

входного напряжения АЦП. После подстановки (2) в (1) имеем

$$\bar{u} = (\varepsilon_u \pm \varepsilon_\kappa) \pm u \pm 0,5 \cdot 2^{-n} U_{\text{АЦП}}.$$

Сумма $\varepsilon_{ua} = \varepsilon_u \pm \varepsilon_a$ представляет собой результирующую абсолютную ошибку аналоговой обработки контролируемой величины. Выразив ее через относительную результирующую ошибку δ_{ua} ,

$$\bar{u} = \frac{u}{1 \pm \delta_{ua}} \pm 0,5 \cdot 2^{-n} U_{\text{АЦП}}.$$

Запишем выражение для минимальной разности смежных дискретных значений сигнала с учетом действия ошибок, которая, как уже указывалось, должна быть не меньше шага квантования сигнала по уровню a (рис. 1):

$$\left(\frac{u_n}{1 + \delta_{ua}} - 0,5 \cdot 2^{-n} U_{\text{АЦП}} - \frac{u_{n-1}}{1 - \delta_{ua}} - 0,5 \cdot 2^{-n} U_{\text{АЦП}} \right) \geq a. \quad (3)$$

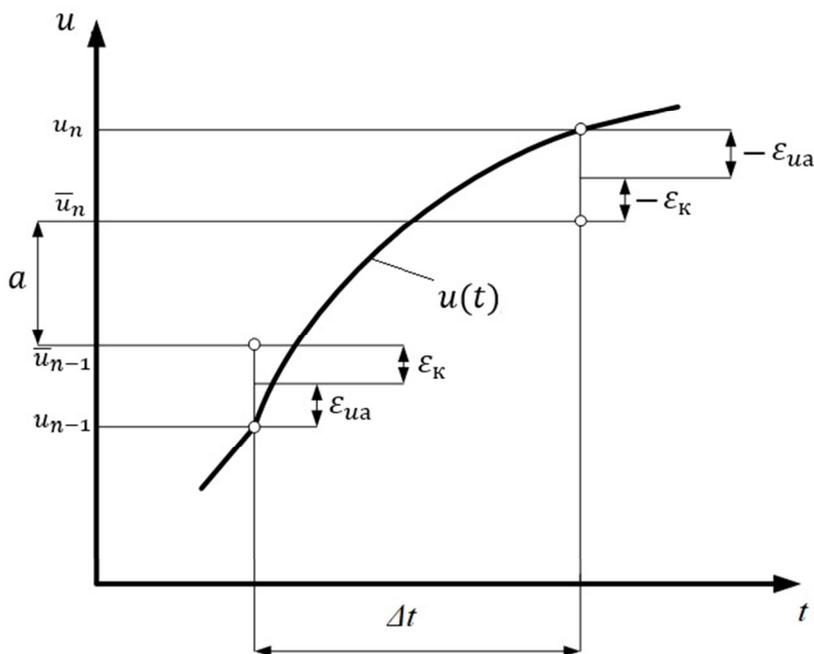


Рис. 1. Выражение для минимальной разности смежных дискретных значений сигнала с учетом действия ошибок

Fig. 1. Expression for the minimum difference of adjacent discrete signal values including the errors

Шаг квантования сигнала по уровню определяется разрядностью АЦП и модулем его максимального входного напряжения

$$a = 2^{-n} U_{\text{АЦП}}. \quad (4)$$

Подставив (4) в (3), получим

$$\left(\frac{u_n}{1 + \delta_{ua}} - \frac{u_{n-1}}{1 - \delta_{ua}} \right) \geq 2^{1-n} U_{\text{АЦП}}. \quad (5)$$

Если контролируемая величина изменяется по синусоидальному закону, то выражения для u_n и u_{n-1} в общем случае имеют следующий вид:

$$\begin{cases} u_n = u_m \sin \varphi_n; \\ u_{n-1} = u_m \sin(\varphi_n - \omega \Delta t), \end{cases} \quad (6)$$

где u_m – амплитуда контролируемой величины; ω – угловая частота; φ_n – дискретное значение фазы.

Результаты исследования

Очевидно, что минимальная разность смежных дискретных значений синусоидальной величины имеет место в области экстремума функции (рис. 2), поэтому после подстановки (6) в (5) при $\varphi_n = \pi / 2$ получим

$$\left(\frac{u_m}{1 + \delta_{ua}} - \frac{u_m \cos \omega \Delta t}{1 - \delta_{ua}} \right) \geq 2^{1-n} U_{\text{АЦП}}. \quad (7)$$

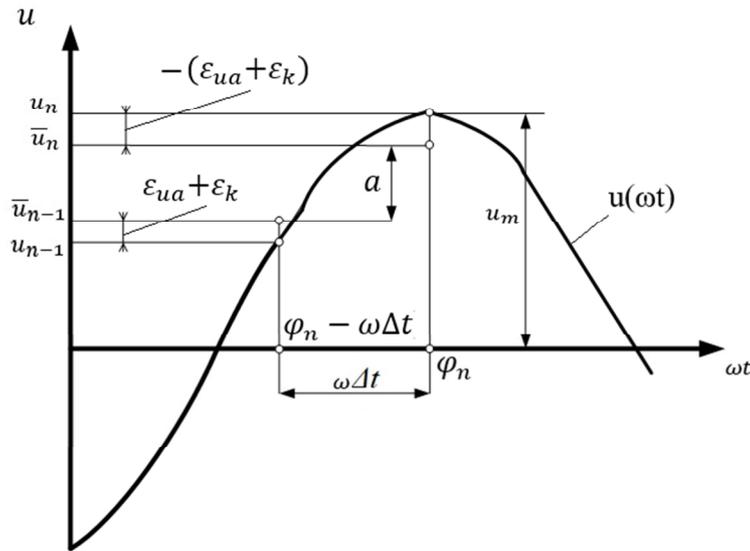


Рис. 2. Разность смежных дискретных значений синусоидальной величины

Fig. 2. Difference of adjacent discrete values of a sinusoidal value

Разрешив неравенство (7) относительно Δt , получим

$$\Delta t \geq \frac{1}{\omega} \arccos \left[\frac{1 - \delta_{ua} - 2^{1-n} K (1 - \delta_{ua})}{1 + \delta_{ua}} \right], \quad (8)$$

где $K = U_{\text{АЦП}} / U_m$.

Можно отметить, что разность смежных дискретных значений контролируемой величины зависит от ее амплитуды, а минимальная величина этой разности наблюдается в режиме минимального сигнала. Поэтому при выборе минимального шага Δt определяющим является режим с минимальной амплитудой контролируемой величины.

В устройствах РЗ с цифровой обработкой информации параметры входных функциональных элементов выбираются из условия не превышения в максимальном режиме амплитудой контролируемой величины модуля максимального входного напряжения АЦП. Для предельного режима ее амплитуда равна $U_{\text{АЦП}}$, из чего следует, что коэффициент K представляет собой кратность контролируемой величины.

Не вызывает сомнений, что разность смежных дискретных значений контролируемой величины зависит от частоты и уменьшается со снижением последней, поэтому при выборе минимального шага дискретизации Δt необходимо принимать во внимание минимально возможное значение частоты.

На рис. 3 в качестве примера приведены зависимости минимального шага дискретизации синусоидального сигнала частотой 50 Гц от разрядности АЦП, построенные с использованием выражения (8).

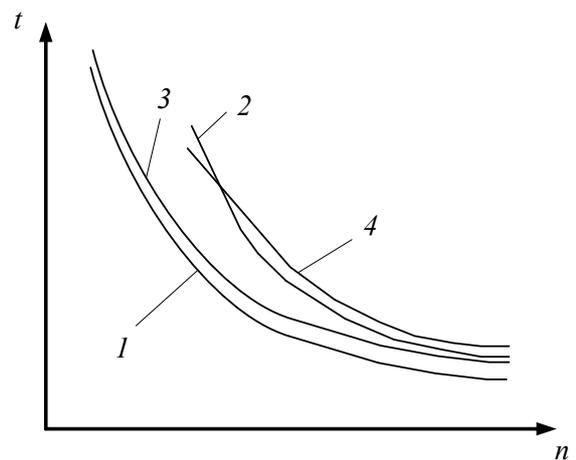


Рис. 3. Зависимости шага дискретизации от разрядности АЦП: 1 - $\delta_{ua} = 2,5\%$, $K = 50$; 2 - $\delta_{ua} = 2,5\%$, $K = 150$; 3 - $\delta_{ua} = 5\%$, $K = 50$; 4 - $\delta_{ua} = 5\%$, $K = 150$

Fig. 3. Dependences of discretisation steps on ADC bit depth: 1 - $\delta_{ua} = 2,5\%$, $K = 50$; 2 - $\delta_{ua} = 2,5\%$, $K = 150$; 3 - $\delta_{ua} = 5\%$, $K = 50$; 4 - $\delta_{ua} = 5\%$, $K = 150$

Анализ представленных зависимостей подтверждает, что минимальное значение шага дискретизации Δt в значительной степени определяется кратностью контролируемой величины и разрядностью АЦП. Однако с увеличением разрядности АЦП основное влияние на величину Δt оказывают кратность K и ошибка аналоговой обработки контролируемой величины δ_{ua} .

Заключение

Предлагаемая методика выбора минимального значения шага дискретизации входных величин в устройствах РЗ с цифровой обработкой информации не является исчерпывающей и может быть использована в качестве дополнения к предложен-

ным методикам аналогичного назначения [1–5]. Предложенная методика может быть использована для ориентировочной оценки минимального значения шага дискретизации входных величин в устройствах РЗ с цифровой обработкой информации.

Список источников

1. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высш. шк., 2000. 462 с.
2. Гарт П. Аналоговые устройства для микропроцессоров и мини-ЭВМ. М.: Мир, 1981. 268 с.
3. Бордюг А. С. Применение систем релейной защиты в судовых электроэнергетических комплексах //

- Вестн. гос. ун-та мор. и реч. флота им. адм. С. О. Макарова. 2021. Т. 13. № 6. С. 908–915.
4. Михайлов В. В., Кириевский Е. В., Ульяницкий Е. М. и др. Микропроцессорные гибкие системы релейной защиты. М.: Энергоатомиздат, 1988. 240 с.
 5. Беки Д. А., Карплюс У. Д. Теория и применения гибридных вычислительных систем. М.: Мир, 1970. 484 с.

References

1. Baskakov S. I. *Radiotekhnicheskie tsepi i signaly* [Radiotechnical circuits and signals]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2000. 462 p.
2. Garet P. *Analogovye ustroystva dlia mikroprotsektorov i mini-EVM* [Analog devices for microprocessors and mini-computers]. Moscow, Mir Publ., 1981. 268 p.
3. Bordiug A. S. *Primenenie sistem releinoi zashchity v sudovykh elektroenergeticheskikh kompleksakh* [Application of relay protection systems in ship power complexes]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo*

- flota im. admirala S. O. Makarova*, 2021, vol. 13, no. 6, pp. 908-915.
4. Mikhailov V. V., Kirievskii E. V., Ulianitskii E. M. i dr. *Mikroprotsektornye gibkie sistemy releinoi zashchity* [Microprocessor flexible relay protection systems]. Moscow, Energoatomizdat, 1988. 240 p.
 5. Beki D. A., Karplius U. D. *Teoriia i primeniia gibridnykh vychislitel'nykh sistem* [Theory and application of hybrid computing systems]. Moscow, Mir Publ., 1970. 484 p.

Статья поступила в редакцию 01.07.2022; одобрена после рецензирования 18.07.2022; принята к публикации 12.08.2022
The article was submitted 01.07.2022; approved after reviewing 18.07.2022; accepted for publication 12.08.2022

Информация об авторе / Information about the author

Александр Сергеевич Бордюг – кандидат технических наук; доцент кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства; Керченский государственный морской технологический университет; alexander.bordyug@mail.ru

Alexander S. Bordyug – Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Ship Power Supply and Production Automation; Kerch State Maritime Technological University; alexander.bordyug@mail.ru

