

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ DEVICES AND METHODS OF MEASURING

УДК 621.03.83

doi: 10.21685/2307-5538-2023-3-2

МЕТОДИКА СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО ПОСТРОЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ АНАЛОГОВОЙ ВЕЛИЧИНЫ ВО ВРЕМЕННОЙ ИНТЕРВАЛ

М. А. Ватутин¹, В. П. Ефимов², Е. В. Борматов³, А. В. Зубков⁴

^{1,2,3,4} Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

¹ vatutinm@mail.ru, ^{2,3,4} vka@mil.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В большинстве современных цифровых вольтметров используется аналого-цифровой преобразователь время-импульсного типа с двухэтапным интегрированием, которое проходит в два этапа – интегрирования и счета. Во время счета в соответствии с принципом действия преобразователя входная информация в аналого-цифровой преобразователь не поступает и теряется. Целью является разработка методики преобразования аналоговой величины в дискретную без потери информации о входном сигнале. *Материалы и методы.* Представлен подход к построению интегрирующего преобразователя измеряемого напряжения во временной интервал, в котором интегрирование происходит в течение всего времени преобразования входного сигнала. Новизна подхода заключается в исключении траты времени на служебные сигналы сброса (или обнуления) напряжения на накопительном конденсаторе за счет использования управляемого генератора линейно изменяющегося напряжения на двух операционных усилителях и возможности непосредственного измерения двухполярного входного сигнала. *Результаты.* Представлены: принципиальная электрическая схема преобразователя; математическая модель преобразования входного сигнала во временной интервал; рекомендации по получению цифрового кода на выходе преобразователя; методика схемотехнического построения преобразователя. *Выводы.* Использование рассмотренной методики позволяет осуществить интегрирование входного сигнала без потери времени на служебные сигналы. Результаты могут использоваться для построения интегрирующих аналого-цифровых преобразователей для широкого применения в промышленных устройствах и в других областях науки и техники.

Ключевые слова: аналого-цифровой преобразователь, интегрирующий АЦП, генератор линейно изменяющегося напряжения, преобразователь напряжение-временной интервал, триггер Шмитта

Для цитирования: Ватутин М. А., Ефимов В. П., Борматов Е. В., Зубков А. В. Методика схемотехнического построения преобразователя аналоговой величины во временной интервал // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 3. С. 16–22. doi: 10.21685/2307-5538-2023-3-2

THE METHODOLOGY OF CIRCUIT CONSTRUCTION OF THE ANALOG VALUE CONVERTER IN THE TIMEFRAME

M.A. Vatutin¹, V.P. Efimov², E.V. Bormatov³, A.V. Zubkov⁴

^{1,2,3,4} Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky, Saint Petersburg, Russia

¹ vatutinm@mail.ru, ^{2,3,4} vka@mil.ru

Abstract. *Background.* Most modern digital voltmeters use an analog-to-digital converter (ADC) of the time-pulse type with two-stage integration, which takes place in two stages – integration and counting. During the counting, in accordance with the principle of operation of the converter, the input information is not received in the ADC and is lost. The aim is to develop a technique for converting an analog quantity into a discrete one without losing information about

the input signal. *Materials and methods.* An approach to the construction of an integrating converter of the measured voltage in a time and interval in which integration occurs during the entire time of the input signal conversion is presented. The novelty of the approach is to eliminate the waste of time on service signals for resetting (or zeroing) the voltage on the storage capacitor, due to the use of a controlled generator of linearly varying voltage on two op-amps, and the possibility of direct measurement of the bipolar input signal. *Results.* A technique for the circuit design of an analog magnitude converter in a time interval is proposed, which allows the conversion of a bipolar input signal without additional circuit elements. The following are presented: a schematic electrical diagram of the converter; a mathematical model of converting the input signal into a time interval; recommendations for obtaining a digital code at the output of the converter; a method of circuit design of the converter. *Conclusions.* The use of the considered technique makes it possible to integrate the input signal without losing time to perform transformations on service signals. The results can be used to build integrating ADCs for wide application in industrial devices and in other fields of science and technology.

Keywords: analog-to-digital converter, integrating ADC, linearly varying voltage generator, voltage-time interval converter, Schmitt trigger

For citation: Vatutin M.A., Efimov V.P., Bormatov E.V., Zubkov A.V. The methodology of circuit construction of the analog value converter in the timeframe. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(3):16–22. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-3-2

Введение

В цифровых системах автоматического управления аналого-цифровые преобразователи (АЦП) используются для сопряжения датчиков различных физических величин непрерывного действия [1] (температуры, давления, линейных или угловых перемещений, напряжений, токов и др.) с цифровой управляющей машиной (ЦВМ). В системах контроля АЦП применяются для реализации цифровых способов передачи, обработки и регистрации информации.

В подавляющем большинстве случаев измеряемая аналоговая физическая величина преобразуется в цифровой код опосредованно, а именно: вначале она тем или иным способом преобразуется в напряжение, а затем АЦП, представляющий собой самостоятельное устройство, преобразует этот сигнал в двоичный код. Именно поэтому наиболее распространенными типами АЦП являются преобразователи «напряжение–код».

В различной измерительной технике широко применяются последовательные АЦП [2–4]. Недостаток последовательных АЦП – низкая помехоустойчивость результатов преобразования. Действительно, выборка мгновенного значения входного напряжения обычно включает слагаемое в виде мгновенного значения помехи. В дальнейшем при цифровой обработке последовательности выборок эта составляющая может быть подавлена, однако на это требуется время и дополнительные вычислительные ресурсы. Действенной мерой по снижению влияния различного рода импульсных помех является применение интегрирующих аналого-цифровых преобразователей. В этих АЦП входной сигнал интегрируется на определенном временном интервале, длительность которого обычно выбирается кратной периоду помехи. Это позволяет во многих случаях подавить помеху еще на этапе преобразования. Платой за это является пониженное быстродействие интегрирующих АЦП.

В большинстве современных цифровых вольтметров используется АЦП времяимпульсного типа с двухэтапным интегрированием [2–6]. Преобразование проходит две стадии – интегрирования (t_1) и счета (t_2) (рис. 1).

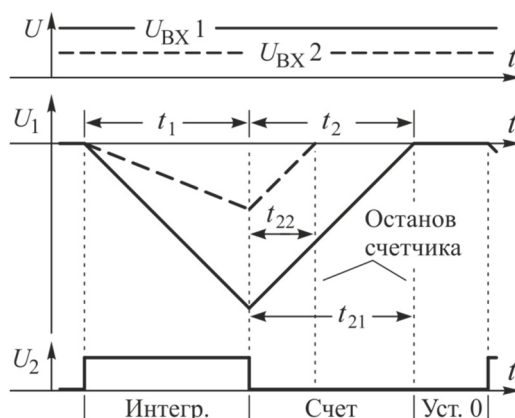


Рис. 1. Временные диаграммы работы АЦП двухтактного интегрирования

На интервале времени t_1 осуществляется интегрирование входного (измеряемого) сигнала. Время t_1 интегрирования входного напряжения постоянно. На интервале t_2 осуществляется преобразование измеренного сигнала в код.

Недостатками этих АЦП являются следующие обстоятельства: во-первых, время интегрирования входного сигнала в цикле преобразования занимает только приблизительно третью часть – две трети цикла преобразователь не принимает входной сигнал, что приводит к потере информации об измеряемом сигнале в течение этого времени и ухудшает преобразовательные свойства интегрирующего АЦП; во-вторых, время преобразования зависит от величины измеряемого напряжения; в-третьих, АЦП многотактного интегрирования должен быть снабжен довольно большим количеством внешних резисторов и конденсаторов с высококачественным диэлектриком, что значительно увеличивает место, занимаемое преобразователем на плате и, как следствие, усиливает влияние помех и увеличивает стоимость изделия.

Анализ работы генератора линейно изменяющегося напряжения

Операционный усилитель (ОУ) широко применяется и в импульсных электронных устройствах [2, 4, 7, 8]. При этом в полной мере используются такие положительные свойства ОУ, как малые дрейфы, высокий и собственный коэффициент усиления, позволяющие получить высокую стабильность работы импульсного устройства.

На рис. 2 показана принципиальная схема генератора линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН) на двух ОУ с входом управления V_x . Упр.

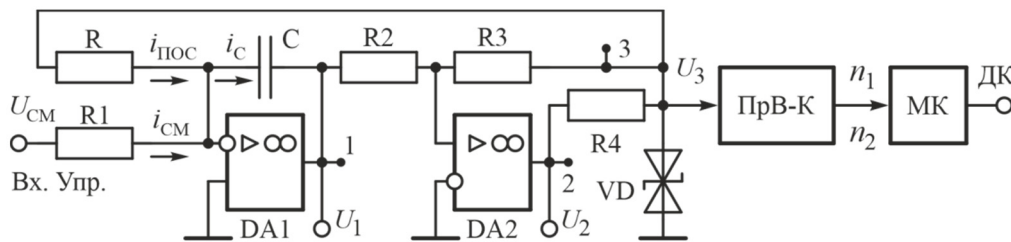


Рис. 2. ГЛИН на ОУ с дополнительным входом управления U_{CM}

На рис. 1 обозначено: $i_{ПЭС}$ – ток положительной обратной связи генератора; i_{CM} – ток смещения, обеспечивающий управление скважностью генератора.

Автоколебательный ГЛИН состоит из двух основных частей – интегратора на ОУ $DA1$ и неинвертирующего триггера Шмитта на ОУ $DA2$. Диаграмма работы ГЛИН на двух ОУ показана на рис. 3.

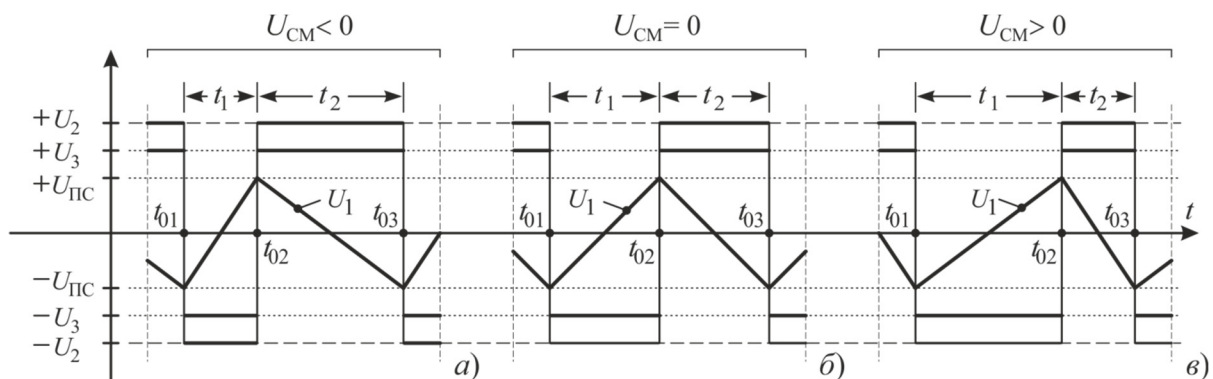


Рис. 3. Диаграмма работы ГЛИН при отсутствии и наличии напряжения смещения

Период колебаний T разделен на два временных интервала t_1 и t_2 ($T = t_1 + t_2$). Ток заряда конденсатора C равен сумме токов $i_C = i_{ПЭС} + i_{CM}$. Ток смещения является случайной величиной, так как это – входной измеряемый сигнал. Ток положительной обратной связи имеет значение $i_{ПЭС} = U_3/R$. Перезаряд конденсатора происходит в пределах значений напряжения порога срабатывания от $-U_{ПЭС}$ до $+U_{ПЭС}$, на одну и ту же постоянную величину напряжения $2|U_{ПЭС}|$. Значение напряжения $U_{ПЭС}$ определяется как $U_{ПЭС} = U_3 \cdot (R_2/R_3)$.

Для стабилизации напряжения U_3 , подаваемого на резистор R , в схеме, показанной на рис. 2, введен источник опорного напряжения $U_{\text{ОП}}$ (ИОН) – двухполярный параметрический стабилизатор напряжения [9, 10] на двуханодном стабилитроне VD и резисторе R_4 , который формирует напряжение $U_3 = U_{\text{ИОН}}$. При этом $-|U_3| < |U_2|$.

Математическая модель преобразователя аналоговой величины во временной интервал

В общем виде выражение для выходного напряжения ГЛИН $U_1 = u_C(t)$ [5, 6]

$$u_C(t) = \frac{1}{C} \int_{t_{01}}^{t_{03}} i_C(t) dt = \frac{1}{C} \left(\int_{t_{01}}^{t_{02}} i_C(t) dt + \int_{t_{02}}^{t_{03}} i_C(t) dt \right) = \frac{1}{C} \left(\int_{t_{01}}^{t_{02}} (i_{\text{ПОС}} + i_{\text{СМ}}(t)) dt + \int_{t_{02}}^{t_{03}} (-i_{\text{ПОС}} + i_{\text{СМ}}(t)) dt \right) = \frac{1}{C} \int_{t_{01}}^{t_{03}} i_{\text{СМ}}(t) dt. \quad (5)$$

Графически выражение (5) можно представить так, как показано на рис. 3.

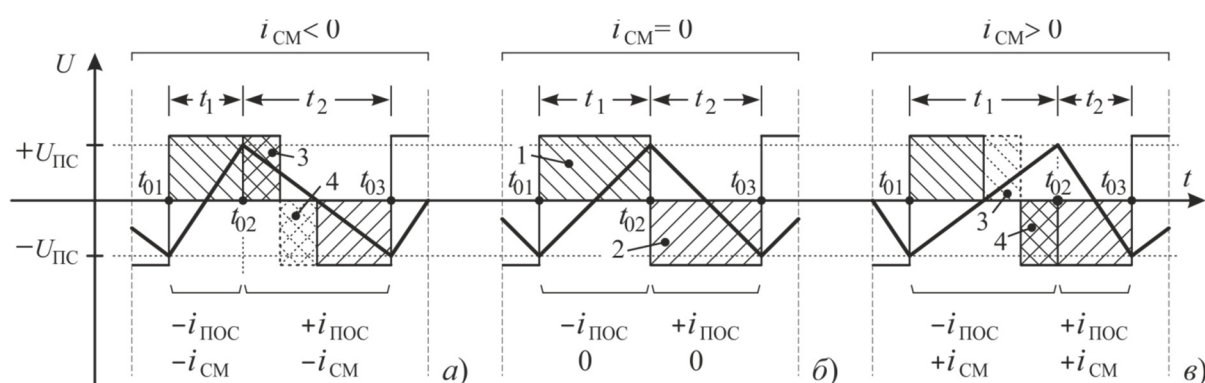


Рис. 3. Диаграмма работы ГЛИН при отсутствии и наличии тока смещения

Площади прямоугольников, обозначенных «1» и «2», формируются током положительной обратной связи $i_{\text{ПОС}}$. Площади прямоугольников, обозначенных «3» и «4», формируются током смещения $i_{\text{СМ}}$.

На рис. 3,а показано, что при отрицательной полярности тока смещения $-i_{\text{СМ}}$ временной интервал t_1 формирует сумма токов $|i_{\text{ПОС}}| + |i_{\text{СМ}}|$, а временной интервал t_2 формирует разность токов $|i_{\text{ПОС}}| - |i_{\text{СМ}}|$ и при этом $t_1 < t_2$. На рис. 3,в показано, что при положительной полярности тока смещения $+i_{\text{СМ}}$ временной интервал t_1 формирует разность токов $|i_{\text{ПОС}}| - |i_{\text{СМ}}|$, а временной интервал t_2 формирует сумма токов $|i_{\text{ПОС}}| + |i_{\text{СМ}}|$ и при этом $t_1 > t_2$. На рис. 3,б показано, что при $|i_{\text{СМ}}| = 0$ временные интервалы t_1 формируются только током $i_{\text{ПОС}}$ и при этом $t_1 = t_2$.

Примем, что период колебаний ГЛИН равный $T = t_1 + t_2$ значительно меньше времени изменения тока смещения $i_{\text{СМ}}$: $i_{\text{СМ}} = \text{const}$. Тогда сумма этих токов на интервале времени T также будет иметь постоянную величину $i_{\text{ПОС}} + i_{\text{СМ}} = \text{const}$.

Для случая, когда $i_C = \text{const}$, напряжение на конденсаторе C [11]

$$u_C(t) = \frac{1}{C} \int_{t_{01}}^{t_{03}} i_C(t) dt = \frac{1}{C} \left(\int_{t_{01}}^{t_{02}} i_C(t) dt + \int_{t_{02}}^{t_{03}} i_C(t) dt \right) \Bigg|_{i_C = \text{const}} = \frac{i_C}{C} (t_1 + t_2). \quad (6)$$

Анализируя диаграммы работы ГЛИН, показанные на рис. 3, и выражение (6), получаем временные интервалы t_1 и t_2

$$t_1 = \frac{2u_{\text{ОП}}C}{|i_{\text{ПОС}}| + |i_{\text{СМ}}|}; t_2 = \frac{2u_{\text{ОП}}C}{|i_{\text{ПОС}}| - |i_{\text{СМ}}|}. \quad (7)$$

Так как измеряемая физическая величина – ток $i_{\text{СМ}}$ – находится в знаменателе выражения (7), то линейное изменение тока смещения $i_{\text{СМ}}$ приводит к нелинейному изменению значения временного интервала t_1 (t_2).

Учитывая, что числители ($2i_{\text{ОПС}}$) в выражении (7) для t_1 и t_2 равны между собой, произведем преобразования выражений (7)

$$\begin{aligned} t_1(i_{\text{ПОС}} + i_{\text{СМ}}) &= t_2(i_{\text{ПОС}} - i_{\text{СМ}}) \Rightarrow t_1 i_{\text{ПОС}} + t_1 i_{\text{СМ}} = t_2 i_{\text{ПОС}} - t_2 i_{\text{СМ}} \Rightarrow \\ \Rightarrow t_1 i_{\text{ПОС}} - t_2 i_{\text{ПОС}} &= -t_1 i_{\text{СМ}} - t_2 i_{\text{СМ}} \Rightarrow i_{\text{ПОС}}(t_1 - t_2) = -i_{\text{СМ}}(t_1 + t_2). \end{aligned}$$

После преобразования выражений (7) относительно тока $i_{\text{СМ}}$ получаем

$$i_{\text{СМ}} = -i_{\text{ПОС}} \frac{(t_1 - t_2)}{T} = i_{\text{ПОС}} \frac{(t_2 - t_1)}{T}. \quad (8)$$

Входное напряжение, соответственно, будет определяться как

$$U_{\text{СМ}} = R i_{\text{СМ}} = R i_{\text{ПОС}} \frac{(t_2 - t_1)}{T}. \quad (9)$$

Напряжение смещения $U_{\text{СМ}}$ по своей сути является входным напряжением $U_{\text{ВХ}}$: $U_{\text{СМ}} = U_{\text{ВХ}}$. Левый по схеме вывод резистора $R1$ является входной клеммой преобразователя аналоговой величины во временной интервал.

Рекомендации по получению цифрового кода на выходе преобразователя

Для окончательного получения на выходе преобразователя информации в цифровом виде временные интервалы t_1 и t_2 преобразуются в количество импульсов n_1 и n_2 в устройстве преобразования время–код ПрВ-К и в вычислительном устройстве МК выполняется алгебраическая операция [5, 6, 12]

$$K_{\text{П}} \cdot \frac{(n_2 - n_1)}{(n_2 + n_1)} = K_{\text{П}} \cdot \frac{(n_2 - n_1)}{N}, \quad (10)$$

где $K_{\text{П}}$ – коэффициент пропорциональности, алгоритмически учитывающий неточности установки номинальных значений сопротивления резисторов ГЛИН, уровень пороговых напряжений и др.; $N = n_1 + n_2$.

В конечном итоге входное напряжение будет определяться как

$$U_{\text{ВХ}} = R1 \cdot i_{\text{ПОС}} \cdot K_{\text{ПР}} \cdot \frac{(n_2 - n_1)}{N}, \quad (11)$$

и интегрирование входного сигнала будет происходить в течение всего времени преобразования входного сигнала без потери времени на служебные сигналы сброса (или обнуления) напряжения на накопительном конденсаторе.

Методика схемотехнического построения преобразователя напряжение–временной интервал

Методика схемотехнического построения преобразователя напряжение–временной интервал включает в себя следующие действия:

- 1) использование в качестве объекта модернизации интегрирующего АЦП;
- 2) использование генератора линейно изменяющегося сигнала на двух ОУ в качестве непрерывного интегратора;
- 3) перевод ГЛИН в управляемый режим работы для получения временных интервалов t_1 и t_2 , значения которых зависят от значения входного управляющего сигнала;
- 4) разработка математической модели преобразователя аналоговой величины во временной интервал на базе ГЛИНа;
- 5) выдача рекомендации по получению цифрового кода на выходе преобразователя аналоговой величины во временной интервал.

Заключение

Использование рассмотренной методики позволяет осуществить интегрирование входного сигнала без потери времени на служебные сигналы. Указанная методика может быть использована для конструирования широкого круга измерительных приборов, в которых необходимо осуществить преобразование аналоговой величины в цифровой код.

Список литературы

1. Аш Ж. Датчики измерительных систем : в 2 кн. М. : Мир, 1992.
2. Волович Г. И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. М. : Додэка-XXI, 2005. 528 с.
3. Микросхемы АЦП и ЦАП : справочник / подгот. Г. И. Волович, В. Б. Ежов. М. : Додэка-XXI, 2005. 432 с.
4. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника : пер. с нем. М. : Додэка-XXI, 2008. 942 с.
5. Основы метрологии и электрические измерения / под ред. Е. М. Душина. Л. : Энергоатомиздат, Ленинградское отд., 1987. 480 с.
6. Слепова С. В. Основы теории точности измерительных приборов : учеб. пособие. Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2008. 192 с.
7. Операционные усилители и компараторы : справочник. М. : Додэка-XXI, 2001. Т. 12.
8. Картер Р., Манчини Р. Операционные усилители для всех : пер. с англ. М. : ДМК Пресс, 2016. 528 с.
9. Линден Т. Харрисон. Источники опорного напряжения и тока : пер. с англ. М. : ДМК Пресс, 2015. 576 с.
10. Лучко С. В., Балуев С. Ю., Ватутин М. А. [и др.]. Точностные параметры нелинейного звена для автоколебательного акселерометра // Известия вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 12. С. 43–46.
11. Корн Т., Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М. : Машиностроение, 1978. 831 с.
12. Захаров А. В., Либкинд И. В., Шахмейстер Л. Е. Применение времяимпульсного преобразования в датчиках температуры с полупроводниковым чувствительным элементом // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 1. С. 38–46. doi: 10.21685/2307-5538-2022-1-5

References

1. Ash Zh. *Datchiki izmeritel'nykh sistem: v 2 kn. = Sensors of measuring systems : in 2 books.* Moscow: Mir, 1992. (In Russ.)
2. Volovich G.I. *Skhemotekhnika analogovykh i analogo-tsifrovyykh elektronnykh ustroystv = Circuitry of analog and analog-digital electronic devices.* Moscow: Dodeka-XXI, 2005:528. (In Russ.)
3. Volovich G.I., Ezhov V.B. (prepared). *Mikroskhemy ATsP i TsAP: spravochnik = ADC and DAC micro-circuits : handbook.* Moscow: Dodeka-XXI, 2005:432. (In Russ.)
4. Tittse U., Shenk K. *Poluprovodnikovaya skhemotekhnika: per. s nem. = Semiconductor circuitry : trans. from German.* Moscow: Dodeka-XXI, 2008:942. (In Russ.)
5. Dushin E.M. (ed.). *Osnovy metrologii i elektricheskie izmereniya = Fundamentals of metrology and electrical measurements.* Leningrad: Energoatomizdat, Leningradskoe otd., 1987:480. (In Russ.)
6. Slepova S.V. *Osnovy teorii tochnosti izmeritel'nykh priborov: ucheb. posobie = Fundamentals of the theory of accuracy of measuring instruments : textbook.* Chelyabinsk: Izd-vo YuUrGU, 2008:192. (In Russ.)
7. *Operatsionnye usiliteli i komparatory: spravochnik = Operational amplifiers and comparators : handbook.* Moscow: Dodeka-XXI, 2001;12. (In Russ.)
8. Karter R., Manchini R. *Operatsionnye usiliteli dlya vsekh: per. s angl. = Operational amplifiers for all : trans. from English.* Moscow: DMK Press, 2016:528. (In Russ.)
9. Linden T. Kharrison. *Istochniki opornogo napryazheniya i toka: per. s angl. = Sources of reference voltage and current : trans. from English.* Moscow: DMK Press, 2015:576. (In Russ.)
10. Luchko S.V., Baluev S.Yu., Vatutin M.A. et al. Precision parameters of a nonlinear link for an auto-oscillatory accelerometer. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie = News of universities. Instrumentation.* 2013; 56(12):43–46. (In Russ.)
11. Korn T., Korn G. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov = Handbook of Mathematics for scientists and engineers.* Moscow: Mashinostroenie, 1978:831. (In Russ.)
12. Zakharov A.V., Libkind I.V., Shakhmeyster L.E. Application of time-pulse conversion in temperature sensors with a semiconductor sensing element. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2022;(1):38–46. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2022-1-5

Информация об авторах / Information about the authors**Михаил Алексеевич Ватутин**

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры автономных систем управления,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: vatutinm@inbox.ru

Mikhail A. Vatutin

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of autonomous control systems,
Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky
(13 Zhdanovskaya street, Saint Petersburg, Russia)

Виталий Петрович Ефимов

младший научный сотрудник лаборатории
Военного института
(научно-исследовательского),
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: vka@mil.ru

Евгений Витальевич Борматов

курсант,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: vka@mil.ru

Антон Викторович Зубков

адъюнкт,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: vka@mil.ru

Vitaliy P. Efimov

Junior researcher at the laboratory
of the Military Institute (Research Institute),
Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky
(13 Zhdanovskaya street, Saint Petersburg, Russia)

Evgeny V. Bormatov

Cadet,
Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky
(13 Zhdanovskaya street, Saint Petersburg, Russia)

Anton V. Zubkov

Adjunct,
Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky
(13 Zhdanovskaya street, Saint Petersburg, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 26.05.2023

Поступила после рецензирования/Revised 26.06.2023

Принята к публикации/Accepted 24.07.2023