

УПРАВЛЕНИЕ СЛОЖНЫМИ СИСТЕМАМИ

DOI: 10.18137/RNUV9187.22.04.P.22

УДК 681.511.4:629.7.05

М.А. Ватутин, А.И. Ключников, Д.М. Козлов

МЕТОДИКА СНИЖЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

Аннотация. Рассмотрены вопросы снижения погрешности измерения ускорения автоколебательным акселерометром. Повышение точности преобразования осуществляется за счет снижения ошибки квантования дискретного информационного сигнала. Разработанное устройство перекомпенсации измеряемого сигнала позволяет выделить на заданном такте ошибку квантования и учесть ее в последующих тактах преобразования. Установлено, что режим перекомпенсации автоколебательного акселерометра соответствует режиму уравнивания входного заряда в сигма-дельта аналого-цифровом преобразователе. Проведено моделирование работы автоколебательного акселерометра с режимом компенсации.

Ключевые слова: акселерометр, ошибка квантования, шум квантования, сигма-дельта аналого-цифрового преобразователя, АЦП, кажущаяся скорость, генератор линейно изменяющегося напряжения, токовое зеркало, преобразователь напряжение – ток.

М.А. Vatutin, A.I. Klyuchnikov, D.M. Kozlov

METHOD FOR REDUCING THE ERROR OF THE AUTO-OSCILLATIONAL ACCELEROMETER

Abstract. The issues of reducing the error in measuring acceleration by a self-oscillating accelerometer are considered. Improving the conversion accuracy is carried out by reducing the quantization error of the discrete information signal. The developed device for overcompensating the measured signal makes it possible to isolate the quantization error at a given cycle and take it into account in subsequent conversion cycles. It has been established that the mode of overcompensation of the self-oscillating accelerometer corresponds to the mode of balancing the input charge in the sigma-delta analog-to-digital converter (hereinafter referred to as ADC). The simulation of the operation of a self-oscillating accelerometer with a compensation mode has been carried out.

Keywords: accelerometer, quantization error, quantization noise, sigma-delta ADC, apparent velocity, ramp generator, current mirror, voltage-to-current converter.

Введение

Повышение точности и достоверности определения значений физических величин представляет собой одну из важных задач совершенствования измерительных устройств. Решение этой задачи во многом определяет степень надежности и безопасности функционирования сложных технических объектов.

В различных измерительных устройствах используется компенсационный метод измерения соответствующей физической величины [4]. Достижение низкой погрешности

Вагутин Михаил Алексеевич

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автономных систем управления. Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург. Сфера научных интересов: командные приборы; техническая электроника; схемотехника электронных устройств автономных систем управления. Автор 90 опубликованных научных работ.
Электронный адрес: vatutinm@inbox.ru

Ключников Алексей Игоревич

старший инженер-испытатель, в/ч 75106, город Мирный. Сфера научных интересов: автономные системы управления движением и навигацией космических аппаратов; навигационные приборы; автономные системы управления. Автор 40 опубликованных научных работ.
Электронный адрес: keynikov198@gmail.com

Козлов Дмитрий Михайлович

курсант. Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург. Сфера научных интересов: автоматика; телемеханика; вычислительная техника.
Электронный адрес: dimkoz.kozlov@yandex.ru

измерения физической величины в классическом датчике базируется на использовании в своем составе высокоточных механических и электронных элементов. В то же время существуют методические погрешности, которые вносят погрешность в измерение сигнала вне зависимости от точностных параметров применяемых элементов [13]. Одной из таких методических погрешностей, оказывающих значительное влияние на погрешность преобразования, является погрешность преобразования аналогового измеряемого сигнала в цифровой код. Для снижения методической погрешности важную роль играет режим работы преобразовательного устройства

Цель данной статьи – разработка методики снижения методической погрешности автоколебательного акселерометра.

Постановка задачи

При производстве инерциальных датчиков, в частности акселерометров, измерительное устройство, как правило, выполняется как линейное [5], у которого выходным сигналом является аналоговый сигнал.

Типовая структурная схема маятникового акселерометра, работающего в линейном режиме, показана на Рисунке 1.

Маятник связан с неподвижным основанием (НО) через упругий торсион (Т). Чувствительным элементом маятникового акселерометра является инерционная масса (маятник М), отклоняющаяся под воздействием ускорения на некоторый угол $\pm\beta_{\Delta}$. Измеряемое акселерометром ускорение определяется выражением

$$a_{BX} = \frac{k_{Д,М}}{ml} i_{Д,М},$$

где m – масса маятника; l – длина плеча маятника; $k_{Д,М}$ – коэффициент передачи датчика момента; $i_{Д,М}$ – ток датчика момента.

Для согласования инерциального датчика с бортовой цифровой вычислительной машиной (БЦВМ) применяются аналого-цифровые преобразователи (далее – АЦП) или

различные специальные режимы работы чувствительного элемента датчика [7]. Применение АЦП для регистрации отсчетов с частотой f_s приводит к появлению специфической погрешности, свойственной любому АЦП, – погрешности (шуму) квантования [2; 10; 15], показанному на Рисунке 2, *а*.

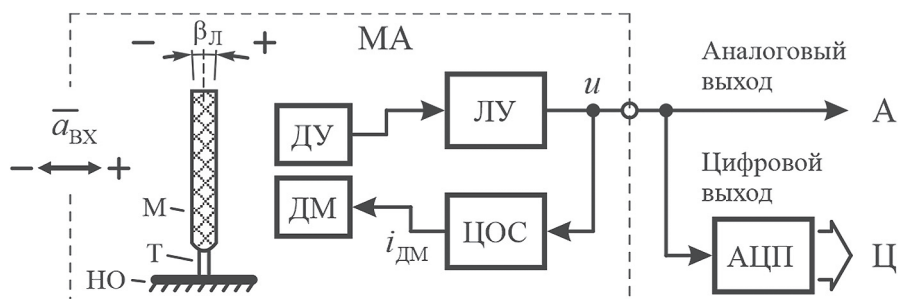


Рисунок 1. Структурная схема маятникового акселерометра, работающего в линейном режиме: ДУ – датчик угла; ДМ – датчик момента; ЛУ – линейный усилитель; ЦОС – цепь обратной связи

Для снижения шума квантования применяются различные цифровые фильтры, которые путем применения вероятностных методов оценки сигнала позволяют распределить шум квантования в более широкой полосе частот $Kf_{s/2}$ и тем самым снизить его в заданной полосе частот $f_{s/2}$ (см. Рисунок 2, *б*).

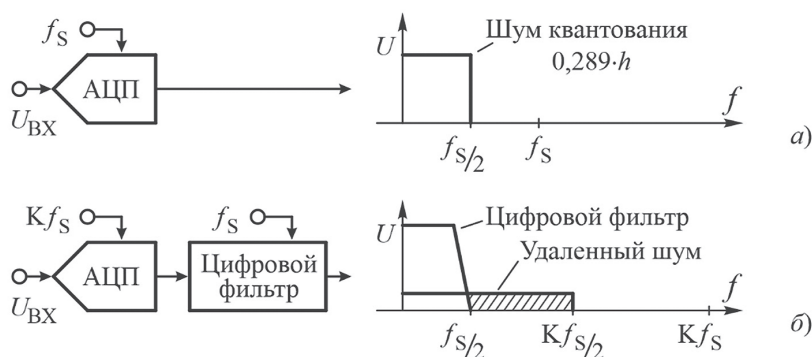


Рисунок 2. Шум квантования, возникающий при аналого-цифровом преобразовании: *а* – шум квантования; *б* – распределение шума квантования в полосе частот

Использование цифрового фильтра требует некоторых вычислительных мощностей, которые берутся либо в бортовом вычислителе и потребляют его ресурсы, либо цифровой фильтр выполняется как самостоятельное цифровое устройство, построенное на отдельном микроконтроллере. Необходимо разработать методику построения акселерометра, позволяющую снизить шум квантования без применения цифрового фильтра.

Решение задачи

Автоколебательный режим работы маятникового акселерометра [1; 4; 14] по сравнению с классическим (см. Рисунок 1) имеет следующие преимущества:

- значительно снижается порог чувствительности акселерометра, так как уменьшается влияние различного рода нелинейностей в подвесе чувствительного элемента;

Методика снижения погрешности автоколебательного акселерометра

• значительно упрощается построение преобразователя (измеряемое ускорение \rightarrow цифровой код), так как информация о значении измеряемого ускорения переносится во временную область.

Информация о величине измеряемого ускорения за период автоколебания T_{0i} содержится [7] во временных интервалах t_{1i}, t_{2i}, T_{0i} :

$$a_{BXi} = k_{ПП} \cdot U_{НЗ} (t_{1i} - t_{2i}) / T_{0i}, \tag{2}$$

где $k_{ПП}$ – коэффициент преобразования, $U_{НЗ}$ – напряжение на выходе НЗ.

Погрешность квантования преобразования дискретного сигнала

В работе [8] показано, что в режиме перекомпенсации происходит изменение длительности временных интервалов t_{1i} и t_{2i} до значений t_{1i}^* и t_{2i}^* , что приводит к изменению величины компенсирующего момента:

$$M_{Иi}^{И*} = M_{ОCi}^{+*} + M_{ОCi}^{-*}. \tag{3}$$

В результате при перекомпенсации на i -м периоде колебаний выражение (3) не соблюдается, и величина компенсирующего момента $M_{Иi}^{И*}$ не будет равна моменту инерционных сил

$$M_{Иi}^{И*} \neq M_{Иi}^И; \tag{4}$$

возникает погрешность компенсирующего момента:

$$\Delta(M_{Иi}^{И*}) = M_{Иi}^И - M_{Иi}^{И*}. \tag{5}$$

Если значения t_{1i}^* (t_{2i}^*) меньше значения t_{1i} (t_{2i}), то маятник отклоняется на меньший относительно исходного автоколебательного режима угол β_{AK} . Таким образом, угол β_{AKi}^* отклонения маятника в режиме перекомпенсации не имеет постоянной величины и носит случайный характер.

Соответственно, преобразованный цифровой сигнал (временной интервал t_{1i}^* и t_{2i}^*) по цепи обратной связи оказывает большее по величине воздействие на движение маятника. Дополнительная величина момента $\Delta(M_{Иi}^{И*})$ в данный i -й интервал времени выступает как погрешность измерения, но учитывается при измерении следующего $(i+1)$ -го и последующих временных интервалах. Суммирование ошибки по результатам предыдущих периодов автоколебаний позволяет исключить погрешность квантования по времени.

Особенности работы сигма-дельта АЦП

Из [2; 3; 10; 12; 13; 15] известно, что сигма-дельта АЦП среди всех существующих типов АЦП имеют наибольшее разрешение – до 24 действующих разрядов. Повышение количества разрядов происходит за счет снижения шума квантования. Один из принципов, заложенных в этот АЦП, позволяющий уменьшить погрешность, вносимую шумом квантования, и, следовательно, увеличить разрешающую способность, – это усреднение результатов измерения за счет уравнивания заряда на большом интервале времени.

На Рисунке 3 показана функциональная схема сигма-дельта АЦП первого порядка.

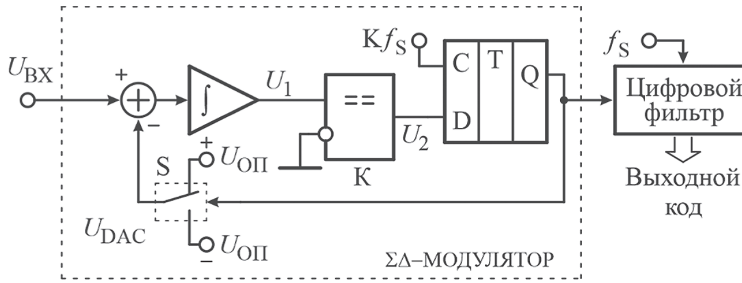


Рисунок 3. Функциональная схема $\Sigma\Delta$ -АЦП первого порядка

На Рисунке 4 показана шум (ошибка) квантования в $\Sigma\Delta$ -АЦП [2; 10; 15].

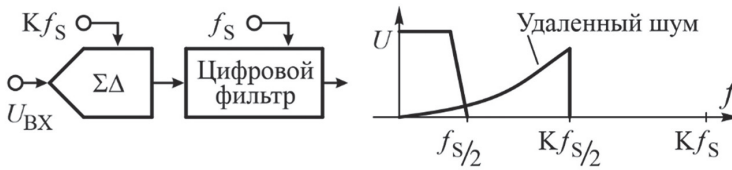


Рисунок 4. Снижение шума квантования $\Sigma\Delta$ -АЦП первого порядка

Анализ работы маятникового акселерометра, работающего в автоколебательном режиме с перекомпенсацией, показывает, что этот режим соответствует принципу работы сигма-дельта АЦП ($\Sigma\Delta$ -АЦП) [3; 12].

Маятниковый акселерометр в режиме работы $\Sigma\Delta$ -АЦП

Структурная схема маятникового акселерометра, работающего в режиме $\Sigma\Delta$ -АЦП преобразователя, показана на Рисунке 5.

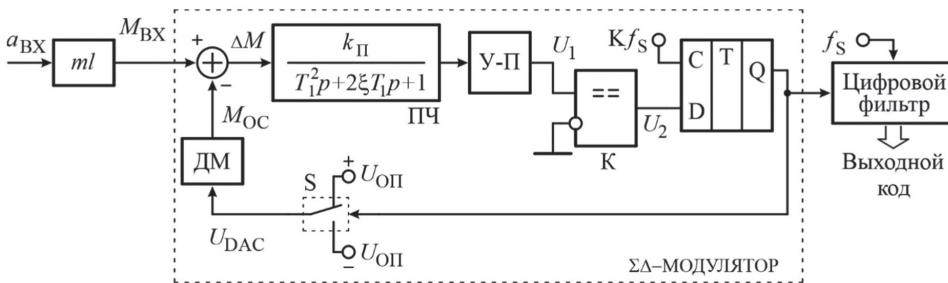


Рисунок 5. Структурная схема маятникового акселерометра, работающего в режиме $\Sigma\Delta$ -АЦП преобразователя

Величину входного ускорения $a_{\text{вх}}$ во входной момент $M_{\text{вх}}$ преобразует маятник с массой m и плечом l . Момент обратной связи $M_{\text{ос}}$ формируется в датчике момента (ДМ) при подключении его к источникам опорного напряжения $U_{\text{оп}}$ при помощи ключа S . Для преобразования перемещения маятника в электрический сигнал введен усилитель-преобразователь (У-П).

Для автоколебательного акселерометра инерционные свойства маятника одновременно являются и интегратором (инерционность маятника значительно выше инерционно-

Методика снижения погрешности автоколебательного акселерометра

сти управляющих сигналов и тактовых частот), и сумматором (маятник своим пространственным движением суммирует входной момент инерционных сил и момент, возникающий по цепи компенсации входного воздействия (цепи обратной связи)).

Одна из сложностей реализации в полной мере в акселерометре режима работы $\Sigma\Delta$ -АЦП – широкий диапазон изменения величины компенсирующего воздействия. Для достижения в полной мере в акселерометре возможностей $\Sigma\Delta$ -АЦП необходимо импульсным способом изменять ток $i_{\Delta M}$ в диапазоне значений $\pm 2^{24}$.

Автоколебательный акселерометр в режиме работы $\Sigma\Delta$ -АЦП

Структурная схема маятникового акселерометра, работающего в автоколебательном режиме с устройством синхронизации, создающим перекомпенсацию входного воздействия, показана на Рисунке 6.

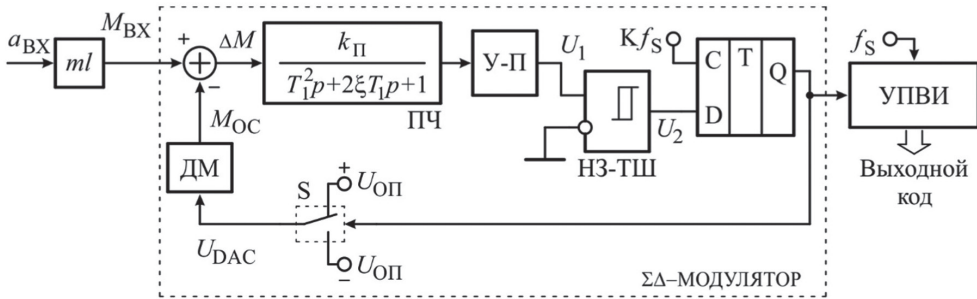


Рисунок 6. Структурная схема автоколебательного акселерометра в режиме перекомпенсации

Отличие данной схемы от схемы $\Sigma\Delta$ -АЦП состоит в том, что вместо компаратора К используется нелинейное звено (триггер Шмитта) НЗ-ТШ. Постоянная времени T_1 подвижной части маятникового акселерометра значительно больше временных интервалов $\Delta (t_{ii}^{0,1})$ или $\Delta (t_{ii}^{1,0})$. Поэтому передаточную функцию подвижной части акселерометра по отношению к этим временным интервалам можно представить как двойной интеграл

$$W(p) \approx k_{II}^* / p^2, \tag{6}$$

где $k_{II}^* = k_{II} / T_1^2$, инерционность которой интегрирует сумму моментов, приложенных к ней, и преобразует сумму приложенных моментов в параметры движения маятника.

Шум квантования [3; 12] для усилительной системы второго порядка ниже, чем для системы первого порядка. На практике [2; 10; 15] для повышения точности преобразования порядок системы повышают, и действующие $\Sigma\Delta$ -АЦП имеют 3-й, 5-й и 7-й порядок. Дальнейшее увеличение порядка системы в $\Sigma\Delta$ -АЦП не применяется в связи со сложностью обеспечения устойчивости работы преобразователя. Кроме того, повышение порядка системы приводит к снижению максимальной полосы преобразования $\Sigma\Delta$ -АЦП.

Моделирование работы автоколебательного акселерометра

Для подтверждения теоретических предположений, рассмотренных выше, было произведено моделирование автоколебательного акселерометра, работающего в режиме перекомпенсации, в моделирующем пакете MATLAB. Структура модели акселерометра показана на Рисунке 7.

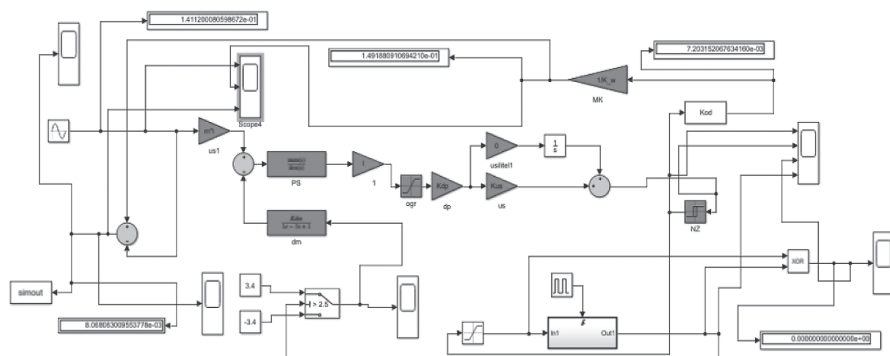


Рисунок 7. Модель автоколебательного акселерометра в пакете MatLab

Результаты моделирования ошибки квантования $u_{\Delta(T)}$ показаны в таблице.

Таблица

Результаты моделирования для $f_{ГТИ} = 100$ кГц

x	-3,0	-2,5	-2,0	-1,5	-1,0	-0,5	0	0,5	1,0
$f_{ВХ}$, Гц	0,001	0,00316	0,01	0,0316	0,1	0,316	1,0	3,16	10,0
$u_{\Delta(T)}$	0,002	0,003	0,004	0,005	0,01	0,015	0,04	0,1	0,4

Для создания модели были использованы численные данные параметров акселерометра А-15, приведенные в [11]. Моделирование проводилось для тактовой частоты $f_{ГТИ} = 100$ кГц. Невысокое значение тактовой частоты не изменило сути происходящих процессов, но позволило значительно сократить время на моделирование модели. Частота изменения входного (измеряемого) ускорения $f_{ВХ}$ изменялась дискретно от 0,001 до 10 герц в логарифмическом масштабе: $f_{ВХ} = 10^x$.

На Рисунке 8 результаты моделирования представлены в двойном логарифмическом масштабе.

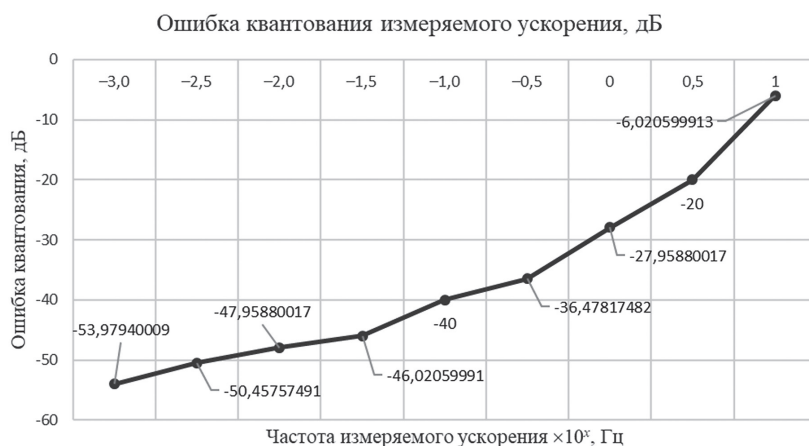


Рисунок 8. Зависимость ошибки квантования от частоты входного сигнала

Методика снижения погрешности автоколебательного акселерометра

Крутизна характеристики ошибки квантования для $\Sigma\Delta$ -АЦП составляет 40 дБ/дек [2; 6; 10; 15]. Крутизна характеристики ошибки квантования для акселерометра, работающего в режиме автоколебаний, в среднем составляет 9 дБ/дек для заданного режима работы акселерометра. Разница в крутизне характеристики ошибки квантования объясняется самой сутью работы автоколебательного режима акселерометра – количеством тактовых импульсов, приходящихся на одно компенсирующее переключение, в котором учитывается ошибка квантования [8]. В автоколебательном акселерометре компенсация происходит значительно реже.

Внешний вид характеристики, показанной на Рисунке 8, по своей сути соответствует характеристике, показанной на Рисунке 4, что полностью подтверждает теоретические предположения, сделанные в процессе разработки методики по улучшению точностных параметров маятникового акселерометра.

Методика снижения погрешности автоколебательного акселерометра

Методика снижения погрешности автоколебательного акселерометра включает в себя следующие действия.

1. Использование в качестве объекта модернизации маятникового акселерометра компенсационного типа.

2. Включение маятникового акселерометра компенсационного типа в режим автоколебаний.

3. Разработка устройства перекомпенсации входного воздействия для автоколебательного акселерометра.

4. Использование режима перекомпенсации входного воздействия в автоколебательном режиме работы акселерометра.

5. Оценка снижения шума квантования автоколебательного акселерометра, работающего в режиме сигма-дельта АЦП.

Указанная методика может быть использована для широкого круга измерительных приборов, в которых в качестве чувствительного элемента используется подвижная масса.

Заключение

Рассмотренная методика снижения погрешности измерения автоколебательного акселерометра позволяет обеспечить улучшение точностных характеристик инерциальных датчиков первичной информации бортового информационно-измерительного комплекса перспективных космических робототехнических комплексов, а также позволяет снизить стоимость готового изделия.

Введение сигнала перекомпенсации приводит к устранению погрешности преобразования аналоговой величины в цифровой код и снижению требований к тактовой частоте преобразователя до значения 30... 50 МГц (и ниже), что позволит выполнить устройство преобразования временных интервалов на интегральных микросхемах малой степени интеграции на программируемых логических интегральных схемах или базовых матричных кристаллах по технологиям, широко применяемым в технике на современном историческом этапе.

Литература

1. Ватутин М.А. Нелинейное звено с запаздыванием для автоколебательного акселерометра // Известия вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 7. С. 51–54.
2. Волович Г.И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. М.: Додэка-XXI, 2005. 528 с.
3. Голуб В.С. Сигма-дельта модуляторы и АЦП // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2003. № 4.
4. Датчики измерительных систем / Ж. Аш [и др.]. В 2 кн. М.: Мир, 1992. 419 с.
5. Каргу А.И. Измерительные устройства летательных аппаратов: учеб. пособие для технических вузов. М.: Машиностроение, 1988. 256 с.
6. Куркин А. Сигма-дельта АЦП для микроконтроллера [Электронный ресурс]. URL: <https://www.radiokot.ru/articles/32> (дата обращения: 28.11.2022).
7. Лучко С.В., Ватутин М.А. Компенсационный акселерометр в режиме автоколебаний // Известия вузов. Приборостроение. 2005. Т. 48, № 6. С. 62–67.
8. Метод снижения погрешности квантования в датчиках первичной информации, работающих в автоколебательном режиме / М.А. Ватутин, Ю.А. Кузьмичев, А.И. Ключников, М.П. Буянкин // Журнал Т-Сотм: Телекоммуникации и транспорт. 2013. № 6. С. 13–15.
9. Основы метрологии и электрические измерения / под ред. Е.М. Душина. Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отд., 1987. 480 с.
10. Перебаскин А.Б. Интегральные микросхемы. Микросхемы для аналого-цифрового преобразования и средств мультимедиа: справочник. 1996. Вып. 1. М.: Додэка, 384 с.
11. Распопов В.Я. Микромеханические приборы: учеб. пособие. М.: Машиностроение, 2007. 400 с.
12. Сигма-дельта АЦП / В.Ю. Теплов, А.В. Хаснутдинова, Р.Р. Латыпов, И.В. Скорцов, Д.В. Коротышкин. Казань: Казанский ун-т, 2015. 44 с.
13. Слепова С.В. Основы теории точности измерительных приборов: учеб. пособие. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. 192 с.
14. Точностные параметры нелинейного звена для автоколебательного акселерометра / С.В. Лучко, С.Ю. Балуев, М.А. Ватутин, Ю.А. Кузьмичев, А.И. Ключников, В.П. Ефимов // Известия вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 12. С. 43–46.
15. Шахтарин Б.И., Быков А.А., Ковальчук А.А. Анализ сигма-дельта модулятора // Наука и образование. 2012. № 1. С. 1–10.

References

1. Vatutin M.A. (2014) *Nelineinoe zveno s zapazdyvaniem dlya avtokolebatel'nogo akselerometra* [Non-linear link with delay for a self-oscillating accelerometer]. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie*, vol. 57, No. 7, pp. 51–54 (in Russian).
2. Volovich G.I. (2005) *Skhemotekhnika analogovykh i analogo-tsifrovyykh elektronnykh ustroystv* [Circuit engineering of analog and analog-digital electronic devices]. Moscow: Dodeka-XXI publishing, 528 p. (in Russian).
3. Golub V.S. (2003) *Sigma-del'ta modulyatory i ATsP* [Sigma-delta modulators and ADC]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, No. 4 (in Russian).
4. Ash J. (1992) *Datchiki izmeritel'nykh sistem* [Sensors of measuring systems]. Moscow: Mir Publishing, 419 p. (in Russian).

5. Kargu L.I. (1988) *Izmeritel'nye ustroystva letatel'nykh apparatov* [Measuring devices of aircraft: textbook. allowance for technical universities]. Moscow: Mashinostroenie Publishing, 256 p. (in Russian).
6. Kurkin A. *Sigma-del'ta ATsP dlya mikrokontrollera* [Sigma-delta ADC for a microcontroller]. Available: <https://www.radiokot.ru/articles/32> (date of the application: 11/28/2022) (in Russian).
7. Luchko S.V., Vatutin M.A. (2005) *Kompensatsionnyi akselerometr v rezhime avtokolebani* [Compensation accelerometer in the mode of self-oscillations]. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie*, vol. 48, No. 6, pp. 62–67 (in Russian).
8. Vatutin M.A., Kuzmichev Yu.A., Klyuchnikov A.I., Buyankin M.P. (2013) *Metod snizheniya pogreshnosti kvantovaniya v datchikakh pervichnoi informatsii, rabotayushchikh v avtokolebatel'nom rezhime* [Method for reducing the quantization error in primary information sensors operating in self-oscillatory mode]. *Zhurnal T-Comm: Telekommunikatsii i transport*, No. 6, pp. 13–15 (in Russian).
9. Dushina E.M. (ed.) (1987) *Osnovy metrologii i elektricheskie izmereniya* [Fundamentals of metrology and electrical measurements]. Leningrad: Energoatomizdat Publishing, 480 p. (in Russian).
10. Perebaskin A.B. (1996) *Integral'nye mikroskhemy. Mikroskhemy dlya analogo-tsifrovogo preobrazovaniya i sredstv mul'timedia* [Integrated circuits. Chips for analog-to-digital conversion and multimedia]. Moscow: Dodeka Publishing, 384 p. (in Russian).
11. Raspopov V.Ya. (2007) *Mikromekhanicheskie pribory* [Micromechanical devices]. Moscow, Mashinostroenie Publishing, 400 p. (in Russian).
12. Teplov V.Yu., Khasnutdinova A.V., Latypov R.R., Skortsov I.V., Korotyshkin D.V. (2015) *Sigma-del'ta ATsP* [Sigma-delta ADC]. Kazan: Kazan University, 44 p. (in Russian).
13. Slepova S.V. (2008) [Fundamentals of the theory of accuracy of measuring instruments]. Chelyabinsk: Publishing House of SUSU, 192 p. (in Russian).
14. Luchko S.V., Baluev S.Yu., Vatutin M.A., Kuzmichev Yu.A., Klyuchnikov A.I., Efimov V.P. (2013) *Tochnostnye parametry nelineinogo zvena dlya avtokolebatel'nogo akselerometra* [Accuracy parameters of a nonlinear link for a self-oscillating accelerometer]. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie*, vol. 56, No. 12, pp. 43–46 (in Russian).
15. Shakhtarin B.I., Bykov A.A., Kovalchuk A.A. (2012) *Analiz sigma-del'ta modulyatora* [Analysis of the sigma-delta modulator]. *Nauka i obrazovanie*, No. 1, pp. 1–10 (in Russian).