



УДК 531.383

## АНАЛИЗ ШУМОВЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ КВАРЦЕВОГО МАЯТНИКОВОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА С ЦИФРОВЫМ УСИЛИТЕЛЕМ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Е.А. Депутатова<sup>а</sup>, Д.С. Гнусарев<sup>а</sup>, Д.М. Калихман<sup>а</sup><sup>а</sup> Филиал ФГУП «НПЦАП» – «ПО «Корпус», Саратов, 410019, Российская Федерация

Адрес для переписки: deputatova@bk.ru

### Информация о статье

Поступила в редакцию 17.07.18, принята к печати 28.08.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-1091-1098

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Депутатова Е.А., Гнусарев Д.С., Калихман Д.М. Анализ шумовых составляющих кварцевого маятникового акселерометра с цифровым усилителем обратной связи // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 6. С. 1091–1098. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-1091-1098

### Аннотация

**Предмет исследования.** Рассмотрен кварцевый маятниковый акселерометр компенсационного типа с цифровым усилителем обратной связи. Исследованы шумовые составляющие выходного сигнала акселерометра. **Метод.** По серии экспериментальных данных проанализированы шумовые составляющие и погрешности исследуемого прибора согласно методике, принятой на ряде отечественных промышленных предприятий и соответствующей российскому стандарту, а также согласно методике, соответствующей международному стандарту с использованием метода вариаций Аллана. **Основные результаты.** Проведена оценка уровня шумовых составляющих с использованием спектральной плотности распределения мощности шума. Решена задача построения дискретного фильтра выходного сигнала, реализуемого в цифровом усилителе обратной связи прибора на базе встроенного микроконтроллера. Осуществлен выбор фильтра в соответствии с двумя критериями качества, согласно которым: 1) среднеквадратическая ошибка стремится к минимуму; 2) исследуемый прибор рассмотрен как замкнутая система автоматического управления, при этом полоса пропускания такой системы должна стремиться к требуемому значению, а время регулирования – к минимуму. Для определения параметров, соответствующих комплексному критерию качества, в программном комплексе MATLAB проведено математическое моделирование работы акселерометра с цифровым усилителем обратной связи и фильтром. **Практическая значимость.** Показано, что применение фильтра Баттерворта 2-го порядка позволяет снизить шумовую составляющую выходного сигнала акселерометра примерно в 2,5 раза и соответствует обоим критериям качества.

### Ключевые слова

акселерометр, цифровой усилитель обратной связи, шумовые составляющие, погрешности, фильтр

## ANALYSIS OF NOISE COMPONENTS IN QUARTZ PENDULUM ACCELEROMETER WITH DIGITAL FEEDBACK AMPLIFIER

E.A. Deputatova<sup>a</sup>, D.S. Gnusarev<sup>a</sup>, D.M. Kalikhman<sup>a</sup><sup>a</sup>Branch of the Federal State Unitary Enterprise “Academician Pilyugin Scientific-production Center of Automatics and Instrument-making” –

Production Association “Korpus”, Saratov, 410019, Russian Federation

Corresponding author: deputatova@bk.ru

### Article info

Received 17.07.18, accepted 28.08.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-1091-1098

Article in Russian

**For citation:** Deputatova E.A., Gnusarev D.S., Kalikhman D.M. Analysis of noise components in quartz pendulum accelerometer with digital feedback amplifier. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 6, pp. 1091–1098 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-1091-1098

### Abstract

**Subject of Research.** The paper presents research of compensation-type quartz pendulum accelerometer with digital feedback amplifier. Noise components of the accelerometer output signal are studied. **Method.** Based on a series of experimental data, the noise components and errors of the studied device are analyzed in accordance with the method adopted at a number of domestic industrial enterprises in compliance with the Russian standards, and also in accordance with the Allan variation method, which corresponds to the International standards. **Main Results.** We have performed the level estimation of noise components using the spectral density of noise power distribution method. The problem of discrete filter creation is solved for the output signal realized in a digital feedback amplifier based on an embedded microcontroller. The

filter has been selected in accordance with two quality criteria. According to the first criterion, the root-mean-square error tends to a minimum. The second one is a complex quality criterion for which the studied device is viewed as a closed automatic control system, wherein the system bandwidth is expected to tend to the required value and the control time tends to a minimum. Mathematical simulation of operation of the accelerometer with a digital feedback amplifier and a filter is performed in the MATLAB environment in order to determine the parameters that correspond to the complex quality criterion. **Practical Relevance.** It is shown that the use of the second order Butterworth filter makes it possible to reduce the noise component of the accelerometer output signal by approximately 2.5 times and corresponds to both quality criteria outlined in the paper.

**Keywords**

accelerometer, digital feedback amplifier, noise components, errors, filter

**Введение**

В настоящее время на производственном объединении (ПО) «Корпус» (г. Саратов) проводится модернизация шестикомпонентного блока измерителей линейного ускорения с неортогональной ориентацией осей чувствительности [1]. Блок применяется в составе системы управления спускаемого аппарата космического корабля «Союз МС-1». Каждый измерительный канал модернизируемого блока представляет собой кварцевый маятниковый акселерометр с цифровым усилителем обратной связи (акселерометр), для которого решены задачи алгоритмической стабилизации масштабного коэффициента и систематической составляющей нулевого сигнала в диапазоне температур от 0 до +50 °С и диапазоне измеряемых ускорений ±10g [2]. Указанный акселерометр и является объектом исследования настоящей статьи.

В работе с использованием серии экспериментальных данных анализируются погрешности акселерометра согласно методике, принятой на ряде отечественных промышленных предприятий и соответствующей российскому стандарту<sup>1</sup>, и методике, соответствующей международному стандарту института инженеров электротехники и электроники<sup>2</sup>. Кроме того, решается задача построения дискретного фильтра, реализуемого в цифровом усилителе обратной связи для снижения уровня шумовой составляющей выходного сигнала прибора.

**Методика и результаты испытаний акселерометра**

Для оценки шумовых составляющих в выходном сигнале исследуемого прибора проводится серия испытаний «без нагрузки», т.е. регистрируются «нулевые» значения выходного сигнала  $x(t)$ . Для акселерометра это испытания в положениях  $U_{10}$  и  $U_{20}$ , когда ось чувствительности прибора находится в плоскости горизонта (рис. 1). В положениях  $U_{10}$  и  $U_{20}$  амплитуда входного сигнала  $q(t)$  и ускорение  $g$  равны нулю, при этом в положении  $U_{10}$  маятник чувствительного элемента акселерометра направлен вниз, а в  $U_{20}$  – вверх.

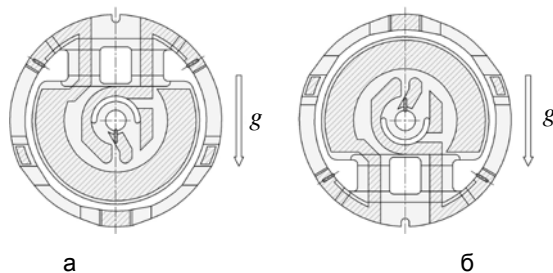


Рис. 1. Ориентация оси подвеса маятника акселерометра в положениях  $U_{10}$  (а) и  $U_{20}$  (б)

Выходные сигналы содержат дрейф (совокупность шумовых составляющих)  $g_{др}(t)$ , систематическую составляющую  $g_{сист}$  и погрешность базы (погрешность ориентации оси чувствительности акселерометра по отношению к вертикали места его закрепления)  $g_{\delta A}$ :

– для положения  $U_{10}$ :

$$x_{10}(t) = g_{др}(t) + g_{сист} \pm g_{\delta A}, \tag{1}$$

– для положения  $U_{20}$ :

$$x_{20}(t) = g_{др}(t) + g_{сист} \mp g_{\delta A}, \tag{2}$$

где знак  $g_{\delta A}$  определяется проверкой установки базы: если средние значения  $\bar{x}_{10}(t) > \bar{x}_{20}(t)$ , то  $g_{\delta A}$  войдет в (1) со знаком «плюс», а в (2) – со знаком «минус».

Для определения систематической составляющей выходного сигнала  $g_{сист}$  и погрешности базы  $g_{\delta A}$  проводится 12 испытаний (6 в положении  $U_{10}$  и 6 – в  $U_{20}$ ) длительностью 100 с каждое с осреднением

<sup>1</sup> ГОСТ Р 8.736 – 2011. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. Введен. 01.01.2013. М.: Стандартинформ, 2013. 23 с.

<sup>2</sup> IEEE Std 1554-2005. IEEE recommended practice for inertial sensor test equipment, instrumentation, data acquisition, and analysis.

100 с, т.е. записываются 12 осредненных значений выходных сигналов  $x_{10}(i)$  и  $x_{20}(i)$ ,  $i$  – номер испытания. При этом систематическая составляющая нулевого сигнала  $g_{\text{сист}}$  и погрешность базы  $g_{\delta A}$  вычисляются по формулам:

$$g_{\text{сист}} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \frac{x_{10}(i) + x_{20}(i)}{2}, \quad (3)$$

$$g_{\delta A} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \frac{x_{10}(i) - x_{20}(i)}{2}. \quad (4)$$

Дрейф выходного сигнала, как было отмечено ранее, представляет собой совокупность шумовых составляющих, одна из которых в паспорте акселерометра указывается как случайная составляющая нулевого сигнала в запуске. Эта составляющая, в частности, определяет принадлежность к классу точности прибора (низкий, средний или прецизионный), и ее уровень может быть оценен по формуле:

$$B = \frac{(x_{10})_{\max} - (x_{10})_{\min}}{2},$$

где  $(x_{10})_{\max}$ ,  $(x_{10})_{\min}$  – максимальное и минимальное значения выходного сигнала при испытании прибора в одном запуске (например, в положении  $U_{10}$ ) длительностью 30 мин. При этом время осреднения составляет также 100 с, соответственно получается 18 осредненных значений выходного сигнала, из которых и выбираются  $(x_{10})_{\max}$  и  $(x_{10})_{\min}$ .

Дрейф выходных сигналов можно определить в соответствии с формулами (1) и (2) из выражений:

$$g_{\text{др}}(t) = x_{10}(t) - g_{\text{сист}} \mp g_{\delta A} \text{ (для } U_{10}); \quad g_{\text{др}}(t) = x_{20}(t) - g_{\text{сист}} \pm g_{\delta A} \text{ (для } U_{20}),$$

где  $x_{10}(t)$  и  $x_{20}(t)$  – измеренные значения выходного сигнала, пересчитанные в единицы  $g$  с учетом масштабного коэффициента акселерометра.

Согласно международному стандарту, определение шумовых составляющих можно проводить с использованием метода вариаций Аллана [3–6]. Методика испытаний прибора отличается от той, что описана выше. Требуется выполнить запись значений выходного сигнала акселерометра при испытании длительностью не менее 60 мин без осреднения, чтобы не сгладить амплитудные выбросы, с максимально возможной частотой опроса измерителя (в настоящей работе – 1 кГц). Согласно методу, можно определить такие шумовые составляющие выходного сигнала, как погрешность квантования выходного сигнала  $Q$ , случайное блуждание выходного сигнала  $N$ , случайная составляющая нулевого сигнала в запуске  $B$ , случайное блуждание скорости изменения выходного сигнала  $K$  и случайный уход выходного сигнала (изменение скорости выходного сигнала с нарастанием дрейфа во времени)  $R$ . Как известно [3–6], вариация Аллана вычисляется по формуле:

$$\sigma^2(\tau) = \frac{1}{2(M-1)} \sum_{i=1}^{M-1} (\bar{g}_{\text{др}}(t_{i+1}) - \bar{g}_{\text{др}}(t_i))^2,$$

где  $\tau$  – время осреднения данных, выбранное при условии  $\tau < T/2$ ;  $T$  – длительность испытания;  $\bar{g}_{\text{др}}(t)$  – осредненные значения  $g_{\text{др}}(t)$  за время  $\tau$ ;  $M$  – количество осредненных данных.

При этом определение шумовых составляющих выходного сигнала осуществляется не по вариациям, а по графику девиаций (отклонений) Аллана:

$$\sigma(\tau) = \sqrt{\sigma^2(\tau)},$$

построенному в логарифмическом масштабе по обеим осям координат.

В частности, случайная составляющая нулевого сигнала в запуске, соответствующая фликкер-шуму, определяется из выражения:

$$B = \sqrt{\frac{\pi}{2 \cdot \ln 2}} \cdot \sigma(\tau_{\text{ср}}) \approx 1,5\sigma(\tau_{\text{ср}}),$$

где  $\tau_{\text{ср}}$  – среднее время осреднения на участке аппроксимированной кривой графика девиаций Аллана при коэффициенте наклона аппроксимированной кривой  $a = 0$ .

На рис. 2 приведены график девиаций Аллана  $\sigma(\tau)$  (сплошная кривая), график его аппроксимации  $y(\tau)$  методом наименьших квадратов полиномом 4-й степени (штриховая), оси, проходящие через точки перегибов графика  $y(\tau)$  с разными коэффициентами наклона  $a$  (штрихпунктир), и значения девиаций Аллана  $\sigma(\tau_{\text{ср}})$  в середине отрезков между точками перегибов (точки).

Значение систематической составляющей нулевого сигнала исследуемого акселерометра составило  $g_{\text{сист}} = -5,0137 \cdot 10^{-4} g$ , значение погрешности базы –  $g_{\delta A} = 3,8549 \cdot 10^{-4} g$ . Значения случайной составляющей нулевого сигнала в запуске  $B$ , рассчитанные в соответствии с методиками из российского

и международных стандартов для различного времени осреднения, сведены в табл. 1. При этом время осреднения 100 с задано в технических условия на прибор, а время 200 с получено из метода вариаций Аллана (это величина  $\tau_{cp}$  при  $a = 0$  на рис. 2).

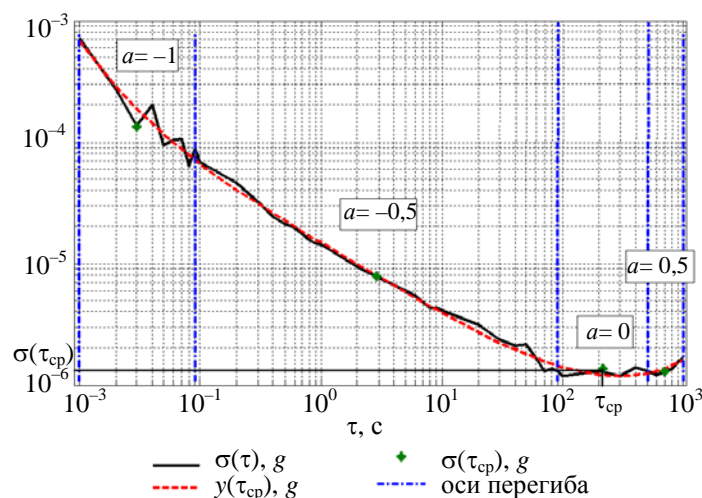


Рис. 2. График девиаций Аллана  $\sigma(\tau)$ , его аппроксимации  $y(\tau)$  и средние значения девиаций  $\sigma(\tau_{cp})$  на участках с разными коэффициентами наклона

Время осреднения, с	Стандарт	
	российский	международный
100	$4 \cdot 10^{-6} g$	–
200	$2,5 \cdot 10^{-6} g$	$2,1 \cdot 10^{-6} g$

Таблица 1. Значения случайной составляющей нулевого сигнала в запуске

Согласно табл. 1, близость значений, полученных с использованием разных методик для одинакового времени осреднения 200 с, позволяет сделать вывод, что при определении случайной составляющей нулевого сигнала в запуске используемая методика значения не имеет, но время осреднения выходного сигнала рекомендуется определять из метода вариаций Аллана.

Также для акселерометра по оценке методом вариаций Аллана были получены следующие значения шумовых составляющих:

$$Q = 6,3603 \cdot 10^{-10} g \cdot ч; \quad N = 2,2306 \cdot 10^{-7} g \cdot ч^{1/2}; \quad K = 5,1167 \cdot 10^{-6} g/ч^{1/2}.$$

Для вычисления переменной  $R$  длительность испытания должна составлять более 50 ч, что при частоте опроса измерителя 1 кГц весьма затруднительно, так как одновременно при каждой итерации в методе Аллана необходимо работать с более чем  $10^8$  значений, на что не всегда хватает вычислительных ресурсов компьютера. При этом большая часть шумовых составляющих, полученных этим методом, не вносится в паспорт прибора, а может использоваться разработчиками только как справочная информация на этапе его проектирования.

### Исследование уровня шумовых составляющих и фильтрация выходного сигнала

При оценке уровня шумовых составляющих используется спектральная плотность распределения мощности шума выходного сигнала  $S(\omega)$ , для чего выполняется переход от функции времени  $x(t)$  к функции частоты  $X(j\omega)$  с помощью преобразования Фурье [7]:

$$X(j\omega) = \int_0^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt. \tag{5}$$

Спектральная плотность распределения мощности шума определяется как [7]:

$$S(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} |X(j\omega)|^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} X(+j\omega)X(-j\omega), \tag{6}$$

где  $X(+j\omega)$  и  $X(-j\omega)$  – комплексно-сопряженные числа преобразования Фурье.

После определения уровня шумовых составляющих выходного сигнала акселерометра решается вопрос о необходимости построения фильтра [8–13]. Далее работа исследуемого прибора с фильтром оценивается с применением двух критериев качества:

$$1) \hat{x} \rightarrow \min, \quad \hat{x} = \sqrt{x^2},$$

где  $\overline{x^2} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x^2(t) dt$  – среднеквадратическая ошибка [7];

$$2) f_{\text{пп}} \rightarrow f_{\text{треб}}; t_{\text{пп}} \rightarrow \min ,$$

где  $f_{\text{пп}}$  – полоса пропускания прибора с фильтром, Гц;  $f_{\text{треб}}$  – требуемая полоса пропускания, Гц;  $t_{\text{рег}}$  – время регулирования, определяющее быстродействие системы, с. В терминологии [7] этот критерий качества – комплексный, согласно ему, прибор рассматривается как замкнутая система автоматического управления, и при этом оценивается полоса пропускания и быстродействие системы:

Для определения параметров, соответствующих комплексному критерию качества, проводится математическое моделирование работы акселерометра с цифровым усилителем обратной связи и фильтром на выходе прибора, реализованном на базе встроенного микроконтроллера. Структурная схема математической модели исследуемого прибора, включающего аналоговые элементы, обозначенные передаточными функциями от оператора Лапласа  $s$ , и цифровые элементы, обозначенные передаточными функциями от дискретного оператора преобразования  $z$ , приведена на рис. 3.

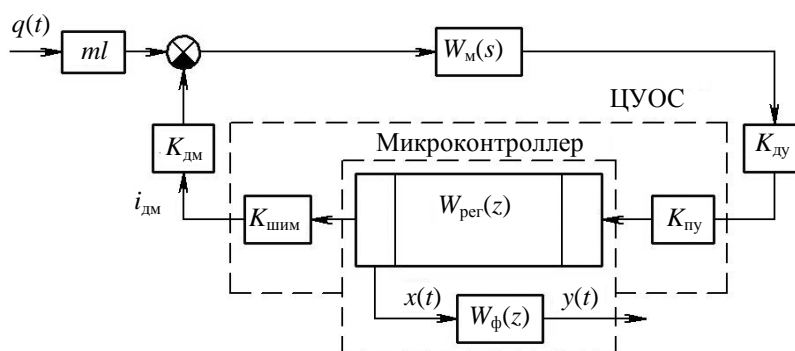


Рис. 3. Структурная схема математической модели акселерометра с цифровым усилителем обратной связи и фильтром

На рис. 3 введены обозначения:  $q(t)$  – входное ускорение;  $ml$  – маятниковость;  $K_{\text{ду}}$ ,  $K_{\text{пу}}$ ,  $K_{\text{шим}}$ ,  $K_{\text{дм}}$  – коэффициенты передачи датчика угла, предварительного усилителя, широтно-импульсного модулятора и датчика момента соответственно;  $W_m(s)$ ,  $W_{\text{рег}}(z)$ ,  $W_{\text{ф}}(z)$  – аналоговая и дискретные передаточные функции маятника, регулятора и фильтра соответственно;  $i_{\text{дм}}$  – ток датчика момента;  $x(t)$ ,  $y(t)$  – выходные сигналы прибора до и после фильтрации соответственно; ЦУОС – цифровой усилитель обратной связи; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ШИМ – широтно-импульсный модулятор.

Вычисления по выражениям (5) и (6) осуществлялись в программном комплексе MATLAB [14], после чего были построены графики спектральной плотности распределения мощности шума выходных сигналов акселерометра для шести часовых испытаний. В связи с хорошей повторяемостью полученных результатов испытаний (значения резонансных частот близки) на рис. 4 приведен лишь один график.

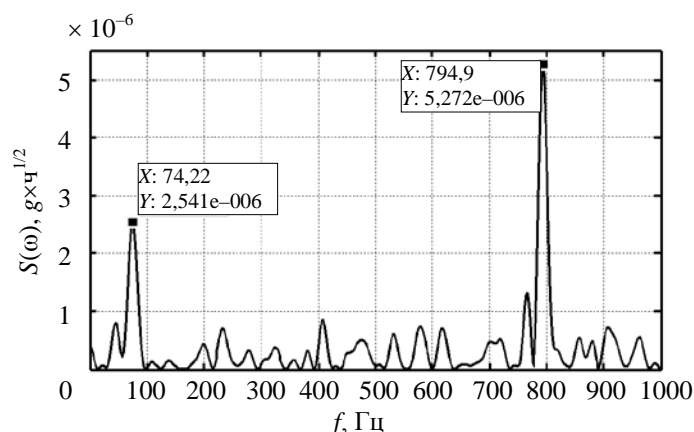


Рис. 4. Спектральная плотность распределения мощности шума выходного сигнала акселерометра

Из анализа рисунка следует, что на выходной сигнал акселерометра преимущественно влияют два фактора: можно предположить, что частота 70–76 Гц соответствует колебанию здания, в котором проводились испытания, а 795–970 Гц – близка к частоте опроса измерителя. Помимо этого, на графиках спектральной плотности распределения мощности шума проявляются всплески на 265, 316, 470, 627,

697 Гц и др. В связи с тем, что чувствительность акселерометра составляет  $5 \cdot 10^{-7} g$ , можно предположить, что проявление большого количества всплесков связано с проходящими мимо трамваями, с движением людей в помещении, где проводились испытания (что формирует полезную информацию в выходном сигнале), а также с возможными магнитными наводками (что дает шум в выходном сигнале), например, из-за включения различного оборудования и света.

Как правило, при испытании прибора в специализированном помещении на «развязанном» фундаменте практически все внешние воздействия исключаются, а внутренние факторы, такие как частота опроса измерителя 1 кГц, частота квантования сигнала 5 кГц, частота питающего напряжения датчика угла 60 кГц и т.д., находятся за требуемой полосой пропускания прибора 500 Гц.

При построении фильтра, как было отмечено ранее, требуется не только уменьшить шумовую составляющую в выходном сигнале, но и добиться того, чтобы полоса пропускания прибора с фильтром была близка к  $f_{\text{треб}}$ , а быстродействие было минимальным. Прототип исследуемого прибора – кварцевый маятниковый акселерометр с аналоговым усилителем обратной связи – КХ67-041 производства ПО «Корпус» [1], в котором для фильтрации выходного сигнала применяется активный RC-фильтр – фильтр Баттерворта 2-го порядка [13, 15]. Этот фильтр рассмотрен и в настоящей работе, его передаточная функция приведена к дискретной форме записи с последующей реализацией на базе встроенного микроконтроллера в цифровом усилителе обратной связи исследуемого прибора, что, в свою очередь, дает возможность изменения коэффициентов фильтра и изменения полосы пропускания путем перепрограммирования микроконтроллера.

С применением фильтра Баттерворта 2-го порядка, рассчитанного для полосы пропускания 500 Гц, искажение выходного сигнала исследуемого прибора не наблюдается. Из графиков, приведенных на рис. 5, видно, что применительно к зашумленным сигналам амплитудные выбросы уменьшаются.

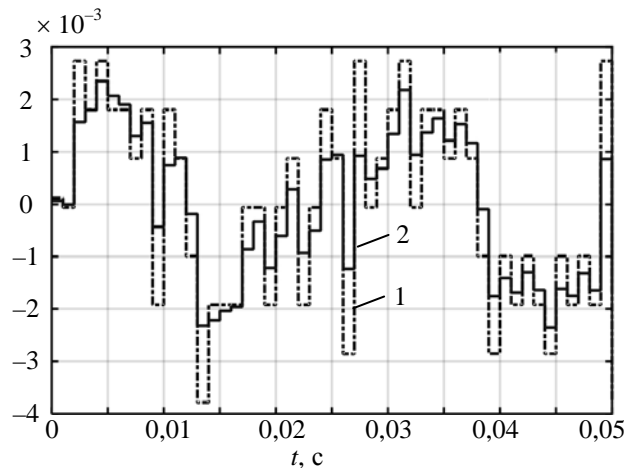


Рис. 5. Графики выходных сигналов акселерометра без фильтра (1)  $x(t)$  и с фильтром Баттерворта 2-го порядка (2)  $y(t)$  при входном ускорении  $q(t) = 0 g$

Рассчитанные значения средней ошибки для выходных сигналов исследуемого прибора без фильтра и с фильтром Баттерворта 2-го порядка для шести часовых испытаний сведены в табл. 2.

Для выходного сигнала	Номер испытания					
	№ 1 ( $U_{10}$ )	№ 2 ( $U_{10}$ )	№ 3 ( $U_{10}$ )	№ 4 ( $U_{20}$ )	№ 5 ( $U_{20}$ )	№ 6 ( $U_{20}$ )
Без фильтра	0,0585 g	0,0616 g	0,0418 g	0,0551 g	0,0583 g	0,0592 g
С фильтром Баттерворта 2-го порядка	0,0448 g	0,0362 g	0,0290 g	0,0290 g	0,0395 g	0,0302 g

Таблица 2. Значения средней ошибки

Согласно табл. 2, для всех шести испытаний минимум ошибки при применении фильтра Баттерворта 2-го порядка не превышает 0,045 g, тогда как без фильтрации выходного сигнала эта величина достигает 0,062 g.

Для оценки работы исследуемого прибора с применением комплексного критерия качества в среде Simulink программного комплекса MATLAB реализована структурная схема математической модели (см. рис. 3) с числовыми параметрами прибора из [1, 2]. Результаты математического моделирования во временной и частотной областях приведены на рис. 6 и 7 для выходных сигналов акселерометра без фильтра  $x(t)$  и с фильтром  $y(t)$  при единичном входном ускорении  $q(t)$ . Из анализа рис. 6 следует, что время регулирования примерно одинаково – 0,003 с, т.е. быстродействие системы практически не меняется. Из рис. 7 следует, что при работе прибора с фильтром полоса пропускания, определенная по уровню 0,5 выходного сигнала, немного уменьшается – 492 Гц.

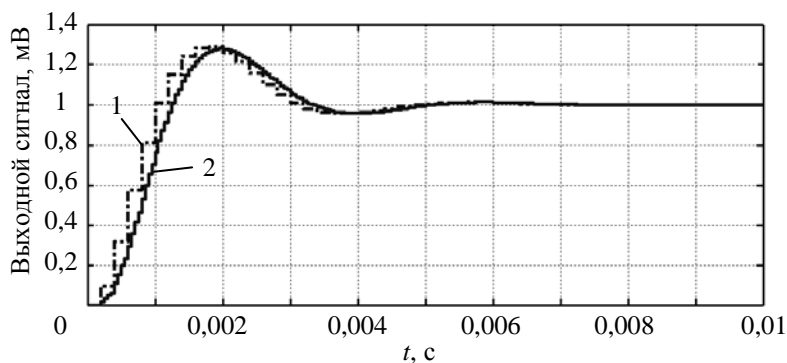


Рис. 6. Графики переходных процессов выходных сигналов акселерометра без фильтра (1)  $x(t)$  и с фильтром Баттерворта 2-го порядка (2)  $y(t)$  при входном ускорении  $q(t) = 1 g$

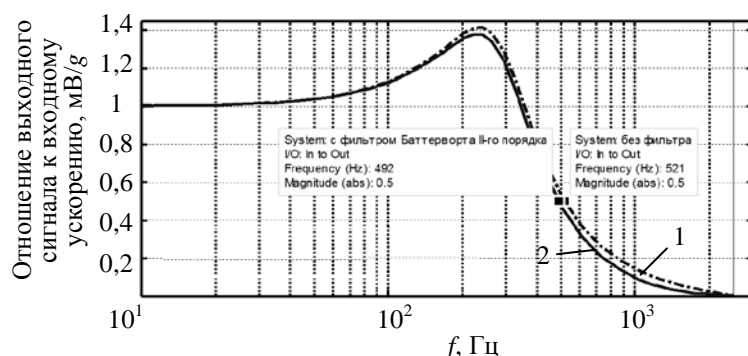


Рис. 7. Амплитудно-частотные характеристики замкнутых систем акселерометра для выходных напряжений без фильтра (1)  $x(s)$  и с фильтром Баттерворта 2-го порядка (2)  $y(s)$  по входному ускорению  $q(s)$

Таким образом, для исследуемого акселерометра на базе встроенного микроконтроллера был реализован фильтр Баттерворта 2-го порядка, рассчитанный для полосы пропускания 500 Гц, передаточная функция которого в дискретной форме записи имеет вид:

$$W_{\phi}(z) = \frac{0,148895z^2}{z^2 - 1,228261z + 0,377156}.$$

Для акселерометра с фильтром Баттерворта 2-го порядка случайная составляющая нулевого сигнала в запуске, рассчитанная методом вариаций Аллана, составила  $0,86 \cdot 10^{-6} g$ , т.е. была уменьшена примерно в 2,5 раза по сравнению с этой величиной для акселерометра без применения фильтра.

### Заключение

Проанализированы шумовые составляющие кварцевого маятникового акселерометра с цифровым усилителем обратной связи: согласно графикам спектральной плотности распределения мощности шума их уровень достигает  $5,3 \cdot 10^{-6} g \cdot \text{ч}^{1/2}$ . Решена задача построения фильтра Баттерворта 2-го порядка, реализованного в дискретной форме на базе встроенного микроконтроллера. Оценена работа акселерометра с фильтром с использованием различных критериев качества, в соответствии с которыми средняя ошибка не превышает 0,04 g, полоса пропускания прибора 492 Гц, время регулирования – 0,003 с. Показано, что применение фильтра позволило уменьшить шумовую составляющую выходного сигнала примерно в 2,5 раза.

### Литература

1. Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Калдымов Н.А., Нахов С.Ф. Блок измерителей линейных ускорений с прецизионными кварцевыми акселерометрами в качестве чувствительных элементов // Сборник материалов IX Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб, 2002. С. 216–220.
2. Калихман Д.М., Гребенников В.И., Калихман Л.Я., Нахов С.Ф., Skorobogatov V.V., Ermakov R.V. Результаты экспериментальной обработки термовариантного кварцевого маятникового акселерометра с цифровой обратной связью и перепрограммируемым диапазоном измерения // Сборник

### References

1. Kalihman D.M., Kalihman L.Ja., Kaldymov N.A., Nahov S.F. Linear acceleration meter with precision quartz accelerometers as sensing elements. *Proc. 9<sup>th</sup> St. Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems*. St. Petersburg, 2002, pp. 216–220. (in Russian)
2. Kalikhman D.M., Grebennikov V.I., Kalikhman L.Ya., Nakhov S.F., Skorobogatov V.V., Ermakov R.V. The results of experimental testing of thermo-variant quartz pendulum accelerometer with digital feedback and reprogrammable measurement range. *Proc. 13<sup>th</sup> St. Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems*. St. Petersburg, 2016, pp. 139–157. (in Russian)

- материалов XXIII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб, 2016. С. 139–157.
- Hou H., El-Sheimy N. Inertial sensors errors modeling using Allan variance // *Proc. of ION GPS/GNSS 2003*. Portland, 2003. P. 2860–2867.
  - Аллан Д.В. Вариация Аллана: история создания, преимущества и недостатки, основные области применения // *Гироскопия и навигация*. 2015. № 4. С. 3–28. doi: 10.17285/0869-7035.2015.23.4.003-028
  - Сирая Т.Н. Вариация Аллана как оценка погрешности измерения // *Гироскопия и навигация*. 2010. № 2. С. 29–36.
  - Степанов О.А., Челпанов И.Б., Моторин А.В. Точность оценивания постоянной составляющей погрешности датчиков и ее связь с вариацией Аллана // *Гироскопия и навигация*. 2016. Т. 24. № 3(94). С. 63–74. doi: 10.17285/0869-7035.2016.24.3.063-074
  - Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975. 768 с.
  - Nurminen H., Raitoharju M., Piche R. An efficient indoor positioning particle filter using a floor-plan based proposal distribution // *Proc. 19<sup>th</sup> IEEE Int. Conf. on Information Fusion (FUSION)*. Heidelberg, Germany, 2016. P. 541–548.
  - Piche R. Cramer-Rao lower bound for linear filtering with t-distributed measurement noise // *Proc. 19<sup>th</sup> IEEE Int. Conf. on Information Fusion (FUSION)*. Heidelberg, Germany, 2016. P. 536–540.
  - Raitoharju M., Piche R., Ala-Luhtala J., Ali-Loytty S. Partitioned update Kalman filter // *Journal of Advances in Information Fusion*, 2016, vol. 11, no. 1, pp. 3–14.
  - Sarkka S. *Bayesian Filtering and Smoothing*. Cambridge University Press, 2013. 252 p.
  - Stepanov O.A. Optimal and sub-optimal filtering in integrated navigation systems / In: *Aerospace Navigation Systems*. NY: John Wiley and Sons, 2016. P. 244–298. doi: 10.1002/9781119163060.ch8
  - Степанов О.А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч. 2. Введение в теорию фильтрации. СПб: Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», 2017. 428 с.
  - Дьяконов В.П. *Matlab 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6*. Основы применения. М.: СОЛОН-Пресс, 2005. 800 с.
  - Знаменский А.Е., Теплюк И.Н. Активные RC-фильтры. М.: Связь, 1970. 280 с.
  - Hou H., El-Sheimy N. Inertial sensors errors modeling using Allan variance. *Proc. of ION GPS/GNSS 2003*. Portland, 2003, pp. 2860–2867.
  - Allan D.W. Historicity, strengths, and weaknesses of Allan variances and their general applications. *Gyroscopy and Navigation*, 2015, no. 4, pp. 3–28. (in Russian)
  - Siraya T.N. Allan variances as a measurement error estimation. *Gyroscopy and Navigation*, 2010, no. 2, pp. 29–36. (in Russian)
  - Stepanov O.A., Chelpanov I.B., Motorin A.B. Accuracy of sensor bias estimation and its relationship with Allan variance. *Gyroscopy and Navigation*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 51–57. doi: 10.1134/S2075108717010072
  - Besekerskii V.A., Popov E.P. *The Theory of Automatic Control Systems*. Moscow, Nauka Publ., 1975, 768 p. (in Russian)
  - Nurminen H., Raitoharju M., Piche R. An efficient indoor positioning particle filter using a floor-plan based proposal distribution. *Proc. 19<sup>th</sup> IEEE Int. Conf. on Information Fusion, FUSION*. Heidelberg, Germany, 2016, pp. 541–548.
  - Piche R. Cramer-Rao lower bound for linear filtering with t-distributed measurement noise. *Proc. 19<sup>th</sup> IEEE Int. Conf. on Information Fusion, FUSION*. Heidelberg, Germany, 2016, pp. 536–540.
  - Raitoharju M., Piche R., Ala-Luhtala J., Ali-Loytty S. Partitioned update Kalman filter. *Journal of Advances in Information Fusion*, 2016, vol. 11, no. 1, pp. 3–14.
  - Sarkka S. *Bayesian Filtering and Smoothing*. Cambridge University Press, 2013, 252 p.
  - Stepanov O.A. Optimal and sub-optimal filtering in integrated navigation systems. In *Aerospace Navigation Systems*. NY, John Wiley and Sons, 2016, pp. 244–298. doi: 10.1002/9781119163060.ch8
  - Stepanov O.A. *Basis of the Estimation Theory with Applications to the Tasks of Navigation Information Processing*. Part 2. Introduction to the theory of filtration. St. Petersburg, Concern CSRI Elektropribor, 2017, 428 p. (in Russian)
  - D'yakonov V.P. *Matlab 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6. Application Basics*. Moscow, Solon-Press, 2005, 800 p. (in Russian)
  - Znamenskii A.E., Teplyuk I.N. *Active RC Filters*. Moscow, Svyaz' Publ., 1970, 280 p. (in Russian)

### Авторы

**Депутатова Екатерина Александровна** – кандидат технических наук, ведущий инженер-программист, Филиал ФГУП «НПЦАП» – «ПО «Корпус», Саратов, 410019, Российская Федерация, Scopus ID: 37087025100, ORCID ID: 0000-0001-8870-8107, deputatova@bk.ru

**Гнусарев Дмитрий Сергеевич** – инженер-электроник, Филиал ФГУП «НПЦАП» – «ПО «Корпус», Саратов, 410019, Российская Федерация, Scopus ID: 57195506586, ORCID ID: 0000-0001-7112-0622, men4eg@outlook.com

**Калихман Дмитрий Михайлович** – доктор технических наук, начальник научно-исследовательской лаборатории, Филиал ФГУП «НПЦАП» – «ПО «Корпус», Саратов, 410019, Российская Федерация, Scopus ID: 37013429100, ORCID ID: 0000-002-3295-2108, lidkalihman@yandex.ru

### Authors

**Ekaterina A. Deputatova** – PhD, Leading Software Engineer, Branch of the Federal State Unitary Enterprise “Academician Pilyugin Scientific-production Center of Automatics and Instrument-making” – Production Association “Korpus”, Saratov, 410019, Russian Federation, Scopus ID: 37087025100, ORCID ID: 0000-0001-8870-8107, deputatova@bk.ru

**Dmitriy S. Gnusarev** – electronic engineer, Branch of the Federal State Unitary Enterprise “Academician Pilyugin Scientific-production Center of Automatics and Instrument-making” – Production Association “Korpus”, Saratov, 410019, Russian Federation, Scopus ID: 57195506586, ORCID ID: 0000-0001-7112-0622, men4eg@outlook.com

**Dmitriy M. Kalikhman** – D.Sc., S&R Laboratory Head, Branch of the Federal State Unitary Enterprise “Academician Pilyugin Scientific-production Center of Automatics and Instrument-making” – Production Association “Korpus”, Saratov, 410019, Russian Federation, Scopus ID: 37013429100, ORCID ID: 0000-002-3295-2108, lidkalihman@yandex.ru