

УДК 531.383

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-883-891

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ВИБРОУСТОЙЧИВОСТИ КВАРЦЕВОГО МАЯТНИКОВОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЦИФРОВОГО УСИЛИТЕЛЯ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

А.Ю. Николаенко, В.В. Скоробогатов

Филиал ФГУП «НПЦАП»–«ПО «Корпус», Саратов, 410019, Российская Федерация
 Адрес для переписки: anikolaenkostu@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 21.05.19, принята к печати 12.07.19
 Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: Николаенко А.Ю., Скоробогатов В.В. Способы повышения виброустойчивости кварцевого маятникового акселерометра при использовании цифрового усилителя обратной связи // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 5. С. 883–891. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-883-891

Аннотация

Предмет исследования. Рассмотрены способы повышения виброустойчивости кварцевого маятникового акселерометра с цифровым усилителем обратной связи, не требующие доработки конструкции измерителя или применения демпфирования прибора. **Метод.** Предлагаемые способы реализованы алгоритмически посредством управляющей программы контроллера цифрового усилителя и основаны на расширении полосы пропускания прибора, коррекции коэффициентов регулирования во время работы акселерометра, введении дополнительного канала управления в контур обратной связи. **Основные результаты.** Предлагаемые способы исследованы экспериментально на макетном образце кварцевого маятникового акселерометра с цифровым усилителем обратной связи и диапазоном измерения ± 50 g. Исследования проводились в условиях действия вибраций: широкополосной случайной вибрации в частотном диапазоне от 20 до 2000 Гц (среднеквадратическое отклонение амплитуды виброускорения 8 g) и синусоидальной вибрации в частотном диапазоне от 20 до 2000 Гц (амплитуда виброускорения 10 g) по оси чувствительности. Эффективность способов оценивалась по величине виброошибки прибора — разности между осредненным значением показаний прибора до вибрации и осредненным значением показаний прибора за время действия вибрации. Экспериментально установлено, что наилучшим решением является сочетание широкой полосы пропускания прибора с дополнительным каналом управления в контуре обратной связи, что позволяет на порядок снизить виброошибку акселерометра. **Практическая значимость.** Предлагаемые способы повышают виброустойчивость кварцевого маятникового акселерометра за счет применения оригинальных алгоритмов в управляющей программе контроллера его цифрового усилителя, что позволяет отказаться от доработки конструкции измерителя или демпфирования прибора и применять такие акселерометры на объектах, подверженных воздействию вибраций.

Ключевые слова

кварцевый маятниковый акселерометр, цифровая обратная связь, широтно-импульсная модуляция, виброустойчивость, полоса пропускания, дополнительный канал управления

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-883-891

TECHNIQUES FOR VIBRATION RESISTANCE INCREASE OF QUARTZ PENDULUM ACCELEROMETER USING DIGITAL FEEDBACK AMPLIFIER

A.Yu. Nikolaenko, V.V. Skorobogatov

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: anikolaenkostu@gmail.com

Article info

Received 21.05.19, accepted 12.07.19
 Article in Russian

For citation: Nikolaenko A.Yu., Skorobogatov V.V. Techniques for vibration resistance increase of quartz pendulum accelerometer using digital feedback amplifier. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 5, pp. 883–891 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-883-891

Abstract

Subject of Research. The paper considers approaches of vibration resistance increasing for quartz pendulum accelerometer with digital feedback amplifier and without further development of measuring element design or application of damping measures. **Method.** The proposed methods are implemented algorithmically by means of the control program of the digital amplifier controller and are based on the extension of the device bandwidth, the correction of the regulating coefficients during the accelerometer operation, and the introduction of an additional control channel to the feedback loop. **Main Results.** The proposed methods were studied experimentally on a prototype quartz pendulum accelerometer with a digital feedback amplifier and a measuring range of ± 50 g. The studies were carried out under the effects of vibration actions: broadband random vibration in the frequency range from 20 to 2000 Hz, (RMS deviation of the vibration acceleration amplitude of 8 g) and sinusoidal vibration in the frequency range from 20 to 2000 Hz (vibration acceleration amplitude of 10 g) along the sensitivity axis. The efficiency of the methods was estimated by the value of device vibration error — the difference between the averaged value of the device readings before vibration and the averaged value of the readings during the period of vibration. It was experimentally established that the best solution is to combine a wide bandwidth of the device with an additional control channel in the feedback loop, that reduces the accelerometer vibration error by an order of magnitude. **Practical Relevance.** The proposed methods increase the vibration resistance of a quartz pendulum accelerometer by applying original algorithms in the digital amplifier controller program, that makes it possible to put to use such accelerometers in objects susceptible to vibration while eliminating the need to introduce physical design modifications or additional damping measures.

Keywords

quartz pendulum accelerometer, digital feedback, pulse width modulation, vibration resistance, bandwidth, additional control channel

Введение

Кварцевые маятниковые акселерометры (КМА) благодаря высокой точности измерений получили широкое распространение в системах управления авиационных, космических [1, 2], морских и наземных подвижных объектов, а также в системах противовоздушной обороны. Любой объект, приводимый в движение силовой установкой, подвергается воздействию вибраций. Поэтому акселерометр, наряду с измеряемым им кажущимся ускорением, используемым в системе управления для расчета навигационных параметров движения, измеряет и вибрационную составляющую [3]. Вибрационная составляющая зачастую фильтруется в системе управления и не влияет на регулируемый параметр, однако может вносить ошибку в измеряемый сигнал [4]. Для уменьшения влияния вибраций обычно приходится или дорабатывать конструкцию измерителя [5], или применять демпфирование прибора для уменьшения передачи вибрации от корпуса объекта.

Настоящая статья посвящена разработке способов снижения влияния вибрации на точность КМА с цифровым усилителем обратной связи (ЦУОС) [6–10] без изменения конструкции измерителя и применения демпфирования прибора. Снижение влияния вибрации достигается за счет применения разработанных алгоритмов в управляющей программе контроллера цифрового усилителя. В статье приводятся результаты испытаний акселерометра в условиях действия вибраций: широкополосной случайной вибрации (в частотном диапазоне от 20 до 2000 Гц, среднеквадратическое отклонение (СКО) амплитуды виброускорения 8 g) и синусоидальной вибрации (амплитуда виброускорения 10 g) по оси чувствительности.

Повышение виброустойчивости кварцевого маятникового акселерометра при использовании цифрового усилителя обратной связи

Задача обратной связи КМА состоит в том, чтобы обеспечить удержание маятника акселерометра в среднем относительно упоров чувствительного элемента (нулевом) положении при действии на маятник внешних ускорений вдоль оси чувствительности акселерометра за счет формирования управляющего воздействия в виде тока датчика момента. Устройство цифрового усилителя обратной связи показано на рис. 1, где приведена структурная схема КМА с ЦУОС, а на рис. 2 — вид его макетного образца. Цифровой усилитель построен только на отечественной элементной базе и представляет собой совокупность аналогового предварительного усилителя, цифрового вычислительного устройства [11, 12] и переключателя тока датчика момента чувствительного элемента (ЧЭ). Алгоритм цифровой обратной связи [13, 14] для чувствительного элемента КМА реализован на базе микроконтроллера производства ПМК «Миландр» (г. Зеленоград) и состоит в следующем: отклонение маятника чувствительного элемента от положения равновесия приводит к формированию сигнала датчика угла, который после предварительного усиления поступает на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП) микроконтроллера. Форма данного сигнала близка к синусоидальной, поэтому для получения информации об его размахе с помощью АЦП производится два измерения — в середине первого полупериода и в середине второго полупериода данного сигнала. Разность полученных значений (ошибка управления) может быть как положительной, так и отрицательной, поскольку сигнал ДУ меняет свою фазу на 180° в зависимости от знака действующего ускорения. Дискретный регулятор на основе полученного значения ошибки регулирования вычисляет управление, которое подается на вход блока формирования ШИМ-сигнала. Данный блок построен на базе таймера-счетчика микроконтроллера, включенного в режиме ШИМ, и позволяет совместно с блоком «Переключатель тока» преобразовать цифровой

сигнал регулятора в стабилизированные по амплитуде широтно-модулированные импульсы тока датчика момента [15].

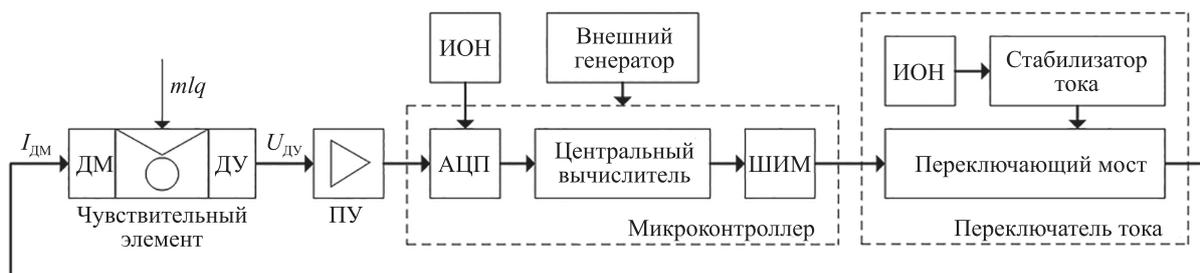


Рис. 1. Структурная схема кварцевого маятникового акселерометра с цифровым усилителем обратной связи:

$I_{ДМ}$ — ток датчика момента; ДМ — датчик момента; mlq — входное ускорение, приведенное к маятниковости акселерометра; ДУ — датчик угла; $U_{ДУ}$ — напряжение датчика угла; ПУ — предварительный усилитель; ИОН — источник опорного напряжения; ШИМ — широтно-импульсный модулятор



Рис. 2. Макет кварцевого маятникового акселерометра с цифровым усилителем обратной связи:

1 — акселерометр, 2 — цифровой усилитель обратной связи, 3 — оснастка

Цифровой усилитель обратной связи позволяет изменять такие параметры прибора, как диапазон измеряемых ускорений, полосу пропускания, температурный диапазон, только за счет изменения управляющей программы микроконтроллера. При этом конструкция маятника ЧЭ и функциональная электроника остаются без изменений. ЦУОС предоставляет широкие возможности для борьбы с вибропогрешностью и удобен на этапе разработки и подбора способов ее снижения.

Следует отметить, что в КМА с цифровой обратной связью имеется запаздывание по управлению на долю такта обратной связи, поскольку измерение сигнала датчика угла, вычисление на его основе управления и подготовка таймеров контроллера для формирования ШИМ-сигнала занимают процессорное время. Величина этого запаздывания на каждом такте работы обратной связи постоянная. Более того, в случае применения любого из предлагаемых ниже способов повышения виброустойчивости обратная связь цифрового усилителя работает на частоте 10 кГц, поэтому запаздывание по выдаче управления, обусловленное дискретностью регулятора, невелико и для всех способов одинаковое.

Способы повышения виброустойчивости КМА

Основная причина возникновения вибропогрешности КМА состоит в раскачке маятника ЧЭ относительно своего нулевого положения при действии вибрации. При этом чем больше амплитуда раскачки маятника, тем в итоге больше вибропогрешность. Поэтому все предлагаемые в настоящей статье способы снижения вибропогрешности направлены на уменьшение амплитуды раскачки маятника ЧЭ.

Первый способ. Обеспечение широкой полосы пропускания акселерометра – один из основных способов борьбы с вибропогрешностью, поскольку за счет широкой полосы удастся снизить динамическую ошибку регулирования в системе управления маятниковым узлом акселерометра, а это в свою очередь приводит к уменьшению амплитуды раскачки маятника при действии вибрации и, как следствие, к снижению вибрационной погрешности акселерометра [5].

Для уменьшения динамической ошибки регулирования в системе управления КМА был синтезирован регулятор, обеспечивающий полосу пропускания системы на уровне 1700 Гц. Реализация данного регулятора стала возможной благодаря повышению частоты работы цифровой обратной связи до 10 кГц

путем перепрограммирования контроллера ЦУОС. Структурная схема системы автоматического управления (САУ) представлена на рис. 3.

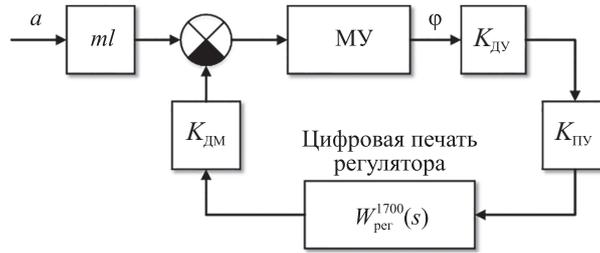


Рис. 3. Структурная схема системы автоматического управления:

a — ускорение; m — масса маятника; l — плечо; МУ — маятниковый узел; φ — угол отклонения маятника; $K_{ДУ}$, $K_{ДМ}$, $K_{ПУ}$ — коэффициенты передачи датчика угла, датчика момента и предварительного усилителя; $W_{пер}^{1700}(s)$ — передаточная функция регулятора, обеспечивающего полосу пропускания 1700 Гц

Широкая полоса пропускания повышает быстродействие системы, что позволяет более активно обрабатывать внешние возмущения и за счет чего снижается вибропогрешность. Однако широкая полоса нужна далеко не во всех приложениях и приводит к возрастанию уровня шума в выходном сигнале прибора. Поэтому для снижения шума и получения требуемой полосы пропускания акселерометра необходимо фильтровать его выходной сигнал, оставляя широкой полосу в контуре обратной связи. Цифровой усилитель позволяет программно реализовывать алгоритмы фильтрации [16], которые позволяют уменьшить полосу пропускания по выходу прибора с 1700 Гц до, например, 300 Гц.

Второй способ. Другой способ снижения вибрационной погрешности акселерометра заключается в реализации на базе цифровой обратной связи адаптивного регулятора [14], параметры которого меняются в зависимости от амплитуды раскачки маятника ЧЭ, которую легко определить по величине ошибки управления. Так, при увеличении амплитуды вибрации можно расширять полосу пропускания прибора, например, с 300 до 1500 Гц путем увеличения коэффициента передачи регулятора в зависимости от величины ошибки управления. Вместе с тем необходимо корректировать постоянные времени регулятора таким образом, чтобы сохранялись требуемые запасы устойчивости. Реализация адаптивного регулятора, обеспечивающего такой диапазон изменения полосы пропускания, становится возможной, поскольку цифровая обратная связь работает на частоте 10 кГц. Структурная схема САУ представлена на рис. 4.

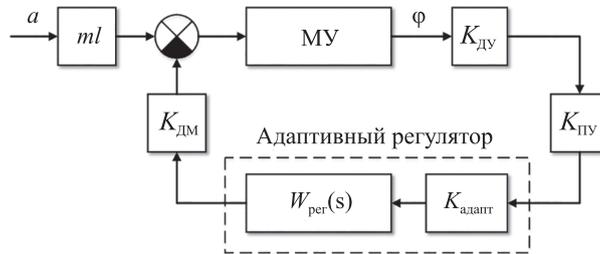


Рис. 4. Структурная схема системы автоматического управления:

$K_{адапт}$ — изменяемый коэффициент передачи; $W_{пер}(s)$ — передаточная функция регулятора с корректируемыми постоянными времени

Передаточная функция адаптивного регулятора имеет вид:

$$W_{пер}^{адапт}(s) = K_{адапт}(e) \cdot W_{пер}(s),$$

где e — ошибка управления; $W_{пер}(s)$ — регулятор с корректируемыми постоянными времени, обеспечивающий в совокупности с изменяемым коэффициентом передачи $K_{адапт}(e)$ требуемые запасы устойчивости и полосу пропускания в диапазоне от 300 до 1500 Гц. Закон изменения коэффициента $K_{адапт}(e)$:

$$\begin{cases} K_{адапт}(e) = 1 + 0,003 \cdot |e|, & \text{если } 0 \leq |e| \leq 1000 \\ K_{адапт}(e) = 4, & \text{если } |e| > 1000 \end{cases} \quad (1)$$

Закон (1) обеспечивает изменение коэффициента передачи $K_{адапт}$ в диапазоне от 1 до 4 (рис. 5), что позволяет в зависимости от величины ошибки управления получить полосу пропускания системы от 300 до 1500 Гц соответственно. Диапазон изменения ошибки управления ограничен разрядностью АПЦ (применяется 12-разрядное АЦП) и составляет от -4095 до 4095 ед. Выбор закона изменения коэффициента

$K_{\text{адапт}}(e)$ в виде линейной зависимости на участке $0 \leq |e| \leq 1000$ обусловлен простотой реализации адаптивного регулятора, обеспечивающего требуемые запасы устойчивости системы.

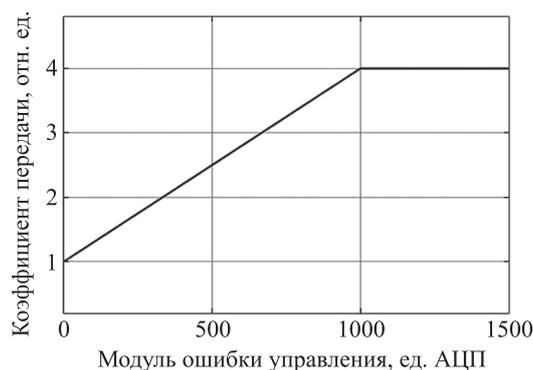


Рис. 5. Зависимость изменяемого коэффициента передачи $K_{\text{адапт}}$ от модуля ошибки управления

Работу обратной связи в случае применения адаптивного регулятора можно описать следующим образом: при отсутствии вибрации ошибка управления стремится к нулю, поэтому величина изменяемого коэффициента передачи равна 1 ($K_{\text{адапт}}(0) = 1$), а полоса пропускания прибора составляет 300 Гц. Если при действии вибрации амплитуда сигнала датчика угла достигает, например, 500 ед. АЦП, то $K_{\text{адапт}}(500) = 2,5$, полоса пропускания 900 Гц, а если 1000 ед. АЦП и более, то $K_{\text{адапт}}(1000) = 4$, полоса пропускания прибора — 1500 Гц.

В данном способе работает тот же принцип, что и в первом: снижение динамической ошибки регулирования и, как следствие, вибропогрешности достигается за счет повышения быстродействия системы путем увеличения полосы пропускания акселерометра. Тем не менее динамическое изменение полосы пропускания позволяет при отсутствии вибрации обеспечивать полосу на уровне 300 Гц и только при действии вибрации расширять ее в пределах 1500 Гц.

Третий способ. Как уже было сказано ранее, основная причина возникновения вибропогрешности заключается в раскачке маятника ЧЭ относительно своего нулевого положения при действии вибрации. Уменьшить амплитуду раскачки маятника возможно за счет увеличения жесткости работы обратной связи. Для этого в контур обратной связи параллельно основному регулятору вводится дополнительный канал управления (рис. 6). Величина дополнительного управления зависит от амплитуды сигнала датчика угла, рассчитывается и суммируется с управлением основного регулятора на каждом такте работы обратной связи, что позволяет уменьшить амплитуду раскачки маятника чувствительного элемента КМА относительно нулевого положения. Дополнительный канал управления реализован в виде функции управляющей программы контроллера ЦУОС.

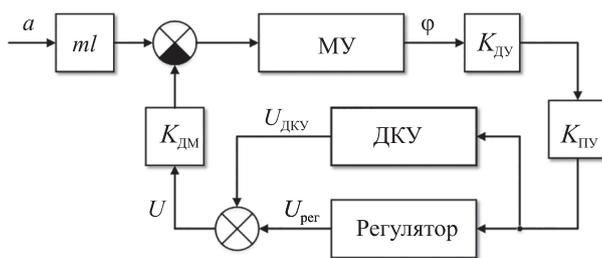


Рис. 6. Структурная схема системы автоматического управления:

ДКУ — дополнительный канал управления; ОУ — объект управления (маятниковый узел); U — суммарное управление системы; $U_{\text{рег}}$ — управление основного регулятора; $U_{\text{дкв}}$ — дополнительное управление

В данном случае суммарное управление системы имеет вид:

$$U = U_{\text{рег}} + U_{\text{дкв}},$$

где $U_{\text{рег}}$ — управление основного регулятора; $U_{\text{дкв}}$ — дополнительное управление, закон изменения которого подобран экспериментально и имеет вид:

$$\begin{cases} U_{\text{дкв}}(e) = -250, \text{ если } e < -630 \\ U_{\text{дкв}}(e) = 10^{-6} \cdot e^3, \text{ если } -630 \leq e \leq 630 \\ U_{\text{дкв}}(e) = 250, \text{ если } e > 630 \end{cases} .$$

На рис. 7 представлена зависимость дополнительного управления от ошибки регулирования, которая представляет собой кубическую параболу, ограниченную по величине на уровне ± 250 единиц.

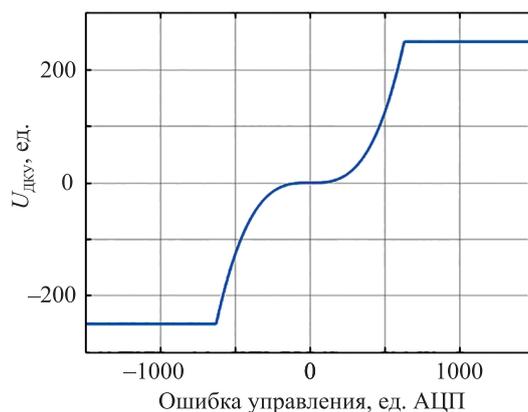


Рис. 7. Зависимость величины дополнительного управления от ошибки управления

Работу обратной связи в случае введения в ее контур параллельно основному регулятору дополнительного канала управления можно описать следующим образом: при отсутствии вибрации ошибка управления стремится к нулю, поэтому величина дополнительного управления также равна 0 ед. ($U_{\text{ДКУ}}(0) = 0$ ед.). Это означает, что к управлению основного регулятора ничего не добавляется, т. е. $U = U_{\text{рег}}$. Если при действии вибрации ошибка управления достигает, например, 500 ед. АЦП, то $U_{\text{ДКУ}}(500) = 125$ ед. Эта величина складывается с управлением основного регулятора: $U = U_{\text{рег}} + 125$. И, наконец, если ошибка управления 630 ед. АЦП и более, то величина дополнительного управления становится равной 250 ед. ($U_{\text{ДКУ}}(1000) = 250$ ед.) и суммируется с управлением основного регулятора: $U = U_{\text{рег}} + 250$. Для отрицательных величин ошибки управления — аналогично. Таким образом, величина дополнительного управления вычисляется в зависимости от амплитуды сигнала ДУ (ошибки управления) и суммируется с управлением основного регулятора на каждом такте работы обратной связи. При этом полоса пропускания акселерометра в случае малых отклонений маятника от нулевого положения определяется основным регулятором и остается постоянной.

Дополнительный канал управления увеличивает жесткость обратной связи и позволяет лучше удерживать маятник ЧЭ в нулевом положении при действии вибрации.

Методика испытаний и результаты исследований

Все предлагаемые в данной статье способы снижения вибропогрешности были исследованы экспериментально. Испытаниям на вибростенде подвергался макетный образец КМА с ЦУОС, представленный на рис. 2, диапазон измерения которого составляет ± 50 g. Для определения вибрационной ошибки (виброошибки) КМА был установлен на вибростенд. После чего в течение времени $t_1 = 100$ с с помощью данного акселерометра измерялось ускорение свободного падения. При этом все показания прибора накапливались в памяти компьютера, к которому он был подключен. Далее с помощью вибростенда задавалась синусоидальная вибрация с амплитудой 10 g. Частота вибрации изменялась с 20 Гц до 2 кГц со скоростью 1 окт/мин. Все показания прибора за время действия вибрации t_2 также накапливались в памяти компьютера. Измеренное за время испытания ускорение схематично представлено на рис. 8.

Виброошибкой считается разность между осредненным значением показаний прибора до вибрации U^{t_1} и осредненным значением показаний прибора за время действия вибрации U^{t_2} :

$$\xi_{\text{вибр}} = U^{t_1} - U^{t_2},$$

$$U^{t_1} = \frac{\sum_{i=1}^n U_i^{t_1}}{n}, \quad U^{t_2} = \frac{\sum_{j=1}^m U_j^{t_2}}{m},$$

где $\xi_{\text{вибр}}$ — виброошибка, $U_i^{t_1}$ — показания прибора до вибрации, n — количество измерений за время t_1 , $U_j^{t_2}$ — показания прибора за время действия вибрации, m — количество измерений за время t_2 .

Кроме того, акселерометр подвергался воздействию широкополосной случайной вибрации в частотном диапазоне от 20 до 2000 Гц с СКО амплитуды 8 g. В данном случае методика испытаний полностью совпадает с методикой, описанной выше, за исключением того, что за время t_2 с помощью вибростенда задавалась именно случайная вибрация.

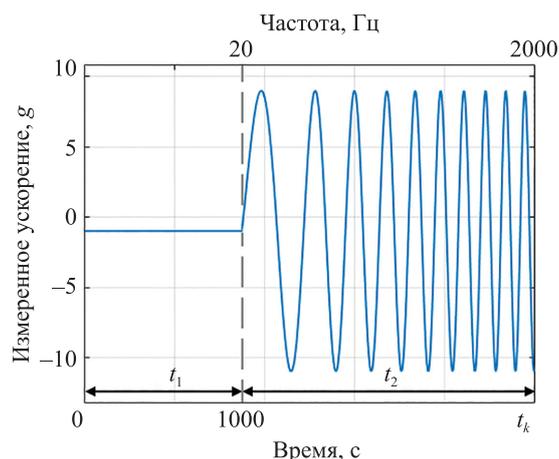


Рис. 8. Измеренное с помощью кварцевого маятникового акселерометра ускорение за время испытания t_k

В ходе испытаний макетного образца КМА с ЦУОС на вибростенде были получены следующие результаты. Максимальная по модулю виброошибка прибора в исходной конфигурации (частота работы обратной связи 5 кГц, полоса пропускания 500 Гц) при действии синусоидальной вибрации зафиксирована на частоте 650 Гц и составила 147 мг (рис. 9), на частоте около 100 Гц виброошибка составила 83 мг. При действии широкополосной случайной вибрации максимальная виброошибка составила 67 мг (рис. 10).

Результаты экспериментальных исследований прибора при действии синусоидальной вибрации с применением предлагаемых способов (рис. 9).

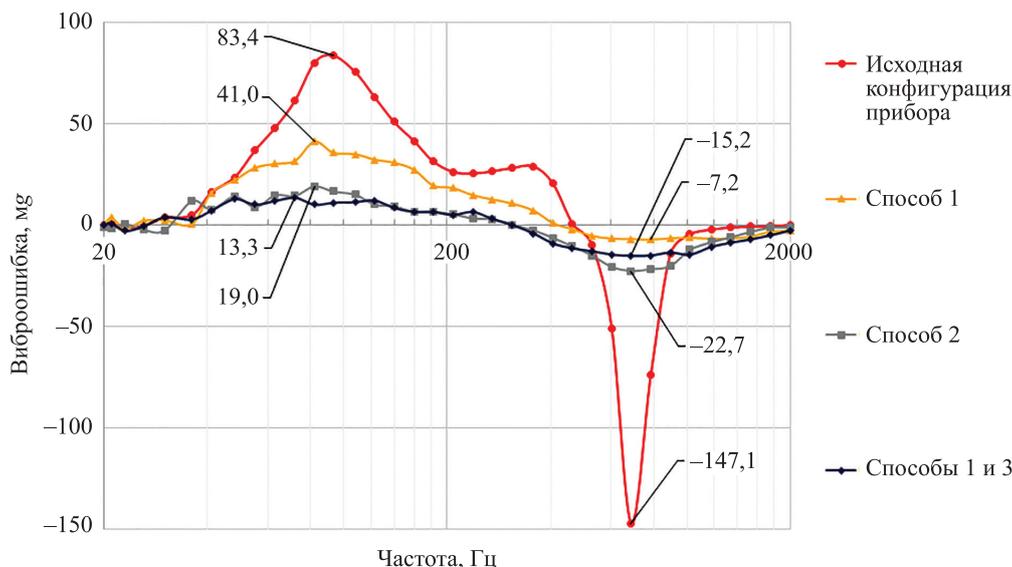


Рис. 9. Зависимость виброошибки акселерометра с цифровым усилителем обратной связи от частоты при действии синусоидальной вибрации с амплитудой 10 g

Способ 1. Максимальная по модулю виброошибка прибора с широкой полосой пропускания (около 1700 Гц) зафиксирована на частоте около 100 Гц и составила 41 мг. На высоких частотах (выше 400 Гц) виброошибка не превышает 7 мг.

Способ 2. Максимальная по модулю виброошибка прибора с динамической полосой пропускания зафиксирована на частоте около 700 Гц и составила 23 мг. На низких частотах (ниже 200 Гц) виброошибка не превышает 19 мг.

Способы 1 и 3. Максимальная по модулю виброошибка прибора с широкой полосой пропускания (около 1700 Гц) и дополнительным каналом управления зафиксирована на частоте 700 Гц и составила 15 мг. На низких частотах (ниже 200 Гц) виброошибка не превышает 13 мг.

При действии широкополосной случайной вибрации максимальная виброошибка прибора с широкой полосой пропускания (около 1700 Гц) и дополнительным каналом управления составила 10 мг (рис. 10).

Из результатов экспериментальных исследований макетного образца акселерометра, представленных на рис. 9, 10, следует, что применение способов 1 и 3 (обеспечение широкой полосы пропускания прибора совместно с введением в контур обратной связи дополнительного канала управления) позволяет снизить

виброошибку КМА с ЦУОС при действии синусоидальной вибрации (частотный диапазон от 20 до 2000 Гц, амплитуда 10 g) с 147 до 15 мг, т. е. примерно на порядок, а при действии широкополосной случайной вибрации (частотный диапазон от 20 до 2000 Гц, СКО амплитуды 8 g) с 67 до 10 мг.

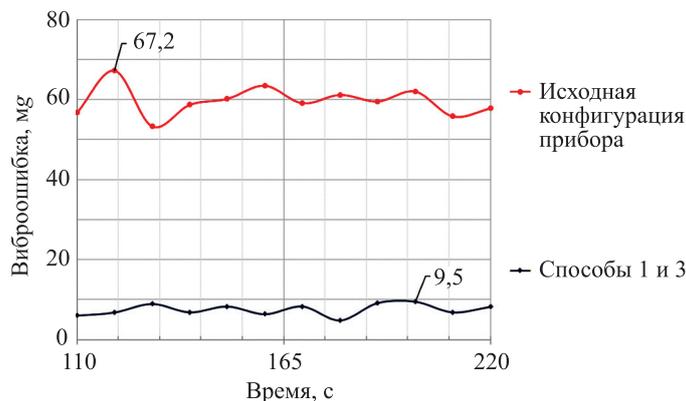


Рис. 10. Виброошибка акселерометра с цифровым усилителем обратной связи при действии широкополосной случайной вибрации (частотный диапазон от 20 до 2000 Гц, среднее квадратическое отклонение амплитуды 8 g)

Заключение

Приведены результаты экспериментальных исследований кварцевого маятникового акселерометра с цифровым усилителем обратной связи, который реализует предлагаемые способы снижения вибропогрешности, в условиях действия синусоидальной и широкополосной случайной вибраций. Показано, что снижение виброошибки обеспечивается только за счет применения оригинальных алгоритмов обработки информации в управляющей программе контроллера цифрового усилителя. Показана эффективность предлагаемых способов. Наилучшим решением является сочетание способов 1 и 3, т. е. сочетание широкой полосы пропускания прибора с дополнительным каналом управления в контуре обратной связи, что позволяет на порядок снизить виброошибку акселерометра. В дальнейшем планируется проводить исследования с уточнением алгоритмов управления.

Литература

1. Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Калдымов Н.А., Полушкин А.В., Нахов С.Ф. Проблемы использования прецизионных кварцевых измерителей кажущихся ускорений в современных инерциальных навигационных системах управления // Сборник трудов 11-й Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2004. С. 157–163.
2. Бранец В.М., Дибров Д.Н., Рыжков В.Н., Калихман Л.Я., Калихман Д.М., Полушкин А.В., Нахов С.Ф., Измеритель вектора кажущегося линейного ускорения – прибор БИЛУ КХ69-042 для СУ спускаемого аппарата корабля «Союз-ТМА» // Сборник трудов 13-й Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2006. С. 253–263.
3. Коновалов С.Ф., Полюнков А.В., Трунов А.А., Сео Дж.Б., Мун Х.К. Исследование работоспособности акселерометров при больших линейных ускорениях, вибрационных и ударных воздействиях без применения центрифуг, вибрационных и ударных испытательных стендов // Сборник трудов 14-й Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2007. С. 126–134.
4. Лунц Я.Л. Ошибки гироскопических приборов. Ленинград: Судостроение, 1968. 232 с.
5. Коновалов С.Ф. Теория виброустойчивости акселерометров. М.: Машиностроение, 1991. 269 с.
6. Скоробогатов В.В., Гребенников В.И., Калихман Л.Я., Калихман Д.М., Нахов С.Ф., Ермаков Р.В. Результаты экспериментальной отработки термостабильного кварцевого маятникового акселерометра с цифровой обратной связью

References

1. Problems of using precision quartz meters apparent accelerations in modern inertial navigation control systems. 11th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. St. Petersburg, OAO Kontsern TsNII Elektroprigor Publ., 2004, pp. 157–163. (in Russian)
2. Branets V.N., Dibrov D.N., Rizhkov V.C., Kalihman L.Ya., Kalihman D.M., Kaldimov N.A., Polushkin A.V., Nahov S.F. Measuring instrument of apparent linear acceleration vector — BILU KX 69-042 device for control system of Soyuz-TMA spacecraft capsule. Proc. 13th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS 2006), 2006, pp. 272–280.
3. Konovalov S.F., Polynkov A.V., Trunov A.A., Seo J.B., Moon H.K. Research of operability of accelerometers at high-g linear acceleration, vibrating and shock effects without using test centrifuges, vibration and shock test tables. Proc. 14th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS 2007), 2007, pp. 125–122.
4. Lunts J.L. Errors of gyroscopic devices. Leningrad, Sudostroenie, 1968, 232 p. (in Russian)
5. Konovalov S.F. Theory of vibration resistance of accelerometers. Moscow, Mashinostroenie, 1991, 269 p. (in Russian)
6. Skorobogatov V.V., Grebennikov V.I., Kalihman L.Ya., Kalihman D.M., Nakhov S.F., Ermakov R.V. The results of experimental testing of a thermally invariant quartz pendulum accelerometer with digital feedback and reprogrammable measurement range. Proc. 23rd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS 2016), 2016, pp. 157–172.
7. Skorobogatov V.V. Problems of development of a wide range quartz pendulum accelerometer with digital feedback and methods of solution. Izvestiya Tula State University, 2016, no. 10, pp. 17–29. (in Russian)

- и перепрограммируемым диапазоном измерения // Сборник трудов 23-й Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2016. С. 139–157.
7. Скоробогатов В.В. Проблемы разработки широкодиапазонного кварцевого маятникового акселерометра с цифровой обратной связью и пути их решения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 10. С. 17–29.
 8. Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Нахов С.Ф., Поздняков В.М., Гребенников В.И., Скоробогатов В.В., Депутатова Е.А. Проблемы разработки современных блоков электромеханических измерителей угловой скорости и кварцевых маятниковых акселерометров для объектов ракетно-космической техники. История и перспективы развития // Известия Тульского государственного университета. 2016. № 10. С. 311–325.
 9. Гребенников В.И., Калихман Л.Я., Калихман Д.М., Нахов С.Ф., Скоробогатов В.В., Сапожников А.И., Смирнов Е.С. Вибростойчивый маятниковый акселерометр линейных ускорений с цифровой обратной связью // Сборник трудов 22-й Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2015. С. 368–376.
 10. Grebennikov V.I., Kalikhman D.M., Kalikhman L.Ya., Nakhov S.F., Nikolaenko A.Yu., Skorobogatov V.V. Method to Increase Stability of the Scale Factor of a Precision Pendulum Accelerometer with Digital Feedback // Proc. of 25th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, St. Petersburg (ICINS 2018), 2018. P. 457–459. doi: 10.23919/ICINS.2018.8405928
 11. Новожиллов О.П. Основы микропроцессорной техники в 2-х кн. М.: РадиоСофт, 2014. Кн.1. 431 с.
 12. Новожиллов О.П. Основы микропроцессорной техники в 2-х кн. М.: РадиоСофт, 2014. Кн.2. 333 с.
 13. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975. 768 с.
 14. Александров А.Г. Методы построения систем автоматического управления. М.: Физматлит, 2008. 230 с.
 15. Берендс Д.А., Кукулиев Р.М., Филиппов К.К. Приборы и системы автоматического управления с широтно-импульсной модуляцией. Л.: Машиностроение, 1982. 280 с.
 16. Степанов О.А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч.2. Введение в теорию фильтрации. СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. 428 с.
 8. Kalikhman D.M., Kalikhman L.Y., Nakhov S.F., Pozdnyakov V.M., Grebennikov V.I., Skorobogatov V.V., Deputatova E.A. Problems of development of modern units of electromechanical angular rate meters and quartz pendulum accelerometers for rocket and space industry. History and prospects. *Izvestiya Tula State University*, 2016, no. 10, pp. 311–325. (in Russian)
 9. Grebennikov V.I., Kalikhman L.Ya., Kalikhman D.M., Nakhov S.F., Skorobogatov V.V., Sapozhnikov A.I., Smirnov E.S. Vibrostability of the quartz pendulum accelerometer with digital feedback. *Proc. 22nd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS 2015)*, 2015, pp. 405–412.
 10. Grebennikov V.I., Kalikhman D.M., Kalikhman L.Ya., Nakhov S.F., Nikolaenko A.Yu., Skorobogatov V.V. Method to Increase Stability of the Scale Factor of a Precision Pendulum Accelerometer with Digital Feedback. *Proc. of 25th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, St. Petersburg (ICINS 2018)*, 2018, pp. 457–459. doi: 10.23919/ICINS.2018.8405928
 11. Novozhilov O.P. *Basics on microprocessor technology*. In 2 books. Moscow, RadioSoft, 2014, Book 1, 431 p. (in Russian)
 12. Novozhilov O.P. *Basics on microprocessor technology*. In 2 books. Moscow, RadioSoft, 2014, Book 2, 333 p. (in Russian)
 13. Besekersky V.A., Popov E.P. *Theory of automatic control systems*. Moscow, Nauka, 1975, 768 p. (in Russian)
 14. Alexandrov A.G. *Methods for constructing automatic control systems*. Moscow, Fizmatlit, 230 p. (in Russian)
 15. Berends D.A., Kukuliev R.M., Filippov K.K. *Devices and automatic control systems with pulse-width modulation*. Leningrad, Mashinostroenie, 1982, 280 p. (in Russian)
 16. Stepanov O.A. *Basics on the theory of assessment with applications to the tasks of processing navigation information. Part 2. Introduction to the theory of filtration*. St. Petersburg, State Research Center of the Russian Federation Concern CSRI Elektropribor, JSC, 2017, 428 p. (in Russian)

Авторы

Николаенко Артем Юрьевич — инженер-электроник, Филиал ФГУП «НПЦАП»-«ПО «Корпус», Саратов, 410019, Российская Федерация, Scopus ID: 56765597800, ORCID ID: 0000-0003-2181-8314, anikolaenosstu@gmail.com

Скоробогатов Вячеслав Владимирович — кандидат технических наук, ведущий инженер-электроник, Филиал ФГУП «НПЦАП»-«ПО «Корпус», Саратов, 410019, Российская Федерация, Scopus ID: 56395146100, ORCID ID: 0000-0001-9755-4066, vvskorobogatov@yandex.ru

Authors

Artem Yu. Nikolaenko — Electronics 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: 56765597800, ORCID ID: 0000-0003-2181-8314, anikolaenosstu@gmail.com

Vyacheslav V. Skorobogatov — PhD, Leading electronics 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: 56395146100, ORCID ID: 0000-0001-9755-4066, vvskorobogatov@yandex.ru