

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ Q-FLEX И Si-FLEX АКСЕЛЕРОМЕТРОВ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ВИБРАЦИИ

Ю.Ю. Колбас

А.В. Томилин

М.В. Ладонкина

tigra-e@rambler.ru

nilinot@mail.ru

actavia@mail.ru

АО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха», Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Приведены результаты экспериментальных исследований отечественных Q-flex (AK-18), Si-flex (A-18, A-18T) и зарубежных Q-flex (E1) акселерометров в условиях воздействия гармонической и случайной механической вибрации. Исследования показали, что отечественные акселерометры имеют большую устойчивость, но меньшую прочность по отношению к вибрации. Установлено, что полоса пропускания акселерометра не влияет на вибрационную погрешность, которая имеет максимумы в диапазоне значений частот 600...800 Гц и 1800...2000 Гц. Вибрационная погрешность возрастает при больших амплитудах вибрации. Преобразователь напряжение-код имеет погрешность на частоте преобразования, вызванную стробоскопическим эффектом. Сделан вывод, что использование большинства современных Q-flex и Si-flex акселерометров без амортизаторов затруднено

### Ключевые слова

*Акселерометр, смещение нуля, вибрационная погрешность*

Поступила в редакцию 14.10.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

---

**Введение.** В настоящее время «сухие» (незаполненные жидкостью) акселерометры широко применяют в бесплатформенных инерциальных навигационных системах (БИНС) летательных аппаратов различных видов [1, 2]. По сравнению с гириноинтеграторами и поплавковыми акселерометрами, «сухие» акселерометры не требуют термостатирования, имеют существенно меньшую массу [3] и стоимость. В то же время им присущи большие нестабильности и невоспроизводимости смещения нуля, а также большие вибрационные погрешности. Теория возникновения вибрационных погрешностей в «сухих» акселерометрах, а также экспериментальные результаты измерений вибрационных погрешностей существовавших в то время приборов приведены в работе [4]. Было установлено, что «сухие» акселерометры имеют вибрационную погрешность около  $60 \mu\text{g}/\text{g}^2$  при вибрации в диапазоне частот 300...1000 Гц, вызванную моментом трения в опорах, и примерно  $160 \mu\text{g}/\text{g}^2$  при вибрации в диапазоне частот 1500...2000 Гц, вызванную колебаниями, возникающими в газе между маятником и торцевыми поверхностями корпуса акселерометра [4].

За прошедшие 20 лет появилось несколько новых разработок «сухих» акселерометров, создатели которых утверждают, что в диапазоне частот вибраций 20...2000 Гц их вибрационная погрешность не превышает 25...100  $\mu\text{g}/\text{g}^2$  (табл. 1). Однако независимого исследования, подтверждающего заявленные параметры, не проводилось. Кроме того, важно знать вибрационную погрешность акселерометров не только при синусоидальной, но и при широкополосной случайной вибрации, которая наиболее часто присутствует на объектах, на которые установлены акселерометры. Интересна также прочность акселерометров, т. е. их способность восстанавливаться после воздействия больших уровней вибрации.

Таблица 1

### Заявленные значения технических характеристик современных акселерометров

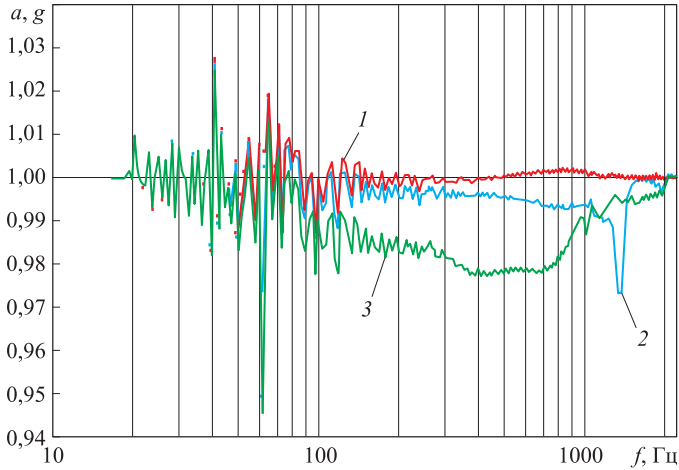
Характеристика	А-18 (ЗАО«ИТТ», Россия)	А-18Т (ЗАО «ИТТ», Россия)	АК-18 (АО «Серпуховский завод «Метал- лист», Россия)	E1 (Китай)
Невоспроизводимость масштабного коэффициента, отн. ед.	$15 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$15 \cdot 10^{-5}$	$15 \cdot 10^{-5}$
Невоспроизводимость смещения нуля, $\text{м}/\text{с}^2$	$20 \cdot 10^{-4}$	$12 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$
Изменение углов ориентации базовой плоскости, угл. с	$\pm 30$	$\pm 7$	$\pm 7$	$\pm 20$
Вибрационная погрешность, $\mu\text{g}/\text{g}^2$	30	25	25	100
Диапазон измеряемых ускорений, g	$\pm 40$	$\pm 35$	$\pm 35$	$\pm 50$
Полоса пропускания, Гц	250	200	270	700
Диапазон значений рабочей температуры, °С	-60...+80	-55...+75	-55...+85	-55...+85
Материал маятника	Кремний Si-flex	Кремний Si-flex	Кварц Q-flex	Кварц Q-flex

**Методика испытаний.** Сравнительные виброиспытания акселерометров А-18, А-18Т, АК-18, E1 проводились в целях определения значений вибрационной погрешности у разных типов акселерометров, а также вибрационной устойчивости и прочности акселерометров.

Акселерометры (по одному каждого типа, 3 шт.) были установлены на столе вибростенда так, чтобы их измерительные оси были направлены вертикально — действующее постоянное ускорение 1 g. Съем показаний осуществлялся сигма-дельта АЦП инерциального блока с частотой съема 1200 Гц. Полученные значения (от 5 до 6) усреднялись за 5 мс и передавались во внешнюю ЭВМ с частотой 200 Гц.

Вибрационная погрешность измерялась при двух видах воздействия: при синусоидальной вибрации амплитудой  $7 \pm 0,5$  g и медленно меняющейся частотой (частота увеличивалась в 2 раза за 60 с); при широкополосной случайной вибрации в диапазоне частот 20...2000 Гц различной амплитуды.

**Вибрационная погрешность акселерометров при синусоидальной вибрации.** Показания акселерометров первой тройки (АК-18, А-18, Е1) представлены на рис. 1. В первой декаде частот — до 100 Гц — показания всех акселерометров



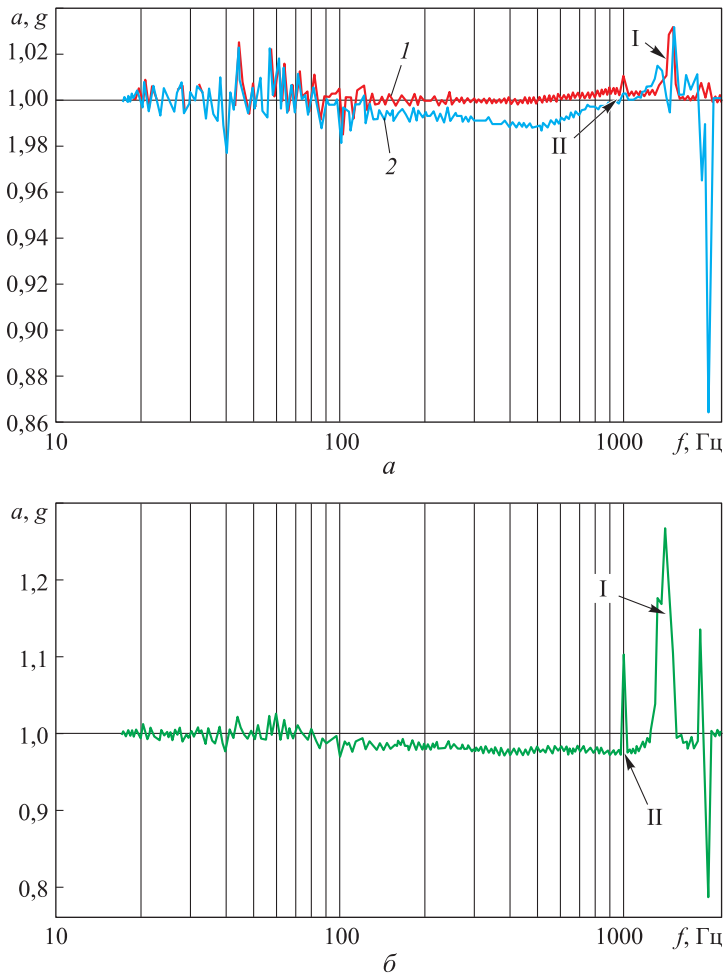
**Рис. 1.** Показания акселерометров АК-18 (1), А-8 (2) и Е1 (3) (осреднение 2,5 с, 500 точек)

идентичны, и наблюдаемые колебания связаны с изменением фазы виброускорения относительно выдачи информации с АЦП. Информации о вибрационной погрешности акселерометров они не несут. Во второй декаде частот виден сдвиг выходного сигнала всех трех акселерометров. Для акселерометра Е1 он составляет до 0,022 g, для акселерометра А-18 — 0,026 g, для акселерометра АК-18 — 0,002. Показания акселерометров второй тройки (АК-18, А-18Т, Е1) представлены на рис. 2.

Вибрационный стенд имеет резонанс на частоте 1000 Гц (синхронный сдвиг показаний всех акселерометров). Синхронная погрешность на частоте примерно 1300 Гц вызвана стробоскопическим эффектом АЦП (пауза в интегрировании показаний).

Испытания показали, что только акселерометр АК-18 устойчив к синусоидальным вибрациям в диапазоне частот 20...2000 Гц. У акселерометра А-18 наблюдается эффект, вызванный колебаниями, возникающими в газе между маятником и торцевыми поверхностями корпуса акселерометра на частотах 1700...1800 Гц [4], у акселерометров А-18Т и Е1 — на частотах 1800...2000 Гц.

За исключением области возникновения колебаний, максимальные значения вибрационных погрешностей следующие,  $\mu\text{g}/\text{g}^2$ :  $31 \pm 5$  для АК-18;  $143 \pm 21$  для А-18,  $224 \pm 34$  для А-18Т;  $408 \pm 61$  для Е1 (наихудший).



**Рис. 2.** Показания акселерометров АК-18 (1), А-18Т (2) (а) и Е1 (б) (осреднение 2,5 с, 500 точек):

I — стробоскопический эффект АЦП на частоте 1200 Гц; II — резонанс вибростенда (амплитуда вибрации выросла в 2,5 раза)

В области наличия колебаний максимальные значения вибрационных погрешностей следующие,  $\mu\text{g}/\text{g}^2$ :  $97 \pm 15$  для АК-18;  $510 \pm 77$  для А-18;  $2650 \pm 397$  для А-18Т;  $4286 \pm 643$  для Е1 (наихудший).

**Вибрационная погрешность акселерометров при широкополосной случайной вибрации.** Результаты испытаний акселерометров при воздействии широкополосной случайной вибрации (ШСВ) приведены в табл. 2. Отметим, что амплитудные значения ускорений достигают  $2,6\sigma$  ( $\sigma$  — среднее квадратичное значение ускорений ШСВ) и при превышении мгновенным значением ускорения диапазона измеряемых ускорений маятник акселерометра может коснуться упора, что существенно увеличит вибрационную погрешность.

Таблица 2

**Значения вибрационной погрешности различных акселерометров  $\Delta$ ,  $\mu\text{g}/\text{g}^2$ , при воздействии ШСВ в диапазоне значений частоты 20...2000 Гц**

Виды воздействий	$\sigma$ , g	AK-18	A-18	A-18T	E1
ШСВ1	7,39	23,5	-40,5	-	-116
ШСВ2	26	21,5	-	-5,7	83,8
ШСВ3	40,9	-6,5	14,9	-	58,4
ШСВ4	60,1	-84,2	Отказ	-	-27,8
Диапазон измеряемых ускорений, g	-	35	40	35	50

Вибрационная погрешность акселерометров при воздействии ШСВ оказалась существенно меньше максимальных значений вибрационных погрешностей при воздействии синусоидальной вибрации. При воздействии с амплитудами, не превышающими диапазон измеряемых ускорений, вибрационная погрешность соответствует погрешности, указываемой производителями акселерометров. Что касается прочности по отношению к ШСВ, отказ акселерометра произошел при превышении амплитудным значением ускорения в 3,9 раза заданного диапазона измеряемых ускорений, что свидетельствует о хорошем конструктивном запасе по прочности к перегрузкам современных акселерометров.

**Заключение.** Указываемое производителями значение вибрационной погрешности современных акселерометров относится к ШСВ. При воздействии синусоидальной вибрации на ряде частот вибрационная погрешность превышает указываемую производителем в 4–100 раз для разных типов акселерометров. Особенно опасным является диапазон значений частоты 1700...2000 Гц, в связи с чем применение всех типов акселерометров, кроме АК-18, без амортизаторов, не пропускающих вибрационные воздействия более 1500 Гц, является затруднительным. Вибрационная погрешность не зависит ни от материала маятника, ни от диапазона измеряемых ускорений, ни от полосы пропускания акселерометра. По сравнению с акселерометрами 20-летней давности заметное улучшение вибрационной устойчивости отмечено только у акселерометра АК-18.

Акселерометры обладают вибрационной прочностью к воздействиям, превышающим диапазон измеряемых ускорений не менее чем в 2,6 раза, что достаточно для всех известных применений данных приборов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Солунин В.Л., ред. Высокоточные системы управления и приводы для вооружения и военной техники. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 196 с.
2. Алешин Б.С., Веремеенко К.К., Черноморский А.И., ред. Ориентация и навигация подвижных объектов. М.: Физматлит, 2006. 424 с.
3. Распопов В.Я., Матвеев В.В. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. СПб.: ОАО «Концерн-ЦНИИ «Электроприбор», 2009. 278 с.

4. Коновалов С.Ф. Теория виброустойчивости акселерометров. М.: Машиностроение, 1991. 272 с.

**Колбас Юрий Юрьевич** — канд. техн. наук, начальник отдела АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха» (Российская Федерация, 117342, Москва, ул. Введенского, д. 3, корп. 1).

**Томилин Алексей Викторович** — инженер АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха» (Российская Федерация, 117342, Москва, ул. Введенского, д. 3, корп. 1).

**Ладонкина Мария Викторовна** — инженер АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха» (Российская Федерация, 117342, Москва, ул. Введенского, д. 3, корп. 1).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Колбас Ю.Ю., Томилин А.В., Ладонкина М.В. Экспериментальные исследования погрешностей Q-flex и Si-flex акселерометров при механической вибрации // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2017. № 3. С. 13–19.

DOI: 10.18698/0236-3933-2017-3-13-19

## EXPERIMENTAL ERROR STUDY OF Q-FLEX AND Si-FLEX ACCELEROMETERS IN CASE OF MECHANICAL VIBRATION

**Yu.Yu. Kolbas**

tigra-e@rambler.ru

**A.V. Tomilin**

nilinot@mail.ru

**M.V. Ladonkina**

actavia@mail.ru

**Stelmakh Scientific Research Institute Polyus, Moscow, Russian Federation**

### Abstract

The work gives the results of experimental studies of a number of domestic Q-flex (AK-18), Si-flex (A-18, A-18T) and foreign Q-flex (E1) accelerometers on exposure to harmonic and random mechanical vibrations. Findings of the research show that domestic accelerometers have higher resistibility, but lower vibration resistance. We found that the accelerometer bandwidth did not affect the vibration surface. The actual error of the accelerometer has a maximum in the frequency range of 600...800 Hz and 1800...2000 Hz. The vibration error increases at high amplitudes of vibration. The voltage-to-digit converter has the error at conversion frequency, caused by the stroboscopic effect. The results of our study bring us to the conclusion that currently it is difficult to use most Q-flex and the Si-flex accelerometers without shock absorbers

### Keywords

*Accelerometer, zero offset, vibration error*

## REFERENCES

[1] Solunin V.L., ed. Vysokotochnye sistemy upravleniya i privody dlya vooruzheniya i voennoy tekhniki [High-precision control systems and drives for armament and military hardware]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 1999. 196 p.

[2] Aleshin B.S., Veremeenko K.K., Chernomorskiy A.I., eds. *Orientatsiya i navigatsiya podvizhnykh ob"ektov* [Moving objects guidance and navigation]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006. 424 p.

[3] Raspopov V.Ya., Matveev V.V. *Osnovy postroeniya besplatformennykh inertsiyal'nykh navigatsionnykh system* [Fundamentals of strap down inertial navigation system engineering]. Saint-Petersburg, OAO "Kontsern-TsNII "Elektropribor" Publ., 2009. 278 p.

[4] Konovalov S.F. *Teoriya vibroustoychivosti akselerometrov* [Theory of accelerometer vibration resistance]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991. 272 p.

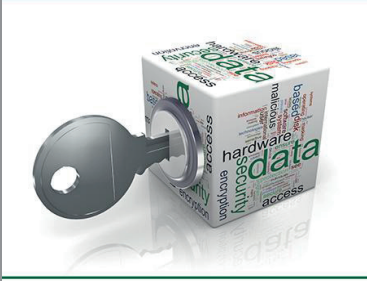
**Kolbas Yu.Yu.** — Cand. Sc. (Eng.), Head of Department of Stelmakh Scientific Research Institute Polyus (Vvedenskogo ul. 3, korpus 1, Moscow, 117342 Russian Federation).

**Tomilin A.V.** — engineer of Stelmakh Scientific Research Institute Polyus (Vvedenskogo ul. 3, korpus 1, Moscow, 117342 Russian Federation).

**Ladonkina M.V.** — engineer of Stelmakh Scientific Research Institute Polyus (Vvedenskogo ul. 3, korpus 1, Moscow, 117342 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Kolbas Yu.Yu., Tomilin A.V., Ladonkina M.V. Experimental Error Study of Q-Flex and Si-Flex Accelerometers in Case of Mechanical Vibration. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2017, no. 3, pp. 13–19. DOI: 10.18698/0236-3933-2017-3-13-19

<p>В.В. Бондарев <b>Введение в информационную безопасность автоматизированных систем</b></p>  <p>ИЗДАТЕЛЬСТВО МГТУ ИМ. Н.Э. БАУМАНА</p>	<p>В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана вышло в свет учебное пособие автора <b>В.В. Бондарева</b></p> <p><b>«Введение в информационную безопасность автоматизированных систем»</b></p> <p>Рассмотрена законодательная база информационной безопасности, приведен перечень возможных угроз, отражены основные подходы к созданию систем защиты информации, представлена классификация предупредительных мер, изучены вопросы, связанные с программно-аппаратными механизмами обеспечения информационной безопасности.</p> <p><b>По вопросам приобретения обращайтесь:</b> 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1 +7 (499) 263-60-45 press@bmstu.ru www.baumanpress.ru</p>
---	--