



УДК 681.2.084

DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.569.576

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ В СОСТАВЕ ДАТЧИКА МИКРОВИБРАЦИИ И СЕЙСМОКАРДИОБЛОКА

SOME FEATURES OF MICROMECHANICAL ACCELEROMETERS ERRORS IDENTIFICATION INSIDE MICROVIBRATION SENSOR AND CARDIOSEISMOMETER UNIT

СОЛДАТЕНКОВ ВИКТОР АКИНДИНОВИЧ¹
geo@elnet.msk.ru

ГРУЗЕВИЧ ЮРИЙ КИРИЛЛОВИЧ¹
yukg@mail.ru

АЧИЛЬДИЕВ ВЛАДИМИР МИХАЙЛОВИЧ¹
glmnems@geo-nv.com

ЕСАКОВ ВИТАЛИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ²
caf-sau@mgul.ac.ru

БЕДРО НИКОЛАЙ АНАТОЛЬЕВИЧ¹
job_nick@mail.ru

КОМАРОВА МАРИЯ НИКОЛАЕВНА¹
maria-komarova86@mail.ru

ЛЕВКОВИЧ АЛЕКСАНДР ДМИТРИЕВИЧ¹
levkaldm@gmail.com

¹ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ»
 107076, г. Москва, ул. Матrossкая Тишина, 23, стр. 2

²Митищинский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана
 141005, г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, 1

SOLDATENKOV VICTOR A.¹
geo@elnet.msk.ru

GRUZEVICH YURY K.¹
yukg@mail.ru

ACHILDIEV VLADIMIR M.¹
glmnems@geo-nv.com

ESAKOV VITALY A.²
caf-sau@mgul.ac.ru

BEDRO NIKOLAY A.¹
job_nick@mail.ru

KOMAROVA MARIYA N.¹
maria-komarova86@mail.ru

LEVKOVICH ALEXANDER D.
levkaldm@gmail.com

¹“Scientific Production Unity GEOPHIZIKA-NV” JSC
 bld. 2, 23 Matrosskaya Tishina St., Moscow, 107076

²Mytischi Branch of Bauman MSTU
 1 Ist Institutskaya St., Mytischi, 141005

Доклад посвящен особенностям идентификации погрешностей микромеханических акселерометров в составе датчика микровибрации и сейсмокардиоблока. Приведены результаты экспериментальных исследований и показаны достигнутые результаты.

Ключевые слова: микроЭлектромеханические датчики; микромеханический акселерометр; микромеханический гироскоп; сейсмокардиография; сейсмокардиоблок; датчик микровибрации.

The report is devoted to peculiarities of error identification of microelectromechanical accelerometers in the microvibration sensor and cardioseismometer unit. The experimental research data and achieved results have been provided.

Keywords: microelectromechanical sensors; micromechanical accelerometer; micromechanical gyroscope; seismocardiography; cardioseismometer unit; microvibration sensor.

Современный уровень производства микроэлектромеханических датчиков для инерциальных систем позволил начать разработку недорогих систем активной виброзоляции для различного оборудования, например интерферометров-анализаторов микросхем типа Polytec MSA-500 [1] и систем сейсмокардиографии для неинвазивной диагностики заболеваний внутренних органов методом информационного анализа кардиосигналов [2, 3]. К ним относится сейсмокардиоблок на основе микромеханических акселерометра и гироскопа [3]. Акселерометр, используемый в сейсмокардиоблоке, измеряет переменную

составляющую, соответствующую кардиоциклу в диапазоне частот от 0,1 Гц до 150 Гц, а для активной виброзоляции оборудования диапазон измерений составляет от 5 Гц до 200 Гц. Диагностирование производится в медицинских кабинетах, в которых присутствует весь спектр внешних вибрационных и акустических возмущений, связанных с работой вентиляции, оборудования и движущихся рядом со зданием транспортных средств и т. п. При этом спектр этих возмущений совпадает со спектром полезного сигнала. Возникает задача исключения влияния внешних микровибраций на работу сейсмокардиоблока.

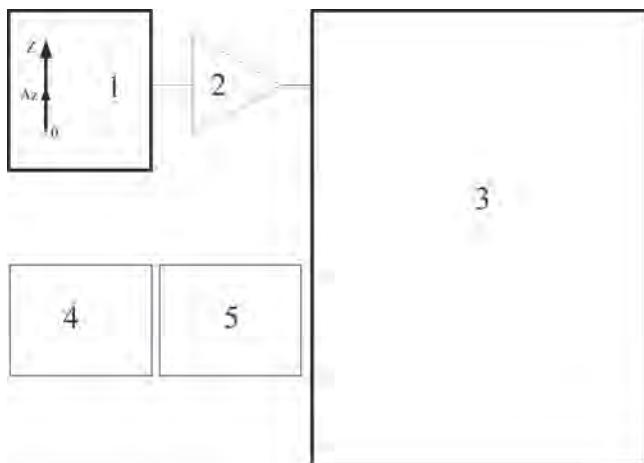


Рис. 1. Блок-схема датчика микровибрации с цифровым выходом на основе микромеханического акселерометра с аналоговым выходом: 1 — аналоговый микромеханический акселерометр; 2 — малошумящий операционный усилитель; 3 — микроконтроллер со встроенным аналого-цифровым преобразователем (АЦП) и поддержкой интерфейсов UART и JTAG; 4 — стабилизатор напряжения; 5 — вторичный источник питания

Fig. 1. The block diagram of the microvibration sensor with digital output based on MEMS analog accelerometer: 1 — analog MEMS accelerometer; 2 — low-noise operational amplifier; 3 — microcontroller with built-in analog-to-digital converter (ADC) and support for UART and JTAG interfaces; 4 — voltage regulator; 5 — secondary power supply

При использовании информации с сейсмокардиоблока необходимо корректно выделять из сигнала информационную составляющую кардиоцикла с минимальными погрешностями.

Шумовые составляющие в канале измерения микромеханического акселерометра (далее — MMA) оказывают существенное влияние на достоверность оценки измеренных параметров. При определении погрешностей MMA важной задачей является определение микровибраций в процессе работы.

Сложность измерения микровибрации заключается в том, что она, в общем случае, является величиной случайной и ее определение представляется сложной задачей.

Для устранения влияния вибрационных ускорений необходимо использование датчиков микровибрации.

The modern level of production of MEMS sensors for inertial systems has made it possible to begin developing inexpensive systems of active vibration isolation for various equipment, for example, interferometers-analyzers of microcircuits of Polytec MSA-500 type [1], and seismocardiography (SCG) systems for noninvasive diagnosis of internal diseases by the information analysis of seismocardiogram [2, 3]. These include the cardioseismometer unit based on a MEMS accelerometer and gyroscope [3]. The accelerometer used in the cardioseismometer unit measures the variable component corresponding to the cardiac cycle in the frequency

range from 0.1 Hz to 150 Hz, and for active vibration isolation of the equipment the measurement range is from 5 Hz to 200 Hz. Diagnosis has been made in medical offices, with a whole spectrum of external vibrational and acoustic disturbances associated with the operation of ventilation, equipment and vehicles moving alongside the building, etc. In this case, the spectrum of these perturbations coincides with the spectrum of the useful signal. There arises a problem of eliminating the effect of external microvibrations on the operation of the cardioseismometer unit.

When using information from the cardioseismometer unit, it is necessary to extract the

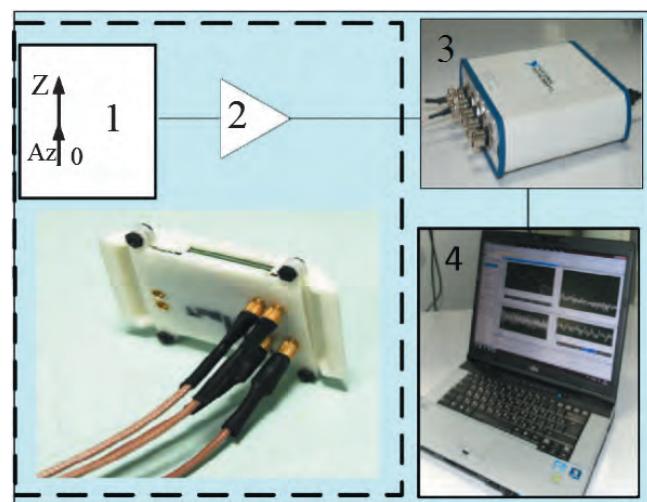


Рис. 2. Схема измерений микровибраций: 1 — микромеханический акселерометр; 2 — блок предварительных усилителей; 3 — плата сбора данных NI USB-4432; 4 — компьютер

Fig. 2. The scheme of measurement of microvibrations: 1 — MEMS accelerometer; 2 — preamplifier unit; 3 — National Instruments data acquisition board NI USB-4432; 4 — a laptop

Использование различных схемных и конструктивных решений и микропроцессорной техники делает возможным создание датчика микровибрации с высокими техническими характеристиками. На рис. 1 приведена блок-схема датчика микровибраций на основе MMA с цифровым выходом.

Для измерения микровибрации в помещении был разработан макет датчика микровибрации (далее — ДМВ) на основе MMA с аналоговым выходом VS1002 с диапазоном измерения ± 2 г и спектральной плотностью шума нулевого сигнала $7 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ [4]. Схема измерений приведена на рис. 2. В состав схемы измерений входили MMA с аналоговым выходом в составе ДМВ, плата сбора данных National Instruments NI USB-4432 и ноутбук.

Измерения проводились в составе анализатора микросхем MSA-500, установленного на массивное основание на полу. Дополнительно были приняты меры по уменьшению электромагнитных помех и улучшению звукоизоляции. Пол в лаборатории выполнен на основе стяжки из песка и цемента толщиной 150 мм с добавлением в определенной пропорции древесных опилок. По поверхности стяжки на битуме ложены листы

information component of the cardiac cycle from the signal with high accuracy. The noise components in the MEMS accelerometer measurement channel exert a significant influence on the reliability of the estimation of the measured parameters. In determining the errors of MEMS accelerometer, it is important to determine the microvibration during operation. It is difficult to eliminate the microvibration noise because it is a random variable. The solution to the problem may be the inclusion of a microvibration sensor in the cardioseismometer unit.

The use of various circuit and design solutions and microprocessor technology makes it possible



фанеры толщиной 20 мм и линолеум. Крепление ДМВ осуществлялось с помощью специальной мастики, а питание — от лабораторного источника питания GPS-3030D. Частота опроса составляла 1 кГц, время измерения в каждой точке — 120 секунд.

Для оценки погрешностей микроЭлектромеханических датчиков рекомендуется использовать метод вариации Аллана. В соответствии с методом вариации Аллана вычисляются дисперсии разницы соседних отклонений, а не самих отклонений центрированного случайного процесса [5] по формуле

$$\sigma_A^2(\tau) = \left(\sum_{k=1}^{N-1} (A_{k+1}^i - A_k^i)^2 \right) / (2(N-1)),$$

N — количество измерений, $N = \tau/T$, T — время опроса; A^i — значение выходного сигнала с осреднением на интервале τ ; τ — время осреднения; $\sigma_A^2(\tau)$ — дисперсия случайных микроускорений; i — оси ортогональной системы координат X, Y, Z.

Между дисперсией Аллана и спектральной плотностью шума существует связь, которую можно представить следующим соотношением:

$$\sigma_A^2(\tau) = 4 \int_0^\infty P(f) \frac{\sin^4(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2} df.$$

Источники ошибок в выходном сигнале ДМВ статистически независимы [5], поэтому для дисперсии Аллана можно записать следующее аппроксимирующее выражение:

$$\sigma_A^2(\tau) = R^2 \frac{\tau^2}{2} + K^2 \frac{\tau}{3} + B^2 \frac{2}{\pi} \ln 2 + N^2 \frac{1}{\tau} + Q^2 \frac{3}{\tau^2}.$$

Аппроксимация производится методом наименьших квадратов, значения коэффициентов R, K, B, N, Q характеризуют интенсивность отдельных шумовых составляющих выходного сигнала.

Таблица 1. Типы шумов выходного сигнала ДМВ

Table 1. Noise types of MVS

Тип шума Noise type	Лаборатория, чистая зона Laboratory, clean room	
	02,00–03,00	14,00–15,00
Белый шум выходного сигнала (шум квантования), $\text{м}/\text{с}^2$ White noise of the output signal (quantization noise), m/sec^2	$-1,9826 \cdot 10^{-4}$	$-1,3452 \cdot 10^{-3}$
Белый шум изменения выходного сигнала (случайное блуждание выходного сигнала), $\frac{\text{м}/\text{с}}{\sqrt{\text{ч}}}$ White noise of the output signal change (random walk of the output signal), $\frac{\text{m/sec}}{\sqrt{\text{hour}}}$	$2,9298 \cdot 10^{-3}$	$4,7241 \cdot 10^{-3}$
Фликкер-шум выходного сигнала (неустойчивость смещения нуля), $\frac{\text{м}/\text{с}}{\text{ч}}$ Flicker noise of the output signal (instability of null shift), $\frac{\text{m/sec}}{\sqrt{\text{hour}}}$	$6,3405 \cdot 10^{-5}$	$1,3383 \cdot 10^{-4}$
Белый шум скорости изменения выходного сигнала (случайное блуждание изменения выходного сигнала), $\frac{\text{м}/\text{с}^2}{\sqrt{\text{ч}}}$ White noise of the output signal change rate (random walk of the output signal change), $\frac{\text{m/sec}^2}{\sqrt{\text{hour}}}$	$-5,6304 \cdot 10^{-8}$	$-1,5224 \cdot 10^{-6}$
Шум ухода выходного сигнала (тренд выходного сигнала), $\frac{\text{м}/\text{с}^2}{\text{ч}}$ Noise of the output signal drift (output signal trend), $\frac{\text{m/sec}^2}{\sqrt{\text{hour}}}$	$2,0873 \cdot 10^{-10}$	$3,869 \cdot 10^{-9}$

График функции с полученными коэффициентами должен быть наиболее близок к графику экспериментальных данных.

Для ДМВ были проведены измерение, анализ выходного сигнала и определены параметры ошибок. Основные типы шумов для ДМВ представлены в табл. 1. Как видно из таблицы, все шумовые составляющие в ночное время значительно ниже, чем в дневное.

to create a microvibration sensor with high technical characteristics. Figure 1 shows a block diagram of the microvibration sensor based on a MEMS accelerometer with a digital output. However, the research has been carried out with a sample based on analog MEMS accelerometer.

For measuring the microvibration in the room, a sample of the microvibration sensor (MVS) based on the analog MEMS accelerometer VS1002 with a measurement range of ± 2 g and a noise spectral density of $7 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ has been developed [4].

The measurement scheme of the first research is shown in Fig. 2. The measurement

circuit included the analog MEMS accelerometer VS1002, the National Instruments data acquisition board NI USB-4432, and a laptop.

The measurements were carried out in the MSA-500 chip analyzer, mounted on a massive base on the floor. In addition, the measures were taken to reduce electromagnetic interference and improve sound insulation. The floor in the laboratory is made from a screed coat made of sand and cement 150 mm thick with the addition of wood chips in a certain proportion. On the surface of the screed coat, 20 mm thick plywood sheets and linoleum are laid on the bitumen. Mounting of the

microvibration sensor was carried out with the help of a special mastic, and a laboratory power source GPS-3030D provided the power supply. The sampling frequency was 1 kHz, the measurement time at each point was 120 seconds.

For estimation of the MEMS sensors errors, it is recommended to use the Allan variance method. Following the Allan variance method, the variances of the difference of the neighbouring deviations, but not the deviations of the centered random process [5], are calculated from the formula:

$$\sigma_A^2(\tau) = \left(\sum_{k=1}^{N-1} (A_{k+1}^i - A_k^i)^2 \right) / (2(N-1)),$$



Таблица 2. Математические ожидания и среднеквадратические отклонения виброускорения на интервале 1 сек. в контрольной точке стола
Table 2. Root-mean-square differences of the micromechanical accelerometer random error at launch

Марка акселерометра Accelerometer model	Акселерометр KXRB-2050 Accelerometer KXRB-2050		Акселерометр VS1002 Accelerometer VS1002	
	Без фильтра No filter	Фильтр с частотами среза $f_1 = 5$ Гц и $f_2 = 200$ Гц Butterworth filter with cutoff frequencies $f_1 = 5\text{Hz}$ and $f_2 = 200\text{Hz}$	Без фильтра No filter	Фильтр с частотами среза $f_1 = 5$ Гц и $f_2 = 200$ Гц Butterworth filter with cutoff frequencies $f_1 = 5\text{Hz}$ and $f_2 = 200\text{Hz}$
СКО Аллана (g) Allan RMS (g)	$3,639 \cdot 10^{-5}$	$1,667 \cdot 10^{-6}$	$8,0445 \cdot 10^{-6}$	$4,416 \cdot 10^{-7}$
СКО (g) RMS (g)	$8,967 \cdot 10^{-4}$	$8,381 \cdot 10^{-4}$	$3,732 \cdot 10^{-4}$	$4,416 \cdot 10^{-7}$

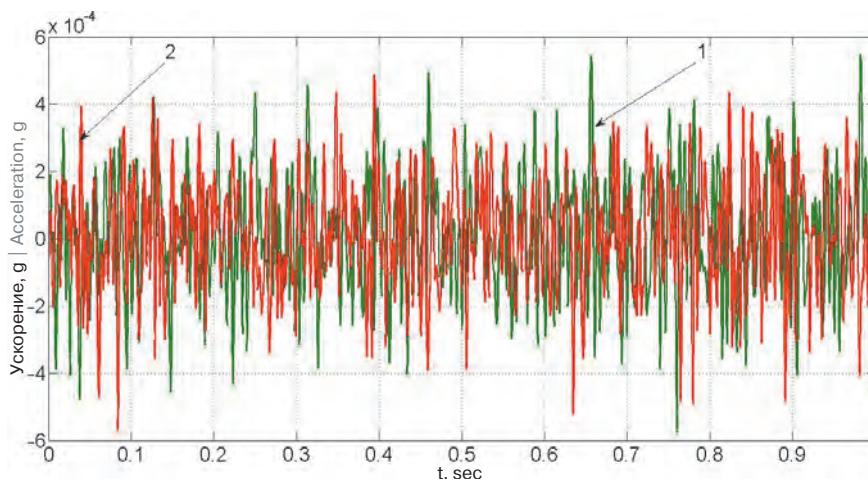


Рис. 3. Микроускорения по оси Z при включенной системе активной виброзащиты: 1 — измерения на столике [g], 2 — измерения на головке микроскопа [g]

Fig. 3. Acceleration on the Z axis with the active vibration isolation system on: 1 — measurements on the table [g]; 2 — measurements on the microscope head [g]

Шум квантования обуславливается АЦП ДМВ и легко может быть отфильтрован полосовым фильтром. Ошибки, связанные с эффектами квантования, не накапливаются с течением времени.

Тренд выходного сигнала представляет собой детерминированное отклонение показаний ДМВ на значительных промежутках времени. В подавляющем большинстве случаев такой шум обусловлен условиями среды [6].

where N is a number of measurement points, $N = \tau/T$, T — measuring time; A^i — the average of an output signal in the time period τ ; τ — averaging time; $\sigma_A^2(\tau)$ — Allan variance of random microvibration; i — axes of the orthogonal frame OXYZ.

There is a relationship between Allan's variance and the spectral noise density, which can be represented by the following relation:

$$\sigma_A^2(\tau) = 4 \int_0^\infty P(f) \frac{\sin^4(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2} df.$$

Sources of errors in the output signal of the MVS are statistically independent [5], so for the Allan variance one can write the following approximating expression:

$$\sigma_A^2(\tau) = R^2 \frac{\tau^2}{2} + K^2 \frac{\tau}{3} + B^2 \frac{2}{\pi} \ln 2 + N^2 \frac{1}{\tau} + Q^2 \frac{3}{\tau^2}.$$

The approximation is made following the method of least squares, the values of the coefficients R , K , B , N , Q characterize the intensity of the individual noise components of the output signal. The graph of the function with the coefficients obtained should be closest to the graph of the experimental data.

The measurement of MVS output signal has been carried out, and error parameters have been determined. The main types of the noise of the MVS output signal are presented in Table 1. As can be seen from the table, all noise components at night are much lower than in the daytime.

The quantization noise is caused by the ADC of the MVS and can easily be filtered by a bandpass filter. Errors associated with quantization effects do not accumulate over time.

The random walk of the output signal is the main noise component in the output data of MEMS sensors, it makes itself felt in the deviation of values from the measured randomly; also the average deviation increases with time.

Instability of null shift (flicker-noise) is noise that occurs in electronic components of the sensor, that are subject to a so-called random "flickering". Flicker noise has a significant impact on low frequencies [6].

The random walk of the output signal change is a random walk of the measured microacceleration. The noise is of unknown nature with a very long correlation time (the most significant effect is the temperature change during the experiment).

The changes in the output signal are a deterministic deviation of the MVS readings



Таблица 3. Резонансные частоты конструкции рабочего места
Table 3. Resonance frequencies of the workplace construction

Точка измерения Measuring point	Резонансные частоты, Гц Resonance frequencies, Hz
Поверхность пола Floor surface	—
Массивное основание Massive base	607; 1002
Установочная плита Mounting plate	571; 915
Система активной виброизоляции TS-300 System of active vibration isolation TS-300	258; 420
Столик с тремя степенями перемещения Table with three degrees of movement	281; 804

Перед началом работы были проведены измерения нулевого сигнала ДМВ на рабочем столе контрольной установки. Результаты измерений по оси Z приведены на рис. 3. По осям X и Y наблюдается та же картина.

Первоначально были исследованы случайные погрешности смещения нуля акселерометров в запуске ДМВ. Данные в течение 100 с записывались на рабочем столе лазерного интерферометра MSA-500 с пассивной и активной виброизоляцией в нулевом положении. По выходным данным в нулевом положении были построены вариации Аллана. Для ускорений по вертикальной оси были вычислены среднеквадратичные отклонения случайной погрешности в запуске и отклонения Аллана, которые приведены в табл. 2. Для большей убедительности были проведены измерения с другим ММА, имеющим меньшую погрешность измерения. Для каждого цикла измерений для устранения линейных ускорений полученные данные фильтровались полосовым фильтром с частотами среза $f_1 = 5$ Гц и $f_2 = 200$ Гц.

Как видно из табл. 2, без фильтра среднеквадратичное отклонение на интервале отличается от отклонения Аллана на этом же интервале. Аналогичная картина наблюдалась и по осям X, Y.

over significant time intervals. In the majority of cases, such noise is due to environmental conditions [6].

Before the beginning of the work, measurements of Allan's variance were made on the desktop of the control unit. The results of measurements along the Z-axis are shown in Fig. 3. The same pattern is observed for the X and Y axes.

Initially, random errors of null offset of the accelerometer at launch were investigated. Data for 100 s were recorded on the desktop of the laser interferometer MSA-500, with passive and active vibration isolation at null position. On the output in the null position, Allan deviations were constructed. For the acceleration along the vertical axis, the root-mean-square deviations of the null offset

random error at the start and the Allan deviations, which are given in Table 2, were calculated. For greater credibility, measurements were made with another micromechanical accelerometer having a smaller measurement error. For each measurement cycle to eliminate linear accelerations, the obtained data were filtered by a bandpass filter with cutoff frequencies $f_1 = 5$ Hz and $f_2 = 200$ Hz.

As can be seen from Table 2, without a filter, the standard deviation in the interval differs from Allan deviation in the same interval. A similar situation was observed for the X, Y axes.

The filtering of the data by a bandpass filter with cutoff frequencies $f_1 = 5$ Hz and $f_2 = 200$ Hz resulted in the coincidence of the biased and unbiased estimate of the

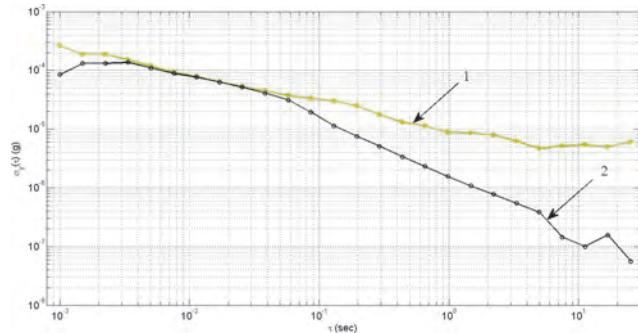


Рис. 4. Отклонения Аллана нулевого сигнала микромеханического акселерометра в диапазоне 0–1000 Гц (1) и в полосе частот 5–200 Гц (2)
Fig. 4. Allan deviations of the null signal of a micromechanical accelerometer in the range of 0–1000 Hz (1) and the frequency band of 5–200 Hz (2)

Фильтрация данных полосовым фильтром с частотами среза $f_1 = 5$ Гц и $f_2 = 200$ Гц привела к совпадению смещенной и несмещенной оценки среднеквадратичного отклонения для MMA VS1002. Это может говорить о том, что собственными шумами для MMA является среднеквадратичное отклонение при равенстве смещенной и несмещенной оценки. С другой стороны, этот результат говорит о том, что в диапазоне частот до 5 Гц присутствует значительный спектр внешних возмущений.

На рис. 4 приведены отклонения Аллана нулевого сигнала MMA в диапазоне (0–1000) Гц и в полосе частот (5–200) Гц.

Анализ отклонений Аллана показал, что спектральная плотность шума нулевого сигнала ДМВ на интервале 1 секунда составляет (5–7) μg , что существенно ниже измеренных значений. Это может говорить о том, что в помещении присутствуют микроускорения и на рис. 3 приведены измеренные значения ускорений, а не нулевой сигнал.

Для выяснения причин данного явления были измерены резонансные частоты стола, на котором был установлен ДМВ. Результаты измерения собственных частот конструкции рабочего места приведены в табл. 3.

Как видно из табл. 3, на полу лаборатории отсутствуют резонансные частоты, а в конструкции рабочего места отсутствуют резонансные частоты в диапазоне частот (5–200) Гц.

root-mean-square deviation for the VS1002 micromechanical accelerometer. This may indicate that the intrinsic noise for a micromechanical accelerometer is the root-mean-square deviation when the biased and non-biased estimate are equal. On the other hand, this result suggests that in the frequency range up to 5 Hz there is a significant spectrum of external disturbances.

Figure 4 shows the Allan deviations of the null signal of the micromechanical accelerometer in the range of 0–1000 Hz and the frequency band of 5–200 Hz.

Analysis of Allan's deviations have shown that the spectral density of null signal noise of the microvibration sensor in the 1-second interval is (5–7) μg , which is significantly lower than the measured values. That may

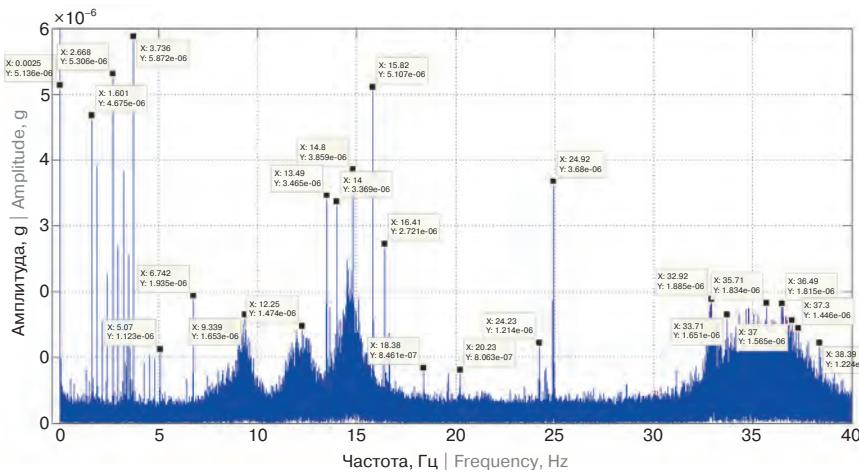


Рис. 5. Спектр ускорения в дневное время ДМВ
Fig. 5. MVS acceleration in the daytime spectrum

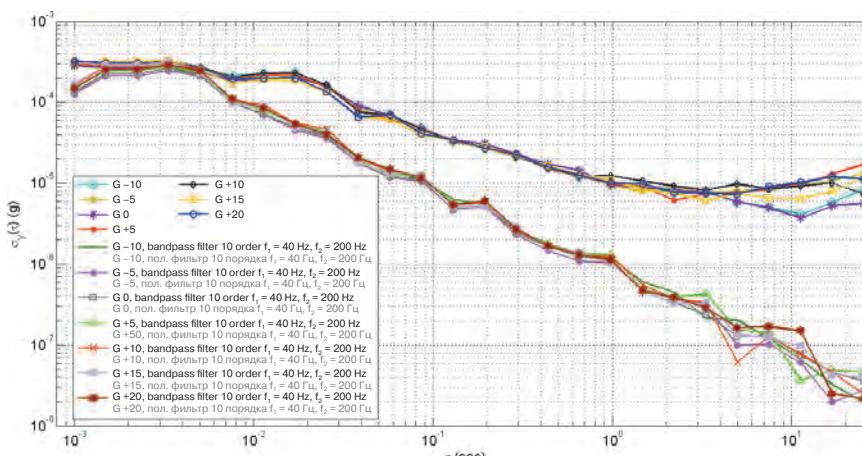


Рис. 6. Отклонения Аллана микроускорений ДМВ, измеренных в термокамере
Fig. 6. Allan deviations of MVS microaccelerations measured in a thermal chamber

be because there are microaccelerations in the room, and Fig. 3 shows the measured values of the accelerations and not the null signal.

To find out the reasons for this phenomenon, resonance frequencies of the table were measured, on which a microvibration sensor was mounted. The results of self-resonance frequencies measuring the workplace construction are shown in Table 3.

As can be seen from Table 3, there are no resonance frequencies on the laboratory floor, and in the design of the workplace, there are no resonant frequencies in the frequency range of 5–200 Hz.

To confirm the correctness of the results obtained, vibration velocity measurements were made by a vibration meter from Polytec GmbH PDV 100 and errors in the measurement of vibration velocities were estimated. As a result of measurements, it was found out

that the error in measuring the vibrational velocities at the averaging time of up to 1 sec for a microvibration sensor is approximately half that of the vibrometer, suggesting that the measured vibration velocities of the microvibration sensor are reliable.

To detect perturbations in the measurement process, registration and spectral analysis of null signals of the accelerometer of the MVS were performed during the day. Figure 5 shows the acceleration spectrum in the daytime at an interval of one hour from 2 pm to 3 pm.

As can be seen from Fig. 5, in the spectrum of the microvibration sensor signal in the frequency range up to 40 Hz, there are external actions in the ranges: 1–5 Hz, 7–9 Hz, 11–16 Hz and 32–37 Hz with amplitudes of $(1\text{--}6) \cdot 10^{-6}$ g.

As can be seen from the obtained results, the microvibration sensor measures the entire spectrum of acoustic, infrasonic and infra-low

For подтверждения корректности полученных результатов были проведены измерения виброскоростей виброметром фирмы Polytec GmbH PDV 100 и оценены погрешности измерения виброскоростей. В результате измерений выяснилось, что погрешность измерения вибрационных скоростей при времени осреднения до 1 сек. для ДМВ примерно в два раза меньше по сравнению с виброметром, что позволяет предполагать, что измеренные вибрационные скорости ДМВ являются достоверными.

Для выявления возмущений в процессе измерений была проведена регистрация и спектральный анализ нулевых сигналов акселерометра ДМВ в течение суток. На рис. 5 приведен спектр ускорения в дневное время на интервале одного часа с 14.00 ч. до 15.00 ч.

Как видно из рис. 5, в спектре сигнала ДМВ в диапазоне частот до 40 Гц присутствуют внешние воздействия в диапазонах (1–5) Гц, (7–9) Гц, (11–16) Гц и (32–37) Гц с амплитудами $(1\text{--}6) \cdot 10^{-6}$ г.

Как видно из полученных результатов, ДМВ измеряет весь спектр акустических, инфразвуковых и инфразвуковых частот. При этом собственные шумы находятся на уровне менее $(3\text{--}4) \cdot 10^{-6}$ г.

Основными источниками шумов и микровибраций являются компрессоры, вентиляция, транспортные средства, трубопроводы, работающие станки, оборудование. Производственные и транспортные шумы содержат инфразвуковые составляющие, которые не регистрируются обычными измерительными приборами, не слышимы

frequencies. In this case, the intrinsic noise is less than $(3\text{--}4) \cdot 10^{-6}$ g.

The primary sources of noise and micro-vibration are compressors, ventilation, vehicles, pipelines, working machines, equipment. Production and transport noises contain infrasound components that are not recorded by conventional measuring instruments, are not audible and have high sound pressure levels. In this case, the spectrum of the external frequencies 8–9 Hz, 11–13 Hz, 14–16 Hz and 32–37 Hz is close to the spectrum of the cardiac cycle.

An important error of the micromechanical accelerometer is the random error of the null offset at launch. One of the components of this error is thermal mechanical noise, which determines the minimum of error.

The self-resonance frequency of the micromechanical accelerometer suspension



и обладают высокими уровнями звукового давления. При этом спектр внешних частот (8–9) Гц, (11–13) Гц, (14–16) Гц и (32–37) Гц близок к спектру кардиоцикла.

Важной погрешностью MMA является случайная погрешность смещения нуля в запуске. Одной из составляющих этой погрешности является тепловой механический шум, который определяет минимум погрешности.

Собственная частота подвеса MMA зависит от массы инерционного элемента акселерометра и жесткости торсионов или консоли в зависимости от типа акселерометра. Добротность подвеса зависит существенно от вязкого трения материала торсионов и консоли и вязкого трения инерционной массы о газовую среду.

Для обеспечения минимального эквивалентного теплового шума MMA необходимо использовать материал с максимальной удельной плотностью, минимальным коэффициентом внутреннего вязкого трения и минимальной плотностью газовой среды и давления внутри прибора. Как правило, MMA имеет полосу пропускания 0–1 кГц, а добротность — близкую к 1.

Как известно, MMA кроме тепловых шумов обладают повышенной чувствительностью к средней температуре и к градиентам температуры в процессе работы. При этом возникает необходимость определения коэффициента чувствительности к температуре и тепловому шуму. Для этого были проведены испытания с ДМВ в термокамере. На рис. 6 представлены отклонения Аллана с фильтрацией и без фильтрации.

depends on the mass of the inertia element of the accelerometer and the rigidity of the torsion bars or console, depending on the type of accelerometer. The quality of the suspension depends significantly on the viscous friction of the torsion bars and console material and the viscous friction of the inertial mass against the gaseous medium.

To ensure the minimum equivalent thermal noise of a micromechanical accelerometer, it is necessary to use a material with the maximum specific density and the minimum coefficient of internal viscous friction and the minimum density of the gaseous medium and the pressure inside the device. As a rule, the micromechanical accelerometer has a bandwidth of 0–1 kHz, and the quality factor is close to 1.

As is known, micromechanical accelerometers, in addition to thermal noise, have

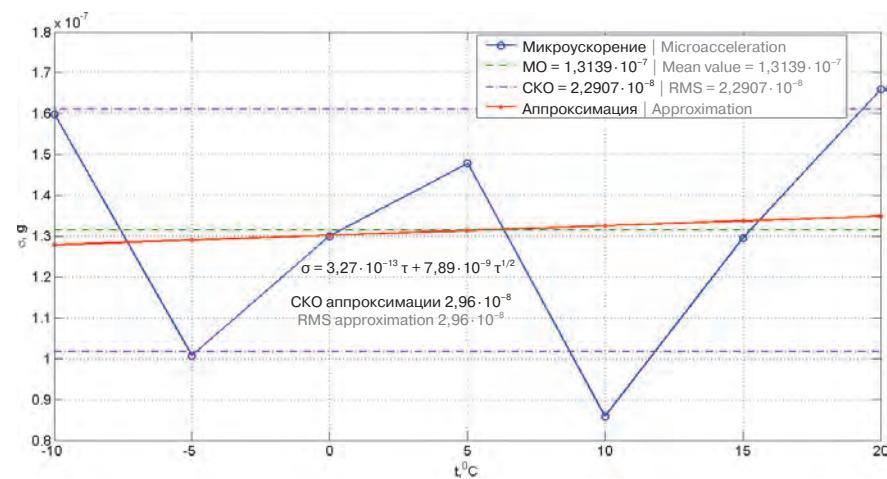


Рис. 7. Аппроксимация микроускорений

Fig. 7. Approximation of microacceleration

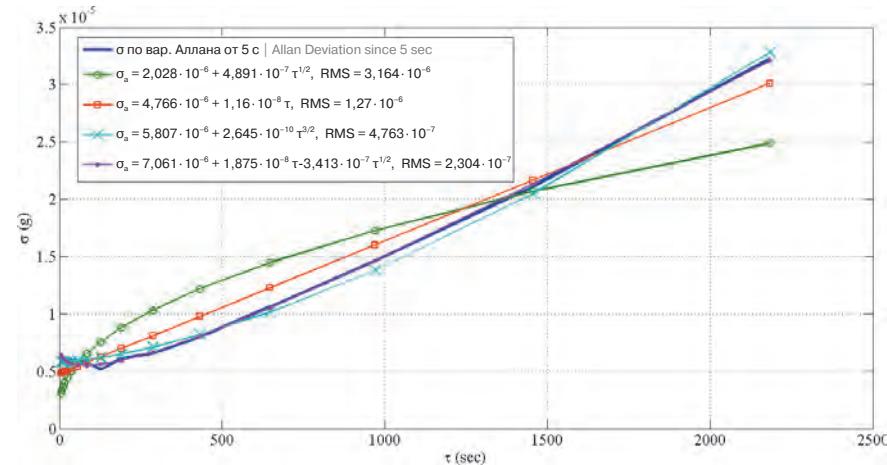


Рис. 8. Аппроксимация нулевого сигнала ДМВ по времени по данным, снятым во временном интервале 02.00 ч. — 05.00 ч.

Fig. 8. Approximation of the MVS null signal in time according to the data recorded in the time interval from 02.00 to 05.00 hours

an increased sensitivity to the average temperature and temperature gradients during operation. In this case, it becomes necessary to determine the coefficient of sensitivity to temperature and thermal noise. For this purpose, tests were carried out with MVS in a thermal chamber. Figure 6 shows the Allan deviations with and without filtration.

Based on the test results, calculations were carried out for the choice of approximation equations and calculation of approximation coefficients by the method of least squares. Based on the results of the experiments, the optimal approximation polynomial was determined (Fig. 7) with the smallest error, which has the form $\sigma = \sigma_0 T + \sigma_2 T^{1/2}$.

The mathematical expectation of microacceleration in the temperature range -10...20 °C was $1.3139 \cdot 10^{-7}$ g, and the RMS — $2.9704 \cdot 10^{-8}$ g, the mean-square error

of approximation was $2.96 \cdot 10^{-8}$ g, which is much lower than the error of the micro-mechanical accelerometer MVS ($5-7 \mu\text{g}$). This indicates that in the output signal of the microvibration sensor there are not only internal noises but also external micro-acceleration. At the same time, it should be noted that in algorithmic compensation it is necessary to determine the sensitivity coefficients to the temperature in proportion to the first degree and the square root of the temperature.

Figure 8 shows the results of approximating the null signal of MVS in time by the constant components of Allan deviations.

As can be seen in Fig. 8, the trend of the output signal is described by the expression: $\sigma = \sigma_0 + \sigma_1 \tau + \sigma_2 \tau^{1/2}$ with the smallest error.

Thus, when measuring microaccelerations in the angular mode, it is desirable to use



По результатам испытаний проводились расчеты по выбору уравнений аппроксимации и вычисление коэффициентов аппроксимации методом наименьших квадратов. По результатам экспериментов определился оптимальный полином аппроксимации (рис. 7) с наименьшей погрешностью, который имеет вид $\sigma = \sigma_0 T + \sigma_1 T^{1/2}$.

Математическое ожидание микроускорений в диапазоне температур ($-10\ldots20$)°C составило $1,3139 \cdot 10^{-7}$ g, а СКО — $2,9704 \cdot 10^{-8}$ g, среднеквадратическая погрешность аппроксимации составила $2,96 \cdot 10^{-8}$ g, что значительно ниже погрешности микромеханического акселерометра ДМВ ($5\ldots7$ µg). Это говорит о том, что в выходном сигнале ДМВ присутствуют не только внутренние шумы, но и внешние микроускорения. Одновременно следует отметить, что при алгоритмической компенсации необходимо определять коэффициенты чувствительности к температуре пропорционально первой степени и корню квадратному от температуры.

На рис. 8 приведены результаты аппроксимации нулевого сигнала ДМВ по времени по постоянным составляющим отклонений Аллана.

Как видно из рис. 8, с наименьшей погрешностью тренд выходного сигнала описывается выражением $\sigma = \sigma_0 + \sigma_1 t + \sigma_2 t^{1/2}$.

Таким образом, при измерении микроускорений в режиме углов желательно использовать алгоритмическую компенсацию по времени. При этом погрешность аппроксимации составляет $2,304 \cdot 10^{-7}$ g.

Авторы считают, что в данной работе новым является следующее:

- 1) измерение ДМВ всего спектра акустических, инфразвуковых и инфразвуковых частот;
- 2) для минимизации случайной погрешности смещения нуля необходима компенсация по температуре полиномом $\sigma = \sigma_0 T + \sigma_1 T^{1/2}$ и внешним воздействием;
- 3) в режиме углов для алгоритмической компенсации по времени необходимо использовать полином $\sigma = \sigma_0 + \sigma_1 t + \sigma_2 t^{1/2}$,

- 4) рекомендуется использование ДМВ в аппаратуре диагностики, включающей в себя сеймокардиоблок.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-29-02019.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грузевич Ю.К., Солдатенков В.А., Ачильдиев В.М., Левкович А.Д., Бедро Н.А., Комарова М.Н., Воронин И.В. Исследование уровней микровибраций в лазерном интерферометре с системой активной виброизоляции // Оптический журнал, 2018. — Т. 85. — № 5. — С. 68–84.
2. Успенский В. М. Информационная функция сердца. Теория и практика диагностики заболеваний внутренних органов методом информационного анализа электрокардиосигналов / В. Б. Симоненко. 2-е дополненное издание. — Москва: «ПЛАНЕТА», 2016. — 296 с.
3. Ачильдиев В. М., Басараб М.А., Бедро Н.А., Солдатенков В.А., Евсеева Ю.Н., Грузевич Ю.К., Коннова Н.С., Левкович А.Д. Сеймокардиоблок на основе микромеханических датчиков // Сборник трудов юбилейной XXV Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам, 2018. — С. 185–194.
4. VS1000 Vibration Sensor. <https://www.colibrys.com/product/vs1000-vibration-sensor> (дата обращения: 24.08.18).
5. Кутовой Д.А., Ситников П. В. Некоторые практические вопросы использования вариации Аллана при исследовании беспроводного инерциального блока // Навигация и управление движением. Материалы XV конференции молодых ученых, ЦНИИ «Электроприбор». — Санкт-Петербург, 2013. — С. 246–252.
6. Литвин М. А., Малюгина А. А., Миллер А. Б., Степанов А. Н., Чикрин Д. Е. Типы ошибок в инерциальных навигационных системах и методы их аппроксимации // Информационные процессы, 2014. — Т. 14. — № 4. — С. 326–339.

algorithmic compensation in time. In this case, the approximation error is $2,304 \cdot 10^{-7}$ g.

The authors consider the following results in this paper as novel:

1. A microvibration sensor measures the whole spectrum of acoustic, infrasonic and infra-low frequencies;
2. To minimize the random null bias error, temperature compensation by the polynomial $\sigma = \sigma_0 T + \sigma_1 T^{1/2}$ and external influences is necessary;
3. In the angular mode for algorithmic compensation through time, it is necessary to use the polynomial $\sigma = \sigma_0 + \sigma_1 t + \sigma_2 t^{1/2}$;
4. It is recommended to include a microvibration sensor in the diagnostic equipment where a seismocardiounit is used.

The reported study was funded by RFBR according to the research project №18-29-02019.

REFERENCES

1. Gruzevich Yu.K., Soldatenkov V.A., Achil'diev V.M., Levkovich A.D., Bedro N.A., Komarova M.N., Voronin I.V. Issledovanie urovnei mikrovibratsii v lazernom interferometre s sistemoi aktivnoi vibroizolyatsii // Opticheskii zhurnal, 2018. V. 85. № 5. P. 68–84. (In Russian).
2. Uspenskii V. M. Informatsionnaya funktsiya serdtsa. Teoriya i praktika diagnostiki zabolevanii vnutrennikh organov metodom informatsionnogo analiza elekrokardiosignalov / V.B. Simonenko. 2-e dopolnennoe izdanie. — Moskva: «PLANETA», 2016. 296 p. (In Russian).
3. Achil'diev V. M., Basarab M. A., Bedro N. A., Soldatenkov V. A., Evseeva Yu. N., Gruzevich Yu. K., Konnova N. S., Levkovich A. D. Seismokardioblok na osnove mikromekhanicheskikh datchikov // Sbornik trudov yubileinoi XXV Sankt-Peterburgskoi mezhdunarodnoi konferentsii po integrirovannym navigatsionnym sistemam, 2018. P. 185–194. (In Russian).
4. VS1000 Vibration Sensor. <https://www.colibrys.com/product/vs1000-vibration-sensor> (data obrashcheniya: 24.08.18).
5. Kutovoi D. A., Sitnikov P. V. Nekotorye prakticheskie voprosy ispol'zovaniya variatsii Allana pri issledovanii besplatnennogo inertsial'nogo bloka // Navigatsiya i upravlenie dvizheniem. Materialy XV konferentsii molodykh uchenykh, TsNII «Elektropribor». — Sankt-Peterburg, 2013. P. 246–252. (In Russian).
6. Litvin M. A., Malyugina A. A., Miller A. B., Stepanov A. N., Chikrin D. E. Tipy oshibok v inertsial'nykh navigatsionnykh sistemakh i metody ikh approksimatsii // Informatsionnye protsessy, 2014. V. 14. № 4. P. 326–339. (In Russian).