

## ДАТЧИК УГЛОВ И МИКРОВИБРАЦИЙ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ЗДАНИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ

М.Н. Комарова<sup>1</sup>, В.М. Ачильдиев<sup>1,3</sup>, Н.А. Бедро<sup>1</sup>,  
Ю.К. Грузевич<sup>1,2</sup>, В.Г. Дудко<sup>3</sup>, В.А. Есаков<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ОАО «НПО Геофизика-НВ», 107076, г. Москва, ул. Матросская Тишина, д. 23, стр. 2

<sup>2</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1

<sup>3</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

maria-komarova86@mail.ru

Рассмотрен датчик микровибраций с цифровым выходом на основе микромеханического акселерометра с аналоговым выходом. Выбраны оптимальные схемно-конструктивные решения датчика, разработаны алгоритмы обработки сигналов с микромеханического акселерометра и методики проведения измерений. Проведены исследования вибрационных возмущений в лаборатории для выявления влияния микровибрации на измерительное оборудование. Разработано программное обеспечение для визуализации полученных результатов. Полученные результаты проанализированы, определены шумовые составляющие в канале измерения. Охарактеризованы особенности идентификации погрешностей микромеханических акселерометров в составе датчика микровибрации. Для определения коэффициентов чувствительности к температуре и тепловому шуму были проведены температурные испытания. По результатам экспериментов определен оптимальный полином аппроксимации по температуре с наименьшей погрешностью. Для выявления возмущений в процессе измерений осуществлены регистрация и спектральный анализ нулевых сигналов акселерометра датчика углов и микровибраций в течение длительного периода времени. Также проведена аппроксимация по времени и определен оптимальный полином аппроксимации. Выполнен спектральный анализ нулевых сигналов акселерометров. Анализ амплитудно-частотных характеристик нулевых сигналов акселерометров показал, что основные возмущения находятся в диапазоне от 0 до 40 Гц. Установлено, что данный датчик обладает некоторыми преимуществами, по сравнению с аналогами: невысокой стоимостью элементной базы, простотой конструкции, универсальностью крепления. В связи с этим датчик углов и микровибраций может найти широкое применение в различных областях, в том числе при мониторинге уникальных зданий и строений, плотин, мостов, телескопов и других сооружений.

**Ключевые слова:** микромеханический акселерометр, датчик микровибрации, спектральный анализ

**Ссылка для цитирования:** Комарова М.Н., Ачильдиев В.М., Бедро Н.А., Грузевич Ю.К., Дудко В.Г., Есаков В.А. Датчик углов и микровибраций для мониторинга состояния зданий и оборудования // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 4. С. 128–137. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-4-128-137

Развитие различных отраслей приборостроения, в том числе медицинского, связаны с разработкой датчиков для измерения микровибрации, обладающих малыми массой и габаритами, низкими себестоимостью и энергопотреблением, достаточно высокой надежностью. В процессе технологических экспериментов выяснилось, что необходимо контролировать и микровибрации в диапазоне от единиц до нескольких сотен герц. Такие же задачи возникают и на земле при мониторинге уникальных зданий и строений, плотин, мостов, телескопов и др. [1, 2].

Область применения датчиков микровибраций (ДМВ) очень обширна. ДМВ предназначены для определения параметров гравитационного и волнового полей в скважинах, подземных выработках, на море, земной поверхности, при установке на неподвижных, летающих или движущихся объектах. Для изучения геологических объектов с помощью упругих волн наиболее широко используется сейсмоприемник для определения параметров гравитационного и волнового полей. В основе сейсмоприемника — электролитический

датчик, состоящий из корпуса и инерционной массы, проводящих электрический ток, с полостями, заполненными электролитом. Важным преимуществом ДМВ с электролитическим преобразователем является практически нулевая погрешность вследствие нелинейности выходного сигнала. Однако такой ДМВ имеет большие габаритно-массовые характеристики и долговременную погрешность нулевого сигнала, а высокочастотная область его применения ограничена 300 Гц.

Современные технологии требуют непрерывного контроля многих параметров технологического процесса и состояния оборудования [3]. Одними из важнейших являются параметры механического движения, в частности, параметры периодических перемещений исследуемого объекта в пространстве (углов и вибрации). К таким параметрам относятся вибрационное перемещение (амплитуда вибрации) и частота вибрации.

Другим возможным применением ДМВ является измерение микровибраций при одновременном измерении электрокардиограммы и (или) сейсмокардиограммы человека [4, 5]. В частно-

сти, при неинвазивной диагностике системами сейсмокардиографии заболеваний внутренних органов методом информационного анализа кардиосигналов в медицинских кабинетах присутствует весь спектр внешних вибрационных и акустических возмущений, связанных с работой вентиляции, оборудования и движущихся рядом со зданием транспортных средств, и т. п. Производственные и транспортные шумы содержат инфразвуковые составляющие, которые не регистрируются обычными измерительными приборами, не слышимы и обладают высокими уровнями звукового давления. При этом спектр частот сейсмокардиоцикла очень близок к спектру низкочастотного звукового давления и низкочастотных микровибраций.

При использовании сейсмокардиоблока для неинвазивной диагностики заболеваний внутренних органов в выходном сигнале акселерометра будут присутствовать составляющие линейного ускорения, в том числе и ускорения движения тела и дыхания, центростремительные ускорения и микроускорения от вибраций основания. Возникает задача исключения влияния внешних микровибраций на работу сейсмокардиоблока. Необходимо корректно выделять из сигнала информационную составляющую кардиоцикла с минимальными погрешностями. Наличие внешних микровибраций резко усложняет задачу измерений сейсмокардиоцикла и его выделение на фоне внешних возмущений. Для устранения влияния вибрационных ускорений рекомендуется использование ДМВ.

### Цель работы

Цель работы — оценить работу датчика микровибраций с цифровым выходом на основе микромеханического акселерометра с аналоговым выходом, выбрать оптимальные схемно-конструктивные решения, разработать алгоритмы обработки сигналов с микромеханического акселерометра и методики проведения измерений.

### Выбор конструктивных решений

Первой разработанной модификацией датчика микровибраций является датчик углов (наклономер) (рис. 1).

Для измерения микровибрации в помещении был разработан макет универсального датчика микровибраций с цифровым выходом на основе микромеханического акселерометра (ММА) с аналоговым выходом с диапазоном измерения ± 2 g и спектральной плотностью шума нулевого сигнала 7мкg/√Гц [6] (рис. 2).

**Методика определения погрешностей микромеханического акселерометра в составе датчика микровибрации.**

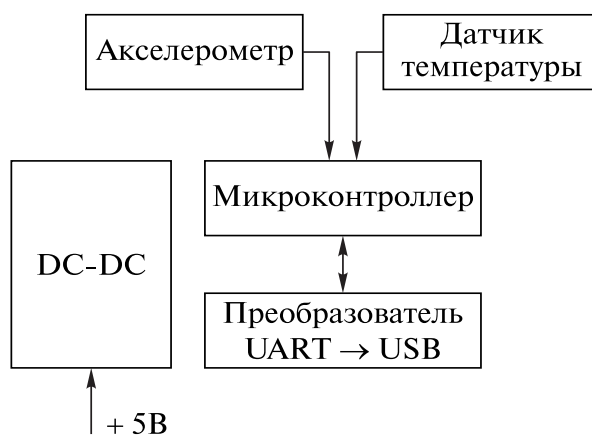


Рис. 1. Блок-схема датчика углов (наклономера двухосного)  
Fig. 1. The block diagram of the angle sensor (tiltmeter biaxial)

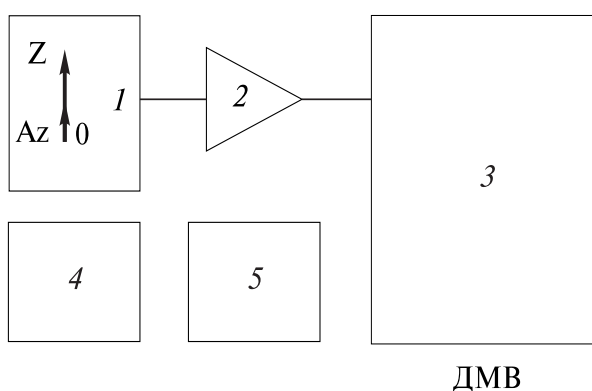


Рис. 2. Блок-схема датчика микровибрации с цифровым выходом: 1 — аналоговый микромеханический акселерометр; 2 — малошумящий операционный усилитель; 3 — микроконтроллер со встроенным аналого-цифровым преобразователем (АЦП) и поддержкой интерфейсов UART и JTAG; 4 — стабилизатор напряжения; 5 — вторичный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

Fig. 2. Block diagram of a microvibration sensor with digital output: 1 — analogue micromechanical 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 stabilizer; 5 — secondary power source

Для оценки погрешностей датчика углов и микровибраций использовался метод вариации Аллана, в соответствии с которым вычисляются дисперсии разницы соседних отклонений, а не самих отклонений центрированного случайного процесса [7, 8] по формуле

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

где  $N$  — количество измерений;  
 $A^i$  — значение выходного сигнала с осреднением на интервале  $\tau$ ;  
 $\tau$  — 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 соотношением

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

где  $P(f)$  — спектральная плотность шума сигнала  $f$ .

Источники ошибок в выходном сигнале ДМВ статистически независимы [8], поэтому для дисперсии Аллана можно записать аппроксимирующее выражение

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

где  $R$  — коэффициент, характеризующий тренд сигнала;

$K$  — коэффициент случайного блуждания изменения сигнала;

$B$  — коэффициент нестабильности смещения нуля выходного сигнала;

$N$  — коэффициент случайного блуждания выходного сигнала;

$Q$  — коэффициент шума квантования.

Аппроксимация производится методом наименьших квадратов. График функции с полученными коэффициентами должен быть наиболее близок к графику экспериментальных данных.

### Экспериментальные исследования

Измерения проводились в составе анализатора микросистем MSA-500 (рис. 3), установленного на массивное основание на полу [9]. 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 битум уложены листы фанеры толщиной 20 мм и линолеум.

При испытаниях с наклономером прибор фиксировался на установочной плите с помощью магнитов. Снималась часовая реализация с обработкой фильтром скользящего среднего со временем осреднения 200 с. По полученным данным вычислялось среднее квадратическое отклонение (СКО) по методу вариаций Аллана на интервале 1 с. Результаты также выводятся в окно рабочей программы. Как видно из рис. 4, СКО не превышает значения 1 угловой секунды.

Как видно из рис. 5, в процессе работы основание совершает угловые микроколебания в результате воздействия микровибраций, которые по оси  $X$  составили  $0,017^\circ$ , по оси  $Y$  —  $0,02^\circ$ . Это

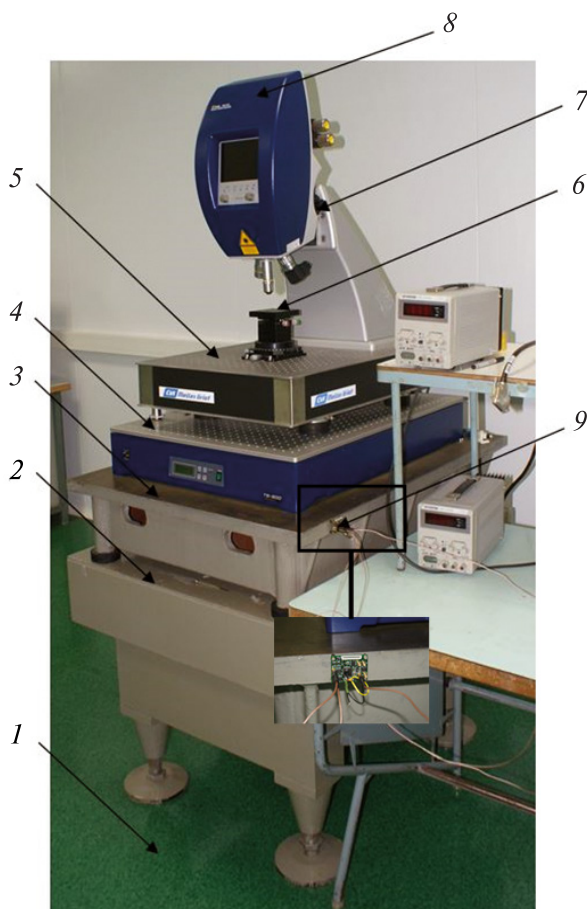


Рис. 3. Рабочее место анализатора микросистем MSA-500: 1 — внешняя поверхность пола; 2 — массивное основание; 3 — установочная плита; 4 — система активной виброизоляции TS-300; 5 — основание A-STD-BBO; 6 — стол с тремя степенями юстировки; 7 — крепление; 8 — измерительный микроскоп; 9 — датчик микровибрации

Fig. 3. The workplace of the microsystem analyzer MSA-500: 1 — the outer surface of the floor; 2 — massive base; 3 — mounting plate; 4 — active vibration isolation system TS-300; 5 — base A-STD-BBO; 6 — a table with three degrees of adjustment; 7 — mount; 8 — measuring microscope; 9 — microvibration sensor

могло произойти из-за изменения температуры и тепловых градиентов в помещении.

Для ДМВ с цифровым выходом были проведены измерения, анализ выходного сигнала и определены параметры ошибок [10]. При испытаниях ДМВ крепили с помощью винтов, питание обеспечивалось от лабораторного источника питания GPS-3030D. Частота опроса составляла 1 кГц, время измерения в каждой точке — 120 с. Испытания проводились в чистой зоне лаборатории по одному часу в дневное и ночное время.

Основные типы шумов для ДМВ без учета знака представлены в табл. 1. Как видно из табл. 1, все шумовые составляющие в ночное время значительно ниже, чем в дневное [8].

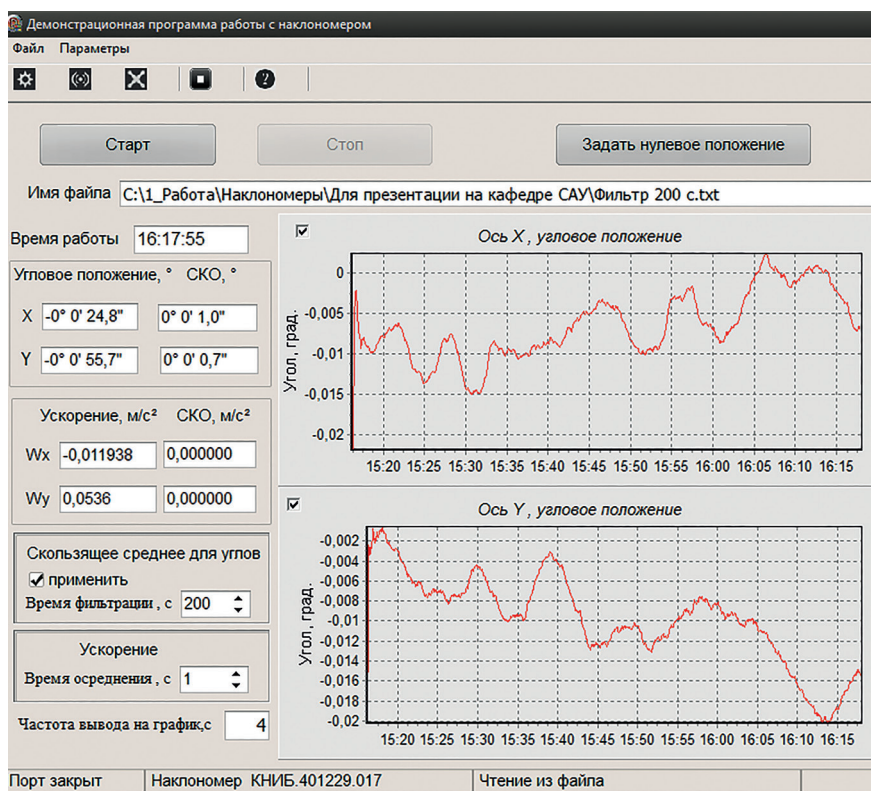


Рис. 4. Программа для измерения микроколебаний  
 Fig. 4. The program for measuring microoscillations

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

Случайное блуждание выходного сигнала — основная шумовая компонента в выходных данных микроэлектромеханических датчиков — проявляется в отклонении значений от измеренных случайным образом; при этом среднее отклонение растет с течением времени.

Нестабильность смещения нуля (фликер-шум) — шум, возникающий в электронных компонентах датчика, подверженных случайному так называемому мерцанию (flickering) — оказывает заметное влияние на низких частотах [7].

Случайное блуждание изменения выходного сигнала — случайное блуждание измеряемых ДМВ микроускорений — шум неизвестной природы с очень большим временем корреляции (наиболее существенное влияние оказывает изменение температуры в ходе эксперимента).

Тренд выходного сигнала представляет собой детерминированное отклонение показаний ДМВ на значительных промежутках времени. В подавляющем большинстве случаев такой шум обусловлен условиями среды [7].

Важная погрешность ММА — случайное смещение нуля в запуске. Одной из составляющих

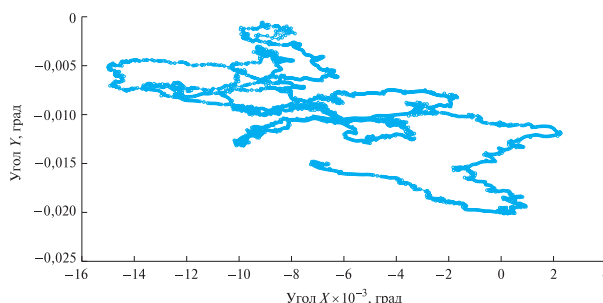
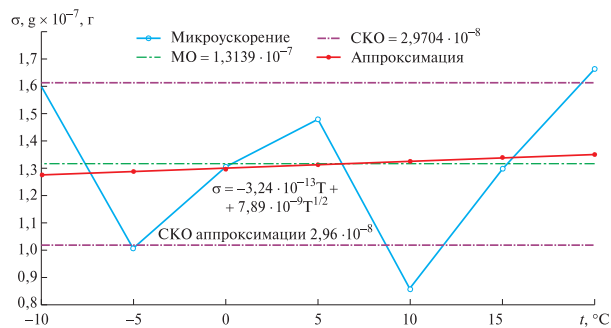


Рис. 5. Фазовый портрет микроколебаний датчика углов  
 Fig. 5. Phase portrait of micro-oscillations of the angle sensor

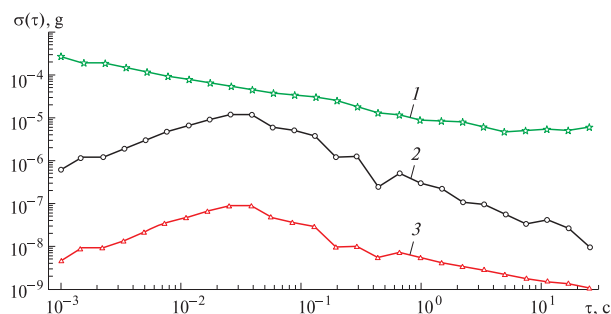
этой погрешности является тепловой механический шум, который определяет минимум погрешности. Кроме тепловых шумов ММА обладают повышенной чувствительностью к средней температуре и к градиентам температуры в процессе работы. При этом возникает необходимость определения коэффициента чувствительности к температуре и тепловому шуму. Для этого были проведены испытания с ДМВ в термокамере. По результатам экспериментов методом наименьших квадратов проведена аппроксимация по температуре. В результате расчетов был определен оптимальный полином аппроксимации от температуры с наименьшей погрешностью, который имеет вид (рис. 6) [11]

$$\sigma = \sigma_1 T + \sigma_2 T^{1/2}.$$



**Рис. 6.** Аппроксимация микроускорений: МО — математическое ожидание, СКО — среднеквадратическое отклонение

**Fig. 6.** Approximation of microaccelerations: MO — mathematical expectation, standard deviation — standard deviation



**Рис. 7.** Отклонения Аллана нулевого сигнала микромеханического акселерометра: 1 — столик с виброизоляцией без вентиляции; 2 — столик, полосовой фильтр 10 порядка 11–12 Гц; 3 — столик, полосовой фильтр 10 порядка 11–12 Гц + фильтр Баттерворта 2 порядка 1 Гц [12, 13]

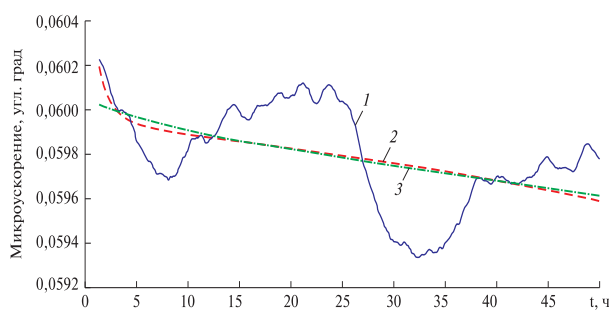
**Fig. 7.** Allan deviations of the zero signal of the micromechanical accelerometer: 1 — a table with vibration isolation without ventilation; 2 — table, band-pass filter 10 of the order of 11–12 Hz; 3 — table, band-pass filter 10 of the order of 11–12 Hz + Butterworth filter 2 of the order of 1 Hz [12, 13]

Как видно из рис. 7, случайная погрешность нулевого сигнала самого ММА в запуске при времени осреднении 1 с уменьшается примерно в 1000 раз с  $1 \cdot 10^{-5}$  g до  $5 \cdot 10^{-9}$  g, что соизмеримо с тепловыми шумами чувствительного элемента ММА.

Анализ отклонений Аллана показал, что спектральная плотность шума нулевого сигнала ДМВ на интервале 1 с составляет  $\approx 0,1$  мкг/√Гц, что существенно ниже измеренных значений микроускорений. Это может свидетельствовать о том, что в помещении присутствуют микроускорения.

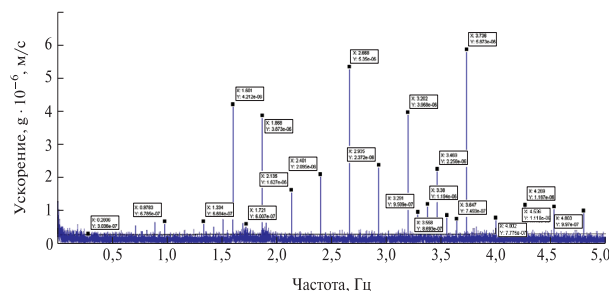
При испытании в лаборатории были измерены резонансные частоты стола, на котором установлен ДМВ. Определено, что на полу лаборатории отсутствуют резонансные частоты, а в конструкции рабочего места отсутствуют резонансные частоты в диапазоне 5...200 Гц.

Для подтверждения правильности полученных результатов проведены измерения виброскоростей виброметром фирмы Polytec GmbH PDV 100 и оце-



**Рис. 8.** Выходной сигнал с ДМВ (предварительное осреднение 25 с), обработанный фильтром скользящего среднего с окном 200 точек с аппроксимацией: 1 — микроускорение; 2 — аппроксимация полиномом вида  $a_{\text{анпр}} = a_0 + a_1t + a_2t^{1/2}$  (СКО аппроксимации  $1,982 \cdot 10^{-4}$  угл. град); 3 — аппроксимация полиномом  $a_{\text{анпр}} = a_0 + a_1t + a_2t^{-1} + a_3t^{1/2}$  (СКО аппроксимации  $1,972 \cdot 10^{-4}$  угл. град)

**Fig. 8.** The output signal from the UHF (preliminary averaging 25 s), processed by a moving average filter with a window of 200 points with approximation: 1 — microacceleration; 2 — approximation by a polynomial of the form  $a_{\text{анпр}} = a_0 + a_1t + a_2t^{1/2}$  (standard deviation approximation  $1,982 \cdot 10^{-4}$  angular degrees); 3 — approximation by polynomial  $a_{\text{анпр}} = a_0 + a_1t + a_2t^{-1} + a_3t^{1/2}$  (standard deviation approximation  $1,972 \cdot 10^{-4}$  angular degrees)



**Рис. 9.** Спектр ускорения в дневное время

**Fig. 9.** Daytime acceleration spectrum

нены погрешности их измерения. Выяснилось, что погрешность измерения вибрационных скоростей при времени осреднения до 1 с для ДМВ примерно в 2 раза меньше по сравнению с виброметром, что позволяет предполагать достоверность измеренных вибрационных скоростей ДМВ.

Для выявления возмущений в процессе измерений проведены регистрация и спектральный анализ нулевых сигналов акселерометра ДМВ в течение 2 сут., а также аппроксимация по времени, и определен оптимальный полином аппроксимации. Как видно из рис. 8, с наименьшей погрешностью тренд выходного сигнала описывает выражение

$$a_{\text{анпр}} = a_0 + a_1t + a_2t^{-1} + a_3t^{1/2}.$$

Таким образом, при измерении микроускорений в режиме углов желательно использовать алгоритмическую компенсацию тренда выходного сигнала по времени. При этом погрешность аппроксимации составляет  $0,71''$  на интервале времени 2 сут.

Т а б л и ц а 1

**Типы шумов выходного сигнала датчика микровибрации**  
**Microvibration Sensor Output Noise Types**

Тип шума	Коэффициент полинома	Интервал времени измерения, ч	
		02.00–03.00	14.00–15.00
Белый шум выходного сигнала (шум квантования), м/с	$Q$	$1,9826 \cdot 10^{-4}$	$1,3452 \cdot 10^{-3}$
Белый шум изменения выходного сигнала (случайное блуждание выходного сигнала), (м/с)/√с	$N$	$2,9298 \cdot 10^{-3}$	$4,7241 \cdot 10^{-3}$
Фликер-шум выходного сигнала (нестабильность смещения нуля), м/с <sup>2</sup>	$B$	$6,3405 \cdot 10^{-5}$	$1,3383 \cdot 10^{-4}$
Белый шум скорости изменения выходного сигнала (случайное блуждание изменения выходного сигнала), (м/с <sup>2</sup> )/√с	$K$	$5,6304 \cdot 10^{-8}$	$1,5224 \cdot 10^{-6}$
Шум ухода выходного сигнала (тренд выходного сигнала), м/с <sup>3</sup>	$R$	$2,0873 \cdot 10^{-10}$	$3,869 \cdot 10^{-9}$

Т а б л и ц а 2

**Технические характеристики датчиков измерения угла наклона и микровибраций**  
**Technical characteristics of tilt and microvibration sensors**

Параметр	Система мониторинга «Кипарис-2Н»	Датчик микровибраций с цифровым выходом	Наклономер для медицинских кроватей и хирургических столов	Наклономер двухосный
Диапазоны измерения углов по осям X и Y, град	–	±10	±70	±30
Диапазоны измерения ускорений по осям X и Y, g	–	±2	±1,7	±1,7
Погрешность измерения, угловые секунды	0,1	0,04*	1080	1
Габариты, мм	Крупногабаритный	38×28×1,5	Ø 49×25	Ø 50×16
Напряжения питания, В	DC 12 AC 220	5	7...15	5
Диапазон рабочих температур, °C	–30... +40	–40... +85	–10... +50	–40... +85
Интерфейс	–	USB	RS232	USB

\*По результатам измерения за 5 ч

Если рассмотреть ночной интервал времени 01.00–06.00, то можно заметить, что в выходном сигнале ДМВ присутствует значительно меньше внешних возмущений. При аппроксимации по времени вышеуказанным полиномом погрешность аппроксимации составит 0,04".

Как видно из рис. 9, в диапазоне частот до 5 Гц присутствует значительный спектр внешних возмущений. Уровень внутренних шумов акселерометра составляет  $\approx 4 \cdot 10^{-7}g$ . Выделенные частоты без «белого» шума представлены на рис. 10.

В табл. 2 приведено сравнение датчиков измерения угла наклона и микровибраций [14–19], а на рис. 11 их внешний вид.

Как видно из табл. 2, датчик микровибраций с цифровым выходом по сравнению с другими датчиками обладает преимуществами: габаритами, низкой погрешностью измерения, достаточно широким диапазоном рабочих температур. Кроме того, зарубежные аналоги по-

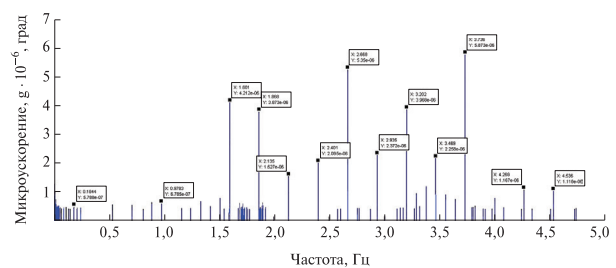
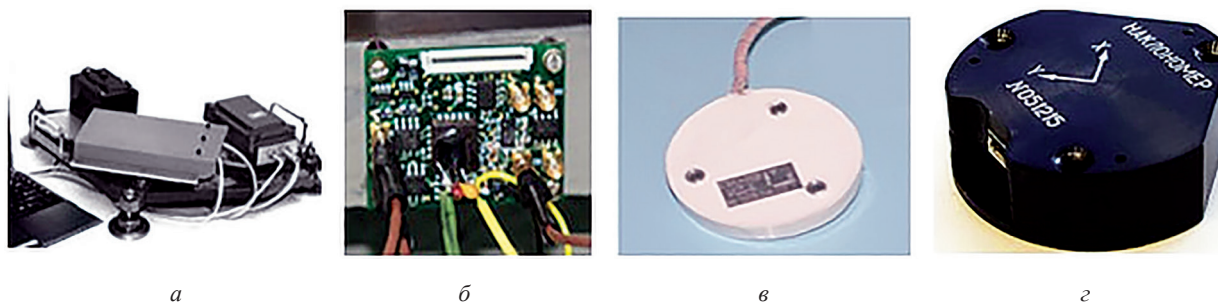


Рис. 10. Спектр ускорения в дневное время 14.00–15.00 до 5 Гц с вычетом порогового значения  $4 \cdot 10^{-7}g$

Fig. 10. Спектр ускорения в дневное время 14.00–15.00 до 5 Гц с вычетом порогового значения  $4 \cdot 10^{-7}g$

добных датчиков имеют достаточно высокую стоимость.

В связи с изложенным выше, датчик углов и микровибраций может найти широкое применение в различных производственных, статистических и научных областях.



**Рис. 11.** Внешний вид датчиков измерения угла наклона и микровибраций: *а* — система мониторинга «Кипарис-2Н»; *б* — датчик микровибраций с цифровым выходом; *в* — наклономер для медицинских кроватей и хирургических столов; *г* — наклономер двухосный

**Fig. 11.** Technical characteristics of tilt and microvibration sensors: *a* — Kiparis-2N monitoring system; *b* — micro-vibration sensor with digital output; *v* — tilt meter for medical beds and surgical tables; *z* — biaxial tilt meter

### Выводы и рекомендации

Система мониторинга на основе ДМВ позволит провести оценку состояния сооружений и оборудования. Контроль при этом можно осуществлять непрерывно, а информацию передавать по автономному каналу. Кроме того, рекомендуется включение ДМВ в аппаратуру медицинской диагностики и различное производственное оборудование.

Датчик микровибраций измеряет весь спектр акустических, инфразвуковых и инфранизких частот. Для минимизации случайной погрешности смещения нуля необходима компенсация по температуре полиномом  $\sigma = \sigma_1 T + \sigma_2 T^{1/2}$  и внешним воздействиям. В режиме углов для алгоритмической компенсации по времени необходимо использовать полином  $a = a_0 + a_1 T + a_2 T^{-1} + a_3 T^{1/2}$ .

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

### Список литературы

[1] ГОСТ Р 52892–2007. Вибрация и удар. Вибрация зданий. Измерение вибрации и оценка ее воздействия на конструкцию. Введ. 01.10.2008. М.: Стандартинформ, 2008. 16 с.

[2] ГОСТ Р 53964–2010. Вибрация. Измерения вибраций сооружений. Руководство по проведению измерений. Введ. 30.11.2011. М.: Стандартинформ, 2011. 12 с.

[3] Защита от повышенного шума и вибрации: сб. докл. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Санкт-Петербург, 18–20 марта 2015 г. / под ред. Н.И. Иванова. СПб.: Балтийский государственный технический университет «Военмех», 2015. 689 с.

[4] Ачильдиев В.М., Басараб М.А., Бедро Н.А., Солдатенков В.А. Сейсмокардиоблок на основе микромеханических датчиков // Сб. тр. юбил. XXV Санкт-Петербургской Междунар. конф. по интегрированным навигационным системам, Санкт-Петербург, ЦНИИ «Электроприбор», 28–30 мая 2018 г. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2018. С. 185–194.

[5] Levkovich A., Achildiev V., Soldatenkov V., Basarab M., Bedro N., Gruzevich Yu., Evseeva Yu., Konnova N., Komarova M. Seismocardiography system based on micro-mechanical sensors // Proc. IERI International Conference on Medical Physics, Medical Engineering and Informatics. Basic Clin Pharmacol Toxicol. Denmark: Wiley, 2018, t. 123, pp. 9–10.

[6] VS1000 Vibration Sensor. URL: <https://www.colibrys.com/product/vs1000-vibration-sensor/> (дата обращения 24.08.2019).

[7] Кутовой Д.А., Ситников П.В. Некоторые практические вопросы использования вариации Аллана при исследовании бесплатформенного инерциального блока // XV конф. молодых ученых «Навигация и управление движением», Санкт-Петербург, ЦНИИ «Электроприбор», 12–15 марта 2013 г. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2013. С. 246–252.

[8] 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.

[9] Грузевич Ю.К., Солдатенков В.А., Ачильдиев В.М., Левкович А.Д., Бедро А.Н., 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.

[10] Ачильдиев В.М., Грузевич Ю.К., Солдатенков В.А. Информационные измерительные и оптико-электронные системы на основе микро- и наномеханических датчиков угловой скорости и линейного ускорения. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 260 с.

[11] Солдатенков В.А., Грузевич Ю.К., Ачильдиев В.М., Есаков В.А., Бедро Н.А., Комарова М.Н., Левкович А.Д. Некоторые особенности идентификации погрешностей микромеханических акселерометров в составе датчика микровибрации и сейсмокардиоблока // Сб. тез. Междунар. форума «Микроэлектроника-2018» 4-й Междунар. науч. конф. «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули», Республика Крым, г. Алушта, 01–06 октября 2018 г. М.: Техносфера, 2018. С. 517–520.

[12] Fundamental package for scientific computing with Python. URL: <http://www.numpy.org> (дата обращения 24.08.2019).

[13] Python 2D plotting library. URL: <https://www.matplotlib.org> (дата обращения 24.08.2019).

[14] ООО «Центр диагностики состояния сооружений». URL: <http://www.creativeinstitute.ru/system.htm> (дата обращения 24.08.2019).

- [15] Солдатенков В.А., Грузевич Ю.К., Ачильдиев В.М., Левкович А.Д., Комарова М.Н., Зорин А.П. Наклономер. Патент РФ на полезную модель №146949; заявители и патентообладатели ОАО «НПО Геофизика-НВ»; заявл. 02.07.2014, опубл. 20.10.2014. Бюл. № 29. 11 с.
- [16] Калинкина М.Е., Козлов А.С., Лабковская Р.Я., Пирожникова О.И., Ткалич В.Л. Расчет угловой жесткости упругого элемента микромеханического акселерометра // ИВУЗ Приборостроение, 2019. Т. 62. № 6. С. 534–541.
- [17] Солдатенков В.А., Грузевич Ю.К., Ачильдиев В.М., Солдатенкова Ю.В., Бабаева Н.И., Бедро Н.А., Воронин И.В., Грызлова Л.В. Измеритель угловой скорости. Патент РФ на полезную модель RU 162343 U1, 10.06.2016. Заявка № 2016101651/28 от 20.01.2016.
- [18] Солдатенков В.А., Грузевич Ю.К., Ачильдиев В.М., Евсеева Ю.Н. Датчик углов на основе микромеханического бесплатформенного инерциального блока // Сб. матер. XXII Санкт-Петербургской междунар. конф. по интегрированным навигационным системам, Санкт-Петербург, 12–17 сентября 2019 г. / под ред. В.Г. Пешехонова. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2015. С. 364–367.
- [19] Солдатенков В.А., Грузевич Ю.К., Ачильдиев В.М., Комарова М.Н., Бедро Н.А., Левкович А.Д., Грузевич Ю.К. Датчик углов и микровибраций для контроля состояния сооружений // XXVI Санкт-Петербургская междунар. конф. по интегрированным навигационным системам, Санкт-Петербург, 27–29 мая 2019 г. С-Пб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2019. С. 237–240.

## Сведения об авторах

**Комарова Мария Николаевна** — ведущий инженер ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ», maria-komarova86@mail.ru

**Ачильдиев Владимир Михайлович** — канд. техн. наук, гл. конструктор МНЭМС, ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ», glmnems@geo-nv.com

**Бедро Николай Анатольевич** — зам. гл. конструктора МНЭМС, начальник отдела, ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ», job\_nick@mail.ru

**Грузевич Юрий Кириллович** — канд. техн. наук, зам. генерального директора по науке, ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ», yukg@mail.ru

**Дудко Владимир Григорьевич** — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), saf-sau@mgul.ac.ru

**Есаков Виталий Анатольевич** — канд. техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), академик Российской академии космонавтики, saf-sau@mgul.ac.ru

Поступила в редакцию 29.01.2020.

Принята к публикации 03.03.2020.



## TILT AND MICROVIBRATIONS SENSOR FOR MONITORING BUILDINGS CONDITION AND EQUIPMENT

M.N. Komarova<sup>1</sup>, V.M. Achildiev<sup>1,3</sup>, N.A. Bedro<sup>1</sup>,  
Y.K. Gruzevich<sup>1,2</sup>, V.G. Dudko<sup>3</sup>, V.A. Esakov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Scientific Production Unity «GEOPHIZIKA-NV», St. Company, 23, bld. 2, Matrosskaya Tishina st., 107076, Moscow

<sup>2</sup>BMSTU, 5, 2nd Baumanskaya st., 105005, Moscow, Russia

<sup>3</sup>BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

maria-komarova86@mail.ru

In the report, the sensor of micro-vibrations with digital output on the basis of micromechanical accelerometer with analog output is considered. The optimum scheme and constructive solution of the sensor the algorithms for processing signals from a MEMS accelerometer and measurement methods are selected. Vibration perturbation studies were conducted in the laboratory to identify the effect of micro-vibration on the measuring equipment. The software for visualization of the received results is developed. The obtained results were analyzed and noise components in the measurement channel were determined. Features of identification of errors of micromechanical accelerometers as a part of the micro-vibration sensor are considered. Temperature tests and approximation of the obtained data were carried out to determine the temperature and thermal noise sensitivity coefficients, according of the experiments results, the optimal temperature approximation polynomial with the minimal error was determined. Registration and spectral analysis of zero accelerometer signals of the angles and micro-vibrations sensor during a long time was carried out to detect disturbances in the measurement process. The time approximation was also carried out and the optimal polynomial of the approximation was determined. The spectral analysis of accelerometers zero signals was carried out. Analysis of the amplitude-frequency characteristics of the accelerometers zero signals showed that the main perturbations are in the range up to 40 Hz. This sensor has several advantages in comparison with analogues: low cost of circuitry, simplicity of design and versatility of attachment. In this regard, the angles and micro-vibrations sensor should be widely used in various fields, when monitoring unique buildings and structures, dams, bridges, telescopes of other structures. This research work was supported by the Russian Fund of Fundamental Researches of the Russian Academy of Sciences (Grants No. 18-29-02019 mk).

**Keywords:** micromechanical accelerometer, micro-vibration sensor, spectral analysis

**Suggested citation:** Komarova M.N., Achildiev V.M., Bedro N.A., Gruzevich Y.K., Dudko V.G., Esakov V.A. *Datchik uglov i mikrovibratsiy dlya monitoringa sostoyaniya zdaniy i oborudovaniya* [Tilt and microvibrations sensor for monitoring buildings condition and equipment]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 4, pp. 128–137. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-4-128-137

### References

- [1] GOST R 52892-2007. *Vibratsiya i udar. Vibratsiya zdaniy. Izmereniye vibratsii i otsenka yeye vozdeystviya na konstruktsiyu* [State Standart 52892-2007. Vibration and shock. Vibration of buildings. Measurement of vibration and evaluation of its impact on the structure]. Moscow, Standardinform, 2008, 16 p.
- [2] GOST R 53964-2010. *Vibratsiya. Izmereniya vibratsiy sooruzheniy. Rukovodstvo po provedeniyu izmereniy* [State Standart 53964-2010. Vibration. Measurement of vibration structures. Guide to measurement]. Moscow, Standardinform, 2011, 12 p.
- [3] *Zashchita ot povyshennogo shuma i vibratsii* [Protection against increased noise and vibration]. Collection of reports of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation, March 18–20, St. Petersburg: Baltic State Technical University Voenmekh, 2015, 689 p.
- [4] Achildiev V.M., Basarab M.A., Bedro N.A., Soldatenkov V.A. *Seysmokardioblok na osnove mikromekhanicheskikh datchikov* [Cardioseismometer unit based on micromechanical sensors]. 25th Anniversary Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, St. Petersburg Central Research Institute Elektropribor, May 28-30, 2018. S.-Pb. Central Research Institute Elektropribor, 2018, pp. 185–194.
- [5] Levkovich A., Achildiev V., Soldatenkov V., Basarab M., Bedro N., Gruzevich Yu., Evseeva Yu., Konnova N., Komarova M. *Seismocardiography system based on micromechanical sensors* [Seismocardiography system based on micromechanical sensors]. Proc. IERI International Conference on Medical Physics, Medical Engineering and Informatics. Basic Clin Pharmacol Toxicol. Denmark: Wiley, 2018, t. 123, pp. 9–10.
- [6] VS1000 Vibration Sensor. Available at: <https://www.colibrys.com/product/vs1000-vibration-sensor/>. (accessed 24.08.2019).
- [7] Kutovoy D.A., Sitnikov P.V. *Nekotoryye prakticheskiye voprosy ispol'zovaniya variatsii Allana pri issledovanii besplatformennogo inertsiyal'nogo bloka* [Some practical issues of using Allan's variation in the study of the strapdown inertial unit]. *Navigatsiya i upravleniye dvizheniyem* [XV Conference of Young Scientists «Navigation and Traffic Control»], St. Petersburg, Central Research Institute Elektropribor, March 12–15, 2013. S.-Pb. Central Research Institute Elektropribor, 2013, pp. 246–252.
- [8] Litvin M.A., Malyugina A.A., Miller A.B., Stepanov A.N., Chikrin D.E. *Tipy oshibok v inertsiyal'nykh navigatsionnykh sistemakh i metody ikh approksimatsii* [Types of errors in inertial navigation systems and methods for their approximation]. *Informatsionnye protsessy* [Information processes], v. 14, no. 4, 2014, pp. 326–339.
- [9] Gruzevich Yu.K., Soldatenkov V.A., Achil'diev V.M., Levkovich A.D., Bedro A.N., Komarova M.N., Voronin I.V. *Issledovanie urovney mikrovibratsiy v lazernom interferometre s sistemoy aktivnoy vibroizolyatsii* [Investigation of Microvibration Levels in a Laser Interferometer with an Active Vibration Isolation System]. *Opticheskiy zhurnal* [Optical Journal], 2018, v. 85, no. 5, pp. 68–84.

- [10] Achil'diev V.M., Gruzevich Yu.K., Soldatenkov V.A. *Informatsionnye izmeritel'nye i optiko-elektronnye sistemy na osnove mikro- i nanomekhanicheskikh datchikov uglovoy skorosti i lineynogo uskoreniya* [Information measuring and opto-electronic systems based on micro- and nanomechanical sensors of angular velocity and linear acceleration]. Moscow: Publishing MSTU. N.E. Bauman, 2016, 260 p.
- [11] Soldatenkov V. A., Gruzevich Yu. K., Achil'diev V. M., Esakov V.A., Bedro N.A., Komarova M.N., Levkovich A.D. *Nekotoryye osobennosti identifikatsii pogreshnostey mikromekhanicheskikh akselerometrov v sostave datchika mikroviibratsii i seysmokardiobloka* [Some features of micromechanical accelerometers errors identification inside the microvibration sensor and cardioseismometer unit]. Sbornik tezisev Mezhdunarodnogo foruma «Mikroelektronika–2018» 4 Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Elektronnaya komponentnaya baza i mikroelektronnye moduli» [Collection of abstracts of the International Forum «Microelectronics–2018» of the 4th International Scientific Conference «Electronic Component Base and Microelectronic Modules»] Moscow: Tekhnosfera [Technosphere], 2018, pp. 517–520.
- [12] Fundamental package for scientific computing with Python. Available at: <http://www.numpy.org>. (accessed 24.08.2019).
- [13] Python 2D plotting library. Available at: <https://www.matplotlib.org>. (accessed 24.08.2019).
- [14] *Tsentr diagnostiki sostoyaniya sooruzheniy* [Center for diagnostics of construction of structures]. Available at: <http://www.creativeinstitute.ru/system.htm>. (accessed 24.08.2019).
- [15] Soldatenkov V.A., Gruzevich Yu.K., Achil'diev V.M., Levkovich A.D., Komarova M.N., Zorin A.P. *Naklonomer* [Tiltmeter]. Patent RF no. 146949, 2014.
- [16] Kalinkina M.E., Kozlov A.S., Labkovskaya R.Ya., Pirozhnikova O.I., Tklich V.L. *Raschet uglovy zhestkosti uprugogo elementa mikromekhanicheskogo akselerometra* [Calculation of the angular stiffness of the elastic element of a micromechanical accelerometer]. *IVUZ Priborostroenie* [IVUZ Instrument Engineering], 2019, v. 62, no. 6, pp. 534–541.
- [17] Soldatenkov V.A., Gruzevich Yu.K., Achil'diev V.M., Soldatenkova Yu.V., Babaeva N.I., Bedro N.A., Voronin I.V., Gryzlova L.V. *Izmeritel' uglovy skorosti* [Angular velocity meter]. Utility Model Patent RU 162343 U1, 06/10/2016. Application No. 2016101651/28 of 01.20.2016.
- [18] Soldatenkov V.A., Gruzevich Yu.K., Achil'diev V.M., Evseeva Yu.N. *Datchik uglov na osnove mikromekhanicheskogo besplatformennogo inertsiyal'nogo bloka* [Angle sensor based on a micromechanical strapdown inertial block]. Sbornik materialov XXII Sankt-Peterburgskoy mezhdunarodnoy konferentsii po integrirovannym navigatsionnym sistemam [Proceedings of the XXII St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems]. Ed. V.G. Peshekhonova, September 12–17, 2019, St. Petersburg, Central Research Institute «Elektropribor». St. Petersburg: Central Research Institute Electropribor, 2015, pp. 364–367.
- [19] Soldatenkov V.A., Gruzevich Yu.K., Achil'diev V.M., Komarova M.N., Bedro N.A., Levkovich A.D., Gruzevich Yu.K. *Datchik uglov i mikroviibratsiy dlya kontrolya sostoyaniya sooruzheniy* [Angle and microvibration sensor for monitoring the condition of structures]. XXVI Sankt-Peterburgskaya mezhdunarodnaya konferentsiya po integrirovannym navigatsionnym sistemam [XXVI St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems], St. Petersburg, Central Research Institute Electropribor, May 27–29, 2019 St. Petersburg: Central Research Institute Elektropribor, 2019, pp. 237–240.

## Authors' information

**Komarova Mariya Nikolaevna** — Chief Engineer of the «Scientific Production Unity GEOPHIZIKA-NV» Stock Company, [maria-komarova86@mail.ru](mailto:maria-komarova86@mail.ru)

**Achil'diev Vladimir Mikhailovich** — Cand. Sci. (Tech.), Chief Designer of MNEMS of the «Scientific Production Unity GEOPHIZIKA-NV» Stock Company, [glmerns@geo-nv.com](mailto:glmerns@geo-nv.com)

**Bedro Nikolay Anatol'evich** — Deputy Chief Designer of MNEMS, head of department of the «Scientific Production Unity GEOPHIZIKA-NV» Stock Company, [job\\_nick@mail.ru](mailto:job_nick@mail.ru)

**Gruzevich Yuriy Kirillovich** — Cand. Sci. (Tech.), Deputy General Director for science of the «Scientific Production Unity GEOPHIZIKA-NV» Stock Company, [yukg@mail.ru](mailto:yukg@mail.ru)

**Dudko Vladimir Grigor'evich** — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), [caf-sau@mgul.ac.ru](mailto:caf-sau@mgul.ac.ru)

**Esakov Vitaliy Anatol'evich** — Cand. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), Academician of the Russian Academy of Cosmonautics

Received 29.01.2020.

Accepted for publication 03.03.2020.