

9. *Пшихонов В.Х.* Организация репеллеров при движении мобильных роботов в среде с препятствиями // «Мехатроника, автоматизация, управление». – 2008. – № 2. – С. 34-41.
10. *Слюсарев Р. В., Крухмалев В.А.* Автономный мобильный робот «Скиф-3» // Известия ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск «Перспективные системы и задачи управления». – 2008.
11. *Camera Calibration Toolbox for Matlab* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/htmls/example.html](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/htmls/example.html). Дата обращения 8.03.2010.
12. *Потанов М. К.* О приближении непериодических функций алгебраическими полиномами // Вестник Моск. ун-та, сер. 1, матем., мех. – 1960. – № 4. – С. 14-25.
13. *Форсайт Д., Понс. Ж.* Компьютерное зрение. Современный подход.: Пер. с англ. – М.: Изд. Дом «Вильямс», 2004. – 926 с.
14. *Siciliano B., Khatib O.* Springer handbook of robotics. - Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. – 1603 p.
15. SWD Software Ltd. | Некоммерческие образовательные проекты [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.swd.ru/index.php3?pid=187>. Дата обращения 8.03.2010.
16. LIVE555 Streaming Media [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.live555.com/liveMedia/>. Дата обращения 8.03.2010.

**Ахмед Саад Али**

Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.  
E-mail: ahmedsaad01@yahoo.com.  
347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.  
Тел.: 88634371694.

**Федоренко Роман Викторович**

E-mail: frontwise@gmail.ru.

**Крухмалев Виктор Александрович**

E-mail: phoenixdoc@rambler.ru.

**Ahmed Saad Ali**

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.  
E-mail: ahmedsaad01@yahoo.com.  
44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.  
Phone: 88634371694.

**Fedorenko Roman Viktorovich**

E-mail: frontwise@gmail.ru.

**Krukhmalev Victor Aleksandrovich**

E-mail: phoenixdoc@rambler.ru.

УДК 681.511.4

**В.М. Полушкин**

**СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВИБРОУСТОЙЧИВОСТИ  
МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

*Рассмотрены вопросы статистической оценки виброустойчивости микромеханических преобразователей линейного ускорения (микромеханических акселерометров) для высокоточных систем управления, позволяющей наиболее полно определить их функциональные возможности в условиях воздействия различных вибрационных нагрузок. Приведены результаты экспериментальных исследований микромеханических акселерометров.*

*Микросистемная техника; преобразователи линейного ускорения (микромеханические акселерометры); виброустойчивость; статистическая оценка.*

V.M. Polushkin

**STATISTICAL ASSESSMENT OF VIBRATION RESISTANCE  
OF MICROMECHANIC ACCELEROMETRES FOR HIGH PRECISION  
GUIDANCE SYSTEMS**

*Problems of a statistical assessment of vibration resistance of micromechanic transducers of the linear acceleration are considered, allowing the fullest to determine their functionality in the conditions of effect of various vibration loads. Outcomes of experimental researches of micromechanic accelerometers are resulted.*

*Microsystemic technique; linear acceleration transducers (micromechanic accelerometers); vibration resistance; a statistical assessment.*

**Введение.** Микромеханические преобразователи линейного ускорения (ММПЛУ) являются одним из наиболее развивающихся в стране и за рубежом видов изделий микросистемной техники. В силу их функционального назначения они находят широкое применение в системах позиционирования, наведения управляемых боеприпасов, тактических ракет и др. В соответствии с условиями их применения одним из важнейших для потребителей показателей МПЛУ является их устойчивость к внешним воздействующим факторам.

**Постановка задачи.** В соответствии с [1] к изделиям предъявляются требования по виброустойчивости, это понятие является составной частью понятия вибростойкости, которое, в свою очередь, включает вибропрочность. Важно различать эти понятия. Так, например, в [2] говорится "... Недостатком известных методов построения МЭМС-структур является сравнительно невысокая виброустойчивость, связанная с низкими прочностными характеристиками выводных проводников, ...", в действительности же с прочностными характеристиками связана вибропрочность, а не виброустойчивость.

При испытаниях на виброустойчивость [1] изделие должно находиться под электрической нагрузкой, а при испытаниях на вибропрочность – без нее. Воздействие вибрации должно происходить поочередно по трем взаимно перпендикулярным осям. Однако, если известна ось, наиболее критичная к воздействию вибрации для испытываемого изделия, то контроль проводится только по ней. Для проверки виброустойчивости следует выбрать параметры-критерии годности, по изменению которых можно будет судить о виброустойчивости изделия в целом (например, нелинейность выходной характеристики).

Проверка виброустойчивости в рамках частотного диапазона МПЛУ вызывает у разработчиков этих изделий пока непреодолимые трудности. Следует учесть, во-первых, что эти изделия являются измерителями линейного ускорения, а при воздействии вибрации на их вход дополнительно к полезному (измеряемому) сигналу поступает сигнал, соответствующий ускорению вибрации, а, кроме того, имеет место чисто механическое воздействие на чувствительный элемент изделия. Во-вторых, само проведение анализа выходного сигнала с целью оценки реакции изделия на воздействие требует достаточно серьезных научных исследований.

Из-за сложности решения вопросов контроля устойчивости МПЛУ к воздействию механических факторов разработчики этих изделий, как правило, оценивают их стойкость только по прочности, избегая при испытаниях наиболее опасное направление воздействия, каковым для них является направление вдоль оси чувствительности. В случае, когда контроль устойчивости изделия к воздействию все же проводится, то по результатам его не представляется возможным оценить способности изделия выполнять свои функции в этих условиях.

Анализ методик проведения контроля виброустойчивости МПЛУ ведущими предприятиями-разработчиками показал, что они или отсутствуют вовсе или являются недостаточными [3, 4, 5, 6].

**Статистическая оценка виброустойчивости.** Для оценки результатов измерений и испытаний чаще всего используется так называемый минимаксный подход. Сущность его заключается в том, что из всего множества полученных данных выбирают наибольшие отрицательное и положительное значения, складывают по модулю и делят пополам. Такой подход гарантирует в самом худшем случае, вне зависимости от действительной частоты появления его максимальных значений, наименьшее значение риска, чем любой другой подход [7].

Указанный минимаксный подход имеет недостатки, приведенные в приложении метрологического стандарта ГОСТ 8.009-79 [8]:

- ◆ огрубляет точностные возможности оцениваемого изделия при сравнительно большой выборке (более 100);
- ◆ научно обоснованное суммирование составляющих погрешности может быть только арифметическим;
- ◆ предельные характеристики не обладают свойством, необходимым для нормированных характеристик, так как составляющие погрешности изделия в соответствии с [8] должны оцениваться как случайные величины "в форме, пригодной для статистического объединения".

Исходя из этого в метрологических стандартах стал регламентироваться статистических подход к оценке точности изделия. При этом в нормативно-технической документации (ТУ) на изделия нормируются либо функции или плотности распределения вероятностей систематической и случайной составляющих погрешности изделия, либо основные параметры этих распределений:

- ◆ математическое ожидание ( $m$ );
- ◆ среднее квадратическое отклонение ( $\sigma$ ).

Как известно, лишь закон распределения вероятностей (ЗРВ) случайной величины является ее полной исчерпывающей характеристикой [9].

Поэтому для оценки функциональных возможностей МПЛУ принята в настоящей работе статистическая оценка.

На основе существующей задачи предложен алгоритм статистической оценки виброустойчивости (рис. 1).

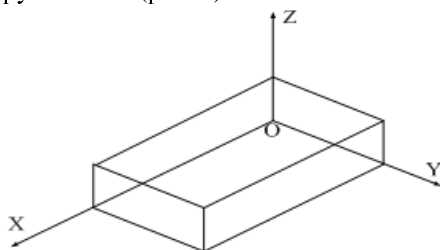


Рис. 1. Алгоритм статистической оценки виброустойчивости

Значения выходного сигнала МПЛУ в лучшем случае должны формировать нормальный ЗРВ. Это обусловлено тем, что указанная случайная величина у МПЛУ состоит из полутора десятка составляющих. И в том случае, если среди них не будет доминирующих составляющих, то ЗРВ в итоге будет нормальным.

Проведен эксперимент, в котором МПЛУ подвергался воздействию синусоидальной вибрации с одновременным действием ускорения свободного падения, которое являлось входной величиной, вибрация соответственно вредным внешним воздействием.

Изменение входной величины от  $-1g$  до  $+1g$  достигалось с помощью вращения акселерометра вокруг оси OX (рис. 2).



Ось чувствительности акселерометра – OZ.

Измерения выходного сигнала, который являлся цифровым, проведено в 24-угловых положениях для каждого из значений вибрации.

В табл. 1 приведены результаты эксперимента виброустойчивости микромеханического акселерометра при параметрах вибрации 20 Гц 0,5 g.

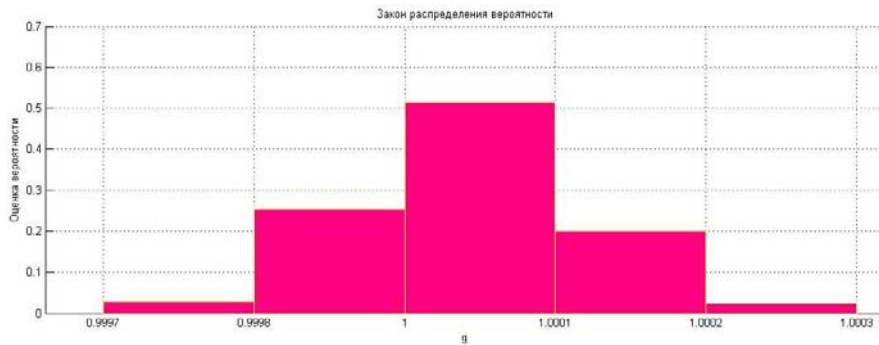
Таблица 1

Результаты статистической оценки виброустойчивости МПЛУ

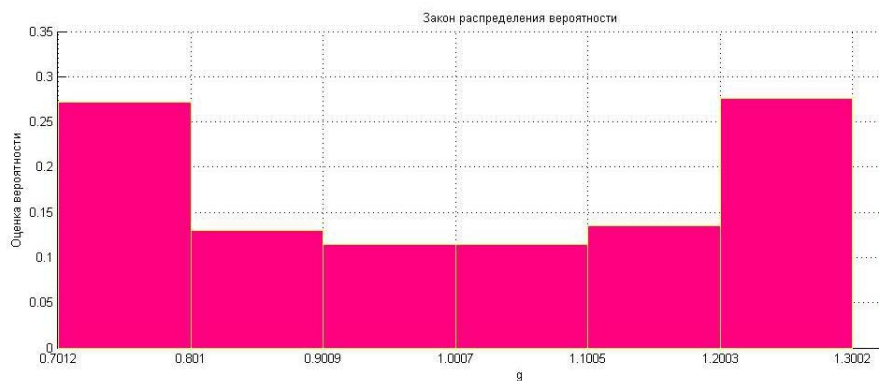
№	Угловое положение, °	Вид ЗРВ	m	$\sigma$	d
1	0, без вибрации	нормальный	1	$1,05 \times 10^{-4}$	$5,38 \times 10^{-4}$
2	0	арксинус	1	0,21	0,59
3	10	арксинус	0,98	0,21	0,58
4	20	арксинус	0,94	0,21	0,58
5	30	арксинус	0,88	0,21	0,59
6	40	арксинус	0,78	0,21	0,59
7	45	арксинус	0,72	0,21	0,59
8	50	арксинус	0,67	0,21	0,59
9	60	арксинус	0,54	0,21	0,59
10	70	арксинус	0,39	0,21	0,59
11	80	арксинус	0,23	0,21	0,59
12	90	арксинус	0,07	0,21	0,59
13	94 40' 37" (ноль на выходе)	арксинус	$-6,72 \times 10^{-5}$	0,21	0,59
14	100	арксинус	-0,09	0,21	0,59
15	120	арксинус	-0,39	0,2	0,58
16	150	арксинус	-0,72	0,21	0,58
17	180	арксинус	-0,84	0,21	0,59
18	210	арксинус	-0,72	0,21	0,6
19	240	арксинус	-0,38	0,21	0,59
20	265 23" (ноль на выходе)	арксинус	$-6,72 \times 10^{-5}$	0,21	0,59
21	270	арксинус	0,08	0,21	0,58
22	300	арксинус	0,54	0,2	0,58
23	330	арксинус	0,88	0,21	0,59
24	360	арксинус	1	0,21	0,59

На рис. 3 приведены примеры получившихся ЗРВ и их параметры. Так, на рис. 3,а показан нормальный ЗРВ МПЛУ в нормальных условиях.

Воздействие вибрации (20 Гц, 0,5 g) приводит к дополнительному нелинейному искажению выходной характеристики МПЛУ. В результате этого ее ЗРВ претерпевает значительные изменения, а именно: вид трансформируется в сторону закона арксинуса – одного из худших по влиянию законов (рис. 3,б), а его параметры, такие как: СКО и диапазон увеличиваются многократно. Все это обусловлено тем, что вибрационное воздействие является синусоидальным и сильнодействующим – сравнимым с полезным сигналом, в роли которого выступает ускорение свободного падения.



а  
 $m = 1; \sigma = 0,000105; d = 0,000538$



б  
 $m = 1,0003; \sigma = 0,20791; d = 0,58616$

Рис. 3. ЗРВ значений выходного сигнала МПЛУ ММА-1,2: а – в нормальных условиях (ЗРВ близок к нормальному); б – при воздействии вибрации (ЗРВ близкий к закону арксинуса)

В рамках проведенного эксперимента были испытаны 15 МПЛУ, у которых наблюдались аналогичные зависимости, что говорит о достоверности применяемого метода статистической оценки.

Исходя из вышеизложенного следует, что вибрационные нагрузки оказываются для МПЛУ наиболее критичными по сравнению с другими видами факторов.

Выходной сигнал МПЛУ при воздействии вибрации не пригоден для оценки измеряемого входного сигнала без дополнительной обработки и анализа – необходимо применять специальные программные и/или аппаратные методы нивели-

рования такого рода воздействия, а также выработать требования к применению МПЛУ в условиях вибрации.

Необходимо разработать соответствующий метод контроля МПЛУ при испытаниях на виброустойчивость.

В последствии эксперименты будут продолжены для охвата как можно большего количества МПЛУ, совершенствования метода и увеличения достоверности получаемых результатов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ РВ 20.57.416-98 «Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические военного назначения. Методы испытаний»
2. *Белозубов Е.М., Белозубова Н.Е.* Повышение устойчивости МЭМС-структур тонкопленочных датчиков к воздействию виброускорений и температур. Нано- и микросистемная техника. – 2008. – № 2. – С. 63-66.
3. *Полушкин В.М.* О контроле устойчивости микромеханических акселерометров к воздействию внешних механических факторов. Военная электроника и электротехника (научно-технический сборник). Выпуск 61, ФГУ "22 ЦНИИИ Минобороны России". – Мытищи, 2009. – С. 141-143.
4. «Преобразователи линейного ускорения микроэлектромеханические серии 2604» Технические условия АЕЯР.431320.708ТУ.
5. «Преобразователи линейного ускорения микроэлектромеханические с цифровым выходом серии ММА» Технические условия АЕСН.431329.002ТУ.
6. «Акселерометр АТ1112» Технические условия ИСМЯ.402139.008 ТУ.
7. *Новицкий П.В.* Основы информационной теории измерительных устройств. – Л.: Энергия, 1968.
8. ГОСТ 8.009-79. ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.
9. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969.

**Полушкин Вячеслав Михайлович**

ФГУ "22 ЦНИИИ Минобороны России".

E-mail: slpl@ya.ru.

141006, г. Мытищи, 22.

Тел.: 89261854849.

**Polushkin Vyacheslav Mihajlovich**

"22 CNIII the Ministry of Defence of Russia".

E-mail: slpl@ya.ru.

22, Mytischi, 141006, Russia.

Phone: 89261854849.