

УДК 681.586.325

**ІНФОРМАТИВНІСТЬ ЯК МЕТРОЛОГІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТУ МІКРОАКСЕЛЕРОМЕТРІВ**

Дубінець В. І.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна

E-mail: [vidubinets@ukr.net](mailto:vidubinets@ukr.net)

У статті представлені результати моделювання чутливих елементів осьових мікроакселерометрів. Проведені дослідження і встановлені закономірності впливу на чутливість геометричних параметрів пружного підвісу і маси чутливого елемента.

За допомогою аналітичних співвідношень і кінцево-елементного методу розраховані основні параметри пружного підвісу МЕМС-акселерометра.

**Ключові слова:** МЕМС-акселерометр, чутливий елемент, метод кінцевих елементів, чутливість, власна частота, демпфуючі властивості.

**Вступ**

Провідні світові фірми-розробники такі як Analog Devices, Freescale Semiconductors, STMicroelectronics, VTI Technologies, Silicon Sensing Systems Ltd і ін. виробляють МЕМС-акселерометри, гіроскопи в промислових обсягах. Незважаючи на те, що обсяги поставок МЕМС-датчиків досягають сотні мільйонів штук потреба в них постійно зростає. Тенденція до мікромініатюризації і зниження вартості систем привела до того, що датчики мають конструкцію, що поєднує чутливий елемент і кристал з електронікою в одному малогабаритному корпусі. Такі МЕМС-датчики знаходять широке застосування, починаючи з управляючих систем автомобіля, систем стабілізації платформ в авіації, в персональних / бортових системах навігації для піхоти і машин, високоточних боеприпасів і закінчуючи електронними іграшками [1, 3, 6, 8, 11, 13, 14, 17, 20]. Основним вузлом МЕМС-акселерометра, що визначає точність приладу, є його чутливий елемент. Не дивлячись на значну кількість теоретичних моделей і методів розрахунку чутливого елемента, як і раніше залишається невирішеною проблема однозначного вибору схеми його підвісу. Наразі реальна точність відомих розробок не перевершила рубіж  $1\div 2\%$  від вимірюваного діапазону [2 – 4, 9, 10, 12, 15 – 18].

**Постановка задачі**

Актуальним є завдання визначення параметрів чутливого елемента мікромеханічного акселерометра на етапі його проектування. При

цьому необхідно враховувати ряд основних факторів:

- співвідношення між чутливістю и частотою власних коливань;
- міцність та метрологічну надійність.

**Чутливі елементи осьових мікроакселерометрів**

Чутливий елемент (ЧЕ) є первинним вимірювальним перетворювачем, який безпосередньо сприймає прискорення, і перетворює його у вихідний сигнал. ЧЕ складається з основи у вигляді рамки, усередині якої знаходиться маса (М). М кріпиться до рамки за допомогою підвіски, що складається з пружних балок.

Базові принципові схеми ЧЕ осьових МЕМС-акселерометрів приведені на рис.1 і характеризуються низькою чутливістю до поперечних дій, високою жорсткістю і основною власною частотою [2 – 4, 9, 12, 15, 18].

Для обґрунтованого знаходження співвідношень між чутливістю і основною власною частотою ЧЕ використовують метрологічну характеристику – інформативність, яку визначають за формулою [8]:

$$B = S f_1^2.$$

**Моделювання та аналіз на міцність ЧЕ**

До ЧЕ пред'являють підвищені вимоги по міцності та метрологічній надійності. Під метрологічною надійністю розуміють здатність зберігати достовірність вимірювань в межах

встановлених норм за заданих умов експлуатації.

Міцнісна і метрологічна надійність MEMС-акселерометрів залежить від механічних, динамічних, демпфуючих властивостей матеріалів,

характеру напружено-деформованого стану, ефективного використання міцності і жорсткості матеріалів, досконалості методів розрахунку і проектування, критеріїв надійності [7].

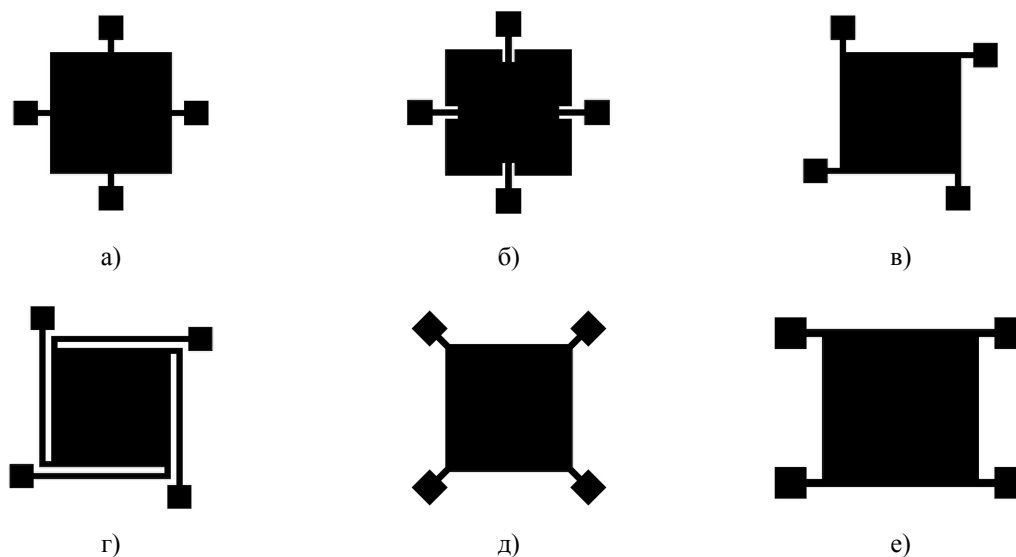


Рис. 1. Схеми підвісу ЧЕ осьових мікроакселерометрів

Основною мірою міцнісної надійності є запас міцності елементів конструкції. Міцнісну надійність можна оцінювати і по вірогідності безвідмовної роботи.

Моделювання і аналіз на міцність ЧЕ проводили за допомогою методу кінцевого елемента [5, 19], який дозволяє уявити підвісі різної конфігурації у вигляді набору простих елементів. Аналіз проводився методом моделювання в середовищі ANSYS [5], яке являє собою набір програмних пакетів.

При моделюванні були прийняті наступні припущення:

- деформації в матеріалах – лінійно-пружні, граничні умови не змінюються в процесі навантаження;
- жорсткість пружного підвісу у всьому діапазоні переміщення міняється лінійно;
- для матеріалів використовується модель суцільного, однорідного, ізотропного тіла, що деформується.

Основними метрологічними і експлуатаційними характеристиками ЧЕ є наступні [6]:

- нормоване значення вимірюваного прискорення;
- основна чутливість;
- поперечна чутливість;
- частотний робочий діапазон;
- габаритно-масові параметри.

Експлуатаційні і метрологічні вимоги до проєктованого ЧЕ наступні:

- нормоване значення вимірюваного прискорення  $\pm 10g$ ;

- переміщення маси ЧЕ не більше 5 мкм.

Для забезпечення цих вимог М мала розмір в плані 5x5 мм, балки пружного підвісу мали розміри (довжина x ширина x висота) в поперечному перерізі, рівні 0,5x0,25x0,005 мм.

Варійовані параметри моделей:

- схема підвісу ЧЕ (6 досліджуваних варіантів показано на рис. 1);

- довжина пружного елемента 0,5, 1 або 5,5 мкм.

Фізико-механічні властивості конструкційних матеріалів ЧЕ (кремній, оксид кремнію) наведені у [5].

При проєктуванні ЧЕ необхідно забезпечити п'ятикратний запас по міцності [7]. Тому в табл. 2 представлені основні характеристики моделей осьових ЧЕ при дії прискорення  $a = 50g$  у напрямі вимірювальної осі перпендикулярно площини підкладки. При моделюванні визначали напружено-деформований стан ЧЕ (еквівалентна, подовжня напруга і переміщення).

**Модель 1** (схема підвісу – рис. 1, а). Мостова схема підвісу ЧЕ з кріпленням пружного елемента за середину сторін маси ЧЕ. Еквівалентна напруга  $\sigma_3$  у балці пружної підвіски на фоні кінцево-елементної моделі показані на рис. 2.

Переміщення елементів моделі представлено на рис. 3.

Аналіз основних характеристик моделей 1 і 2 (див. табл. 1) показує, що підвіска ЧЕ у моделі 1 жорсткіша, ніж у моделі 2. Довжина пружного елемента в 2 рази більше у моделі 2 в порівнянні з

моделлю 1. Переміщення ЧЕ моделі 1 склало 1,3 мкм, а у моделі 2 – 5,538 мкм, тобто в 4 рази більше.

**Модель 4** (схема підвісу – рис. 1, г). Подібна

до схеми моделі 3, але довга, пружного елемента, значно збільшена в 11 разів. На рис. 4 показаний розподіл еквівалентної напруги, на рис. 5 – переміщення елементів моделі 4.

Таблиця 1. Основні характеристики моделей осьових ЧЕ

Модель	Схема підвісу (рис. 1)	Розмір маси мм	Розміри балки мм	Переміщення, мкм	$\sigma$ , МПа	Запас міцності, б/р	$f_1$ , Гц
1	а	5x5x0,03	0,5x0,25x0,005	1,3	14,3	260	3376,2
2	б	5x5x0,03	1x0,25x0,005	5,538	20,38	190	1562,5
3	в	5x5x0,03	0,5x0,25x0,005	1,868	7,1	540	2916,9
4	г	5x5x0,03	5,5x0,25x0,005	2,655	3,94	960	2225,2
5	д	5x5x0,03	0,5x0,25x0,005	2,533	14,67	260	2464,3
6	е	5x5x0,03	0,5x0,25x0,005	2,537	16,76	230	2458,5

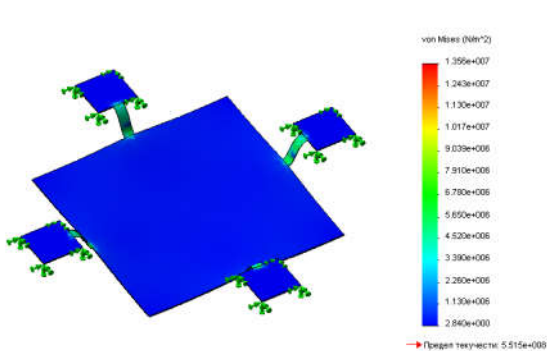


Рис. 2. Еквівалентна напруга в балці пружної підвіски (модель 1) на фоні кінцевих елементів

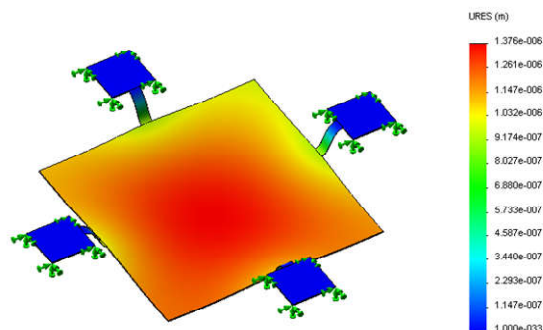


Рис. 3. Переміщення (модель 1)

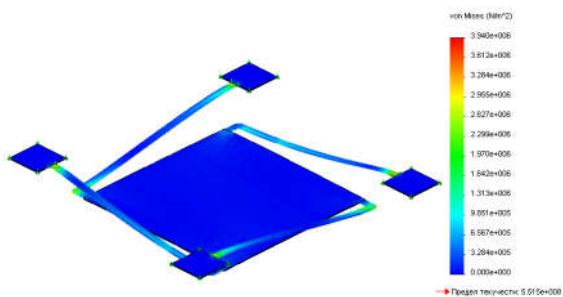


Рис. 4. Еквівалентна напруга пружної підвіски (модель 4) на фоні кінцевих елементів

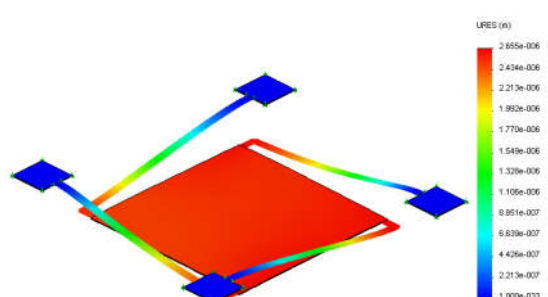


Рис. 5. Переміщення (модель 4)

**Модель 5** (схема підвісу – рис. 1, д). Мостова схема з хрестоподібним діагональним підвісом. Еквівалентна напруга  $\sigma$ , у балці пружної підвіски на фоні кінцево-елементної моделі показана на рис. 6. Переміщення елементів моделі представлено на рис. 7.

**Модель 6** (рис. 1, е). На рис. 8 показана еквівалентна напруга  $\sigma$ , у балці пружної підвіски на фоні звичайно-елементної моделі, на рис. 9. представлені переміщення елементів моделі

Аналіз основних характеристик моделей 3 і 4

(див. табл. 1) показує, ЧЕ з z-образним підвісом (рис.1, г) володіють найбільшим запасом міцності порівняно з іншими моделями.

### Висновки

Встановлено, що з підвищенням жорсткості підвісу ЧЕ чутливість акселерометра знижується, а власна частота зростає. Забезпечити високу чутливість в широкому частотному діапазоні достатньо складно.

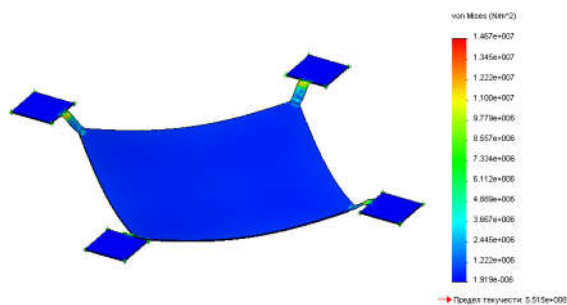


Рис. 6. Еквівалентна напруга пружної підвіски (модель 5)

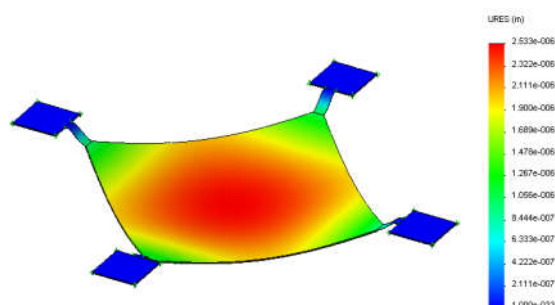


Рис. 7. Переміщення (модель 5)

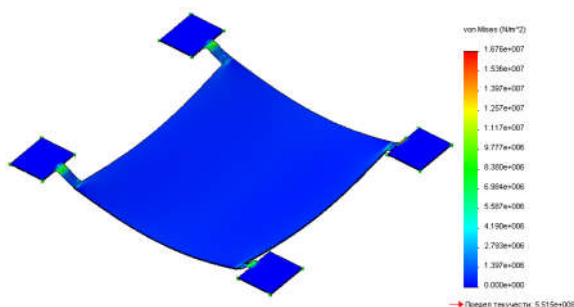


Рис. 8. Еквівалентна напруга пружної підвіски (модель 6)

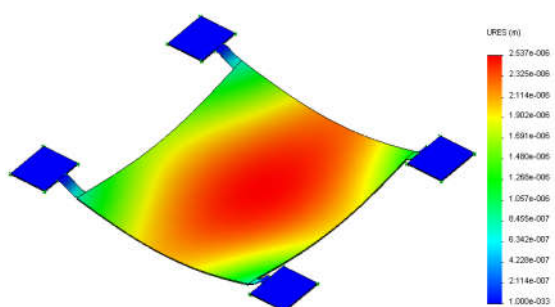


Рис. 9. Переміщення (модель 6)

Для підвищення чутливості МЕМС-акселерометрів можна збільшити масу ЧЕ, проте це також призведе до зниження динамічних характеристик. Забезпечення максимальної інформативності досягається внаслідок розумного компромісу між значеннями чутливості і основною власною частотою.

#### Література

1. Мокров Е. А. Интегральные датчики. Состояние разработок и производства. Направления развития, объемы рынка // Датчики и системы. – 2000. – № 1. – С. 28 – 30.
2. Распов В. Я. Микромеханические приборы: Учебн. пособие. – М.: Машиностроение, 2007. – 400 с.
3. Зотов С. А., Особенности проектирования и изготовления чувствительного элемента микромеханического акселерометра / С. А. Зотов, В. В. Калугин, С. П. Тимошенко, Е. С. Морозова, В. Н. Балычев // Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика. – 2012. – № 2. – С. 21 – 25.
4. Зотов С. А. Расчет формы деформируемой балки микромеханического акселерометра. – Тула, Известия Тульского государственного университета. Сер. Проблемы специального машиностроения. – 2001. – вып. 4. – С. 154-157.
5. Алямовский А. А. Solid Works / COSMOS Works. Инженерный анализ методом конечных элементов. – М.: ДМК Пресс, 2004. – 432 с.
6. Тузов А. Датчики для измерения параметров движения на основе МЕМС-технологии // Электроника. – 2011. – № 1. – С. 2 – 5.
7. Галушков А. И. Моделирование, динамический и прочностной анализ инерционных чувствительных наноэлементов // Нано- и микросистемная техника. – 2008. – № 1. – С. 34 – 38.
8. Тихонов А. И. Принцип совмещения функций в датчиках механических величин // Приборы и системы управления. – 1996. – № 1. – С. 18 – 21.
9. Бритков О. М. Разработка конструкции микромеханического акселерометра / 12 Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов "Микроэлектроника и информатика - 2005". – М.: МИЭТ, 2005. – С. 123.
10. Зотов С. А., Косвенный анализ жесткости подвеса чувствительного элемента микромеханического устройства / С. А. Зотов, А. Н. Бойко, О. М. Бритков // XXXI Гагаринские чтения. – М.: 2005. – С. 42 – 43.
11. Тарасов С. Б. МЭМС-гироскопы и акселерометры / С. Б. Тарасов, С. Н. Степанов, А. В. Петров, С. С. Степанов // Нано- и микросистемная техника. – 2015. – № 10.
12. Никулин А. В. Анализ влияния упругих элементов на собственные параметры микромеханических гироскопов LL-типа // Нано- и микросистемная техника. – 2011. – № 4.
13. Гольцова М. М. МЭМС: большие рынки малых устройств / М. М. Гольцова, В. А. Юдинцев // Нано- и микросистемная техника. – 2012. – № 4.

14. Охтилев М. Ю. Назначение гироскопических датчиков и системы их использования в современных навигационных системах / М. Ю. Охтилев, Ю. Б. Михайлов // *Авиакосмическое приборостроение*. – 2015. – № 1.
15. Shashkin V. I. Fabrication and characterization of stress-free microbeams for MEMS applications / V. I. Shashkin, N. V. Vostokov, E. A. Vopilkin, A. Yu. Klimov, V. M. Daniltsev, V. V. Rogov, S. G. Lazarev // *Phys. Stat. Sol. (c)* 2. 2005. N 4. P. 1433–1437.
16. Core T. A. Fabrication Technology for an Integrated Surface-Micromachined Sensor / T. A. Core, W. K. Tsang, S. J. Sherman // *S. S. technology*. Oct. 1993. P. 39–47.
17. Zimmerman L. Airbag application: a microsystem including a silicon capacitive accelerometer, CMOS switched capacitor electronics and true self-test capability / L. Zimmerman, J. Ph. Ebersohl, R. Hung // *Sensors and Actuators*. 1995. V. A46–47 190–195.
18. Guckel H., Siegowski S., Christenson T. et al. The application of fine-grained, tensile polysilicon to mechanically resonant transducers // *Sensors and Actuators*. 1900. V. 21–23. P. 351–364.
19. <http://www.ansys.com>
20. <http://www.freescale.com>.

УДК 681.586.325

**В. И. Дубинец***Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского", г. Киев, Украина***ИНФОРМАТИВНОСТЬ КАК МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА МИКРОАКСЕЛЕРОМЕТРОВ**

В статье представлены результаты моделирования базовых принципиальных схем чувствительных элементов осевых микроакселерометров. Для обоснованного нахождения соотношений между чувствительностью и частотой собственных колебаний выбрана такая метрологическая характеристика как информативность. Методом конечных элементов проведены исследования и установлены закономерности влияния на чувствительность геометрических параметров упругого подвеса и массы чувствительного элемента. При моделировании определяли напряженно-деформированное состояние ЧЕ.

**Ключевые слова:** МЭМС-акселерометр, чувствительный элемент, метод конечных элементов, чувствительность, частота собственных колебаний, демпфирующая способность.

**V. I. Dubinets***National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine***INFORMATIVITY AS METROLOGICAL CHARACTERISTICS AT DESIGN OF SENSITIVE ELEMENT OF MEMS ACCELEROMETERS**

The results of design of pickoffs of axial microaccelerometers are presented. Researches are conducted and conformities to the law of influence on the sensitiveness of geometrical parameters of elastic suspension and mass of pickoff are set.

Simulation and analysis of the strength of the sensitive element were carried out by the finite element method. In modeling, the following assumptions were made: deformations in materials are linear-elastic, the boundary conditions do not change during the loading process; the rigidity of the elastic suspension in the entire range of displacements varies linearly; for materials a model of a homogeneous, isotropic body is used.

The main metrological and operational characteristics of the sensor are the following: the normalized value of the measured acceleration; axial sensitivity; transverse sensitivity; frequency working range; bulk-mass parameters.

The operational requirements for the designed sensor element are as follows: the standardized value of the measured acceleration is  $\pm 10g$ ; displacement of mass not more than 5 microns.

To ensure these requirements, the mass was 5x5 mm, the beams of the elastic suspension (length x width x height) in the cross section 0.5x0.25x0.005 mm.

Variants of model parameters: 6 circuits of suspension of a sensitive element.

Ensuring maximum informativeness is achieved by a reasonable compromise between the values of sensitivity and the basic own frequency.

**Keywords:** MEMS-accelerometer, sensor, finite element method, sensitivity, natural oscillation frequency, damping ability.

*Надійшла до редакції  
25 травня 2017 року*

*Рецензовано  
06 червня 2017 року*

© Дубинець В. І., 2017