

## АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КОНСОЛІ ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТА ЄМНИСНОГО МЕМС ГРАВІМЕТРА

Основними параметрами, які необхідно розраховувати при розробці МЕМС - акселерометра, є площа і ємність обкладинок, інерційна маса, власна частота, коефіцієнт демпфірування, напруга притягання. Площу обкладинок і інерційної маси можна розрахувати з геометричних розмірів структури, а ємність обкладинок - використовуючи формулу для плоскопаралельного конденсатора. Поряд з цими параметрами необхідно знати коефіцієнт пружності підвісу.

Розрахункова схема чутливого елемента мікроакселерометра представлена на рис. 1. Введемо наступні позначення:  $l_1, l_2$  – повздовжні та  $h_1, h_2$  – поперечні розміри консольної балки і інерційної маси, відповідно;  $b$  - ширина консолі;  $m_1, m_2$  - маси балки інерційного елемента, закріпленого на її кінці, відповідно;  $EJ_z$  - згинальна жорсткість балки,  $E$  - модуль пружності матеріалу балки;  $J_z$  - момент інерції перерізу балки;  $r_z$  - радіус інерції інерційної маси відносно центру мас. За узагальнені координати розглянутої системи прийемо прогин  $y$  і кут повороту консолі, як показано на рис. 2.б. Для подальших розрахунків приймаємо, що задовольняється умова  $m_1/m_2 \ll 1$ .

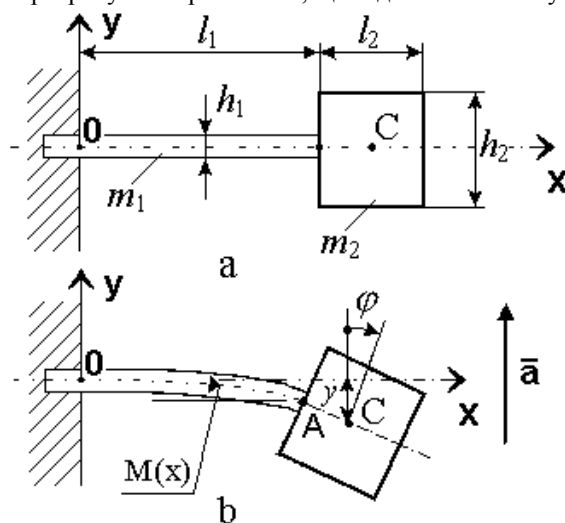


Рис. 1. Розрахункова схема чутливого елемента мікроакселерометра

У разі консольно-закріпленої інерційної маси при  $h_1/l_1 \ll 1$  нормальні напруги і відносні подовження шарів, а на поверхні консолі в перетині з координатою  $x$  можна оцінювати по співвідношеннях:

$$\sigma = \frac{6m_2 a (1-x)}{b_1 h_1^2}; \varepsilon = \frac{6m_2 a (1-x)}{b_1 h_1^2 E}. \quad (1)$$

З виразів (1) випливає, що нормальні напруження і відносні поверхневі подовження приймають максимальні значення в місці закладення консолі. По довжині консолі нормальні напруги і відносні видовження розподілені за лінійним законом. Відзначимо, що формули (1) отримані в припущенні, що зосереджена сила ( $m_2 a$ ) прикладена на кінці консолі.

Проте пружні підвіси можуть бути прямими і складчастими.

Вибір геометрії пружного підвісу багато в чому визначається обмеженнями топології і технологічних процесів. Для отримання високої чутливості і невеликих розмірів підвісу необхідно зменшувати його ширину, проте зменшення ширини призводить до того, що на характеристики підвісу істотний вплив починає чинити відтворюваність технологічного процесу (наприклад, АПХТ кремнію). Збільшення ширини підвісу, для зниження чутливості до відхилень технологічного процесу, призводить до необхідності збільшення його довжини, що збільшує розмір кристала. Як компроміс, може використовуватися складчастий підвіс (folded beam, serpentine beam). У даній роботі розглядатиметься підвіс складчастого типу, оскільки дає можливість зменшення розмірів кристала МЕМС - акселерометра. Вони, як правило, і використовуються у МЕМС – акселерометрах.

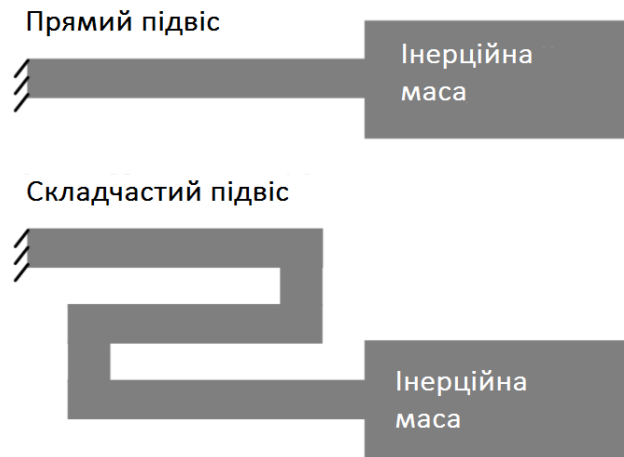


Рис. 2. Можлива форма пружних підвісів

Розрахунок коефіцієнта пружності за допомогою точних аналітичних співвідношень можливий для простих форм підвісу. Для складних використовуються наближені вирази. Зокрема, коефіцієнт пружності складчастого підвісу, зображеного на рис.2, в першому наближенні, може бути розрахований за допомогою наступної формули:

$$K = \frac{12EI}{(2N + 3)l^3} = \frac{Etw^3}{(2N + 3)l^3}, \quad (2)$$

де  $E$  - модуль пружності матеріалу підвісу,  $I$  - момент інерції перерізу підвісу,  $t$  - товщина підвісу,  $w$  - ширина підвісу,  $N$  - число складок підвісу,  $l$  - довжина сегмента складчастого підвісу (рис.3).

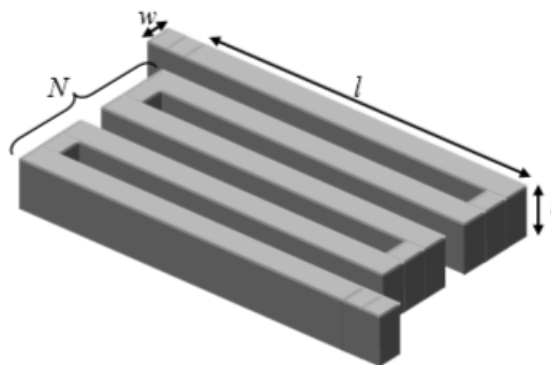


Рис. 3. Геометричні розміри підвісу

Для отримання більш точного значення коефіцієнта пружності підвісу складної форми, зокрема, складчастого підвісу, оптимальним є використання кінцево-елементного моделювання.

#### Список використаної літератури:

1. Bezvesilna, O.M. Investigation of the errors of a mechanical information-measuring system. [Text] / O.M. Bezvesilna // Soviet Applied Mechanics (4), 1990. P. 70-74.
2. Bezvesilna O.M., Automatic compensation for the errors of a gyroscopic linear integrating accelerometer [Text] / O.M. Bezvesilna // International Applied Mechanics (4), 1995. P. 79–85.
3. Патент №113033 Трикоординатний п'єзоелектричний гравіметр авіаційної гравіметричної системи / Безвесільна О.М., Ткачук А.Г., Бичук Р.М., Хильченко Т.В. // Патент №113033 від 25.11. 2016р. Бюл.№22. Заявка на винахід № а 2015 09858 Бюл.№7 від 11.04.2016.
4. Патент № 113038 Авіаційна гравіметрична система для вимірювань аномалій прискорення сили тяжіння / Безвесільна О.М., Ткачук А.Г., Хильченко Т.В. // Патент № 113038 від 25.11.2016 Бюл.№22. Заявка на винахід № а 2015 12205 Бюл. №9 від 10.05.2016.