

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІНЖЕНЕРНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ  
ДП “КИЇВОБЛСТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ”  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВОДНОГО ГОСПОДАРСТВА  
ТА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ  
WROCLAW UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування



Wrocław University  
of Science and Technology

# ІНТЕГРОВАНІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ РОБОТОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ (ІРТК-2024)

СІМНАДЦЯТА МІЖНАРОДНА  
НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ

21-22 травня 2024 р.  
Київ, Україна

ЗБІРКА ТЕЗ

Київ  
2024

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE  
NATIONAL AVIATION UNIVERSITY  
ENGINEERING ACADEMY OF UKRAINE  
SE "KYIV OBLSTANDARTMETROLOGY"  
NATIONAL UNIVERSITY OF WATER AND  
ENVIRONMENTAL ENGINEERING  
WROCLAW UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування



Wrocław University  
of Science and Technology

# INTEGRATED INTELLECTUAL ROBOTECHNICAL COMPLEXES (IIRTC-2024)

17<sup>th</sup> INTERNATIONAL SCIENCE AND TECHNICAL  
CONFERENCE

MAY 21-22<sup>ND</sup>, 2024  
KYIV, UKRAINE

COLLECTED ARTICLES

KYIV  
2024

МІЖНАРОДНИЙ ПРОГРАМНИЙ КОМІТЕТ

Голова:

Квасніков В.П. д.т.н., проф., Заслужений метролог України, зав. каф. Комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій НАУ, м. Київ.

Члени комітету:

Васильєв А.Й. д.е.н., проф., Президент Інженерної академії України, Заслужений діяч науки і техніки України, академік Міжнародної Інженерної академії, м. Харків.

Власенко В.О. д.т.н., проф., каф. технології університету Ополя, Республіка Польща.

Древецький В.В. д.т.н., проф., зав. каф. автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету водного господарства та природокористування, віце-президент Інженерної академії України, м. Рівне.

Черновол М.І. член-кор. Національної аграрної академії України, д.т.н., проф., професор Центральноукраїнського НТУ, м. Кропивницький.

Острофські К. д.т.н., проф., декан Краківського сільськогосподарського університету, Республіка Польща.

Мічинські Я. д.т.н., проф., зав. каф. Краківського сільськогосподарського університету, Республіка Польща.

Хойніцкі Ю. Ph.D., проф., заст. декана Варшавського університету природничих наук, Республіка Польща.

Kovela S. MSc, PhD, MBA, Associate Professor in Project Management, New College of the Humanities / Northeastern University College of Professional Studies, England, United Kingdom.

Khraisat Yahya S.H. Ph.D., Al\_Balda Applied University / Al-Huson University College, Irdan, Jordan.

Friwaldsky M. Ph.D., Prof. Ing. Head of Department Mechatronics and Electronics, University of Žilina, Slovakia.

Відповідальний редактор: Шелуха О.О., к.т.н., доц. каф. комп'ютерної інтеженії та кібербезпеки, ДУ «Житомирська Політехніка» м. Житомир.

Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2024). Сімнадцята міжнародна науково-практична конференція 21-22 травня 2024 р., Київ, Україна. – К.: НАУ, 2024. – 516 с. (збірка тез).

Містить результати наукових, експериментальних та теоретичних досліджень вчених, аспірантів та студентів.

Матеріали можуть бути корисними науковим співробітникам, інженерно-технічним працівникам, аспірантам та студентам, що спеціалізуються в галузі автоматизованих систем управління робототехнічних комплексів, інформаційних технологій та метрології.

## ЕЛЕКТРИЧНА МОДЕЛЬ МЕМС – АКСЕЛЕРОМЕТРА

**Рудик А.В.**, д.т.н., професор, Національний університет водного господарства та природокористування, a.v.rudyk@nuwm.edu.ua;

**Чубай Н.М.**, здобувач вищої освіти другого (магістерського) рівня, Національний університет водного господарства та природокористування

Для отримання фізичної моделі МЕМС-акселерометра необхідно сумісно розв'язати систему інтегро-диференціальних рівнянь, які описують пружну, електростатичну і теплову задачі. Зазвичай це проводиться чисельним розв'язанням системи рівнянь методом кінцевих елементів.

Для розробників навігаційних систем та інших користувачів синтез математичних моделей таким методом є складним через ряд причин:

- необхідність використання значних обчислювальних ресурсів;
- детальне знання внутрішньої будови чутливого елемента акселерометра для задавання граничних умов розв'язання системи інтегро-диференціальних рівнянь, що можливо тільки для виробників даних сенсорів.

Однак навіть при реалізації цих обмежень через розкид технологічних і топологічних параметрів отримана модель не буде точно відображати характеристики реального сенсора. Тому для підвищення точності моделювання необхідно використовувати модель, основою якої є передавальна функція, що зв'язує вихідний електричний сигнал (напругу) з вхідним сигналом (прискоренням).

Для спрощеної механічної системи передавальна функція за каналом "прискорення – зміщення інерційної маси" визначається як

$$W_C(p) = \frac{X'(p)}{a(p)} = \frac{m}{m \cdot p^2 + c \cdot p + k} \quad (1)$$

При переході від механічних змінних  $k$ ,  $t$  та  $c$  до електричних маємо:

$$\omega_0 = \sqrt{k/m}, \quad \xi = c / (2\sqrt{k \cdot m}), \quad (2)$$

де  $\omega_0$  – частота власних коливань акселерометра;  $\xi$  – коефіцієнт затухання.

З врахуванням введених змінних передавальна функція (1) буде такою:

$$W_C(p) = \frac{1}{p^2 + 2 \cdot \xi \cdot \omega_0 \cdot p + \omega_0^2} \quad (3)$$

Вихідна напруга сенсора пропорційна зміщенню інерційної маси, тому ввівши коефіцієнти  $K = \frac{G}{\omega_0^2}$ ,  $\alpha = \frac{1}{\omega_0^2}$ ,  $\beta = \frac{2 \cdot \xi}{\omega_0}$ , запишемо передавальну функцію акселерометра за каналом "прискорення – вихідна напруга":

$$W_C(p) = \frac{U(p)}{a(p)} = \frac{K}{\alpha \cdot p^2 + \beta \cdot p + 1}, \quad (4)$$

де  $K$  – статичний коефіцієнт передачі акселерометра за каналом "прискорення – вихідна напруга" (коефіцієнт чутливості);  $G$  – масштабний коефіцієнт

акселерометра;  $\alpha$  і  $\beta$  – коефіцієнти, що визначають інерційність акселерометра.

Формула (4) є електричною математичною моделлю акселерометра. Для подальшого аналізу визначимо параметри його передавальної функції  $K$ ,  $\alpha$  та  $\beta$ . В паспортних даних [1] наведено значення коефіцієнта чутливості  $K$  при кімнатній температурі, а в роботі [2] масштабний коефіцієнт визначений за експериментальними даними як кут нахилу залежностей вихідної напруги акселерометра MMA7331LT від вимірюваного прискорення (рис. 1). При вимірюваннях вісь чутливості акселерометра встановлена ортогонально вектору прискорення сили тяжіння  $g$ . За результатами досліджень визначено такі значення статичного коефіцієнта передачі акселерометра за каналом "прискорення – вихідна напруга":

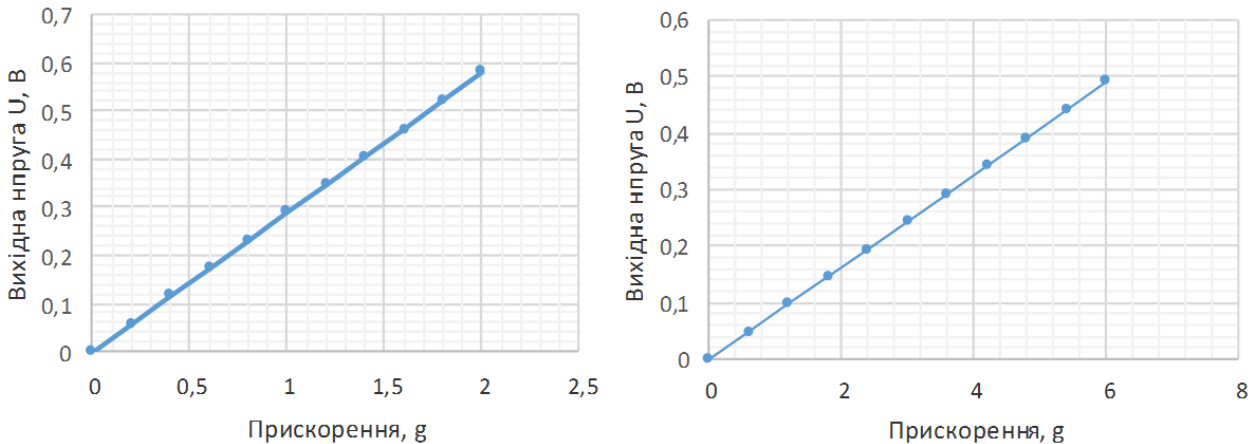
$$\text{- для діапазону } \pm 12g: K = 81.7 \frac{mB}{g} = \frac{0.0817 B}{9.81 m/c^2} \cong 0.00834 \frac{B \cdot c^2}{m};$$

$$\text{- для діапазону } \pm 4g: K = 290.5 \frac{mB}{g} = \frac{0.2905 B}{9.81 m/c^2} \cong 0.02964 \frac{B \cdot c^2}{m}.$$

Для оцінки коефіцієнтів  $\alpha$  та  $\beta$  використовувалася логарифмічна АЧХ (ЛАЧХ), отримана за співвідношенням для передавальної функції (4):

$$L_C(\omega) = 20 \cdot \lg(W_C(i\omega)) = 20 \cdot \lg K - 10 \cdot \lg \left\{ (1 - \alpha \cdot \omega^2)^2 + \beta^2 \cdot \omega^2 \right\}. \quad (5)$$

Значення коефіцієнтів  $\alpha$  і  $\beta$  при апроксимації методом найменших квадратів експериментально знятої ЛАЧХ функцією (5).



а) б)

Рис. 1. Залежність вихідної напруги акселерометра MMA7331LT від вимірюваного прискорення в діапазонах  $\pm 4g$  (а) та  $\pm 12g$  (б)

При зазначених умовах отримано коефіцієнти передавальної функції при роботі акселерометра в діапазоні  $\pm 12g$   $\alpha = 2.6342 \cdot 10^{-8} c^2$  і  $\beta = 9.8127 \cdot 10^{-5} c$  й обчислено інші коефіцієнти передавальної функції акселерометра в формі (4):

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} = \frac{1}{\sqrt{2.6342 \cdot 10^{-8}}} = 6161.35 \text{ рад/с};$$

$$\xi = \frac{\beta \cdot \omega_0}{2} = \frac{9.8127 \cdot 10^{-5} \cdot 6161.35}{2} = 0.3023;$$

$$G = K \cdot \omega_0^2 = 0.00834 \cdot 6161.35^2 = 316605 \frac{B}{m}$$

За цими даними можна оцінити параметри механічної моделі МЕМС-акселерометра MMA7331LT для ефективної інерційної маси  $m = 10^{-6}$  кг :

$$k = m \cdot \omega_0^2 = 10^{-6} \cdot 6161.35^2 = 37.96 \frac{H}{m};$$

$$c = 2 \cdot \xi \cdot \sqrt{k \cdot m} = 2 \cdot 0.3023 \cdot \sqrt{37.96 \cdot 10^{-6}} = 0.003725 \frac{H \cdot c}{m} = 0.003725 \frac{кг}{с}.$$

Передавальна функція акселерометра в діапазоні  $\pm 12g$  буде такою:

$$W_C(p) = \frac{0.00834}{2.6342 \cdot 10^{-8} \cdot p^2 + 9.8127 \cdot 10^{-5} \cdot p + 1}. \quad (6)$$

На рис. 2 наведені експериментальна (червоний колір) та змодельована за (6) (синій колір) нормовані АЧХ МЕМС-акселерометра MMA7331LT для діапазону  $\pm 12g$ . При використанні паспортних характеристик МЕМС-акселерометра MMA7331LT для діапазону  $\pm 12g$  максимальна похибка відхилення від експериментальних даних не буде перевищувати 14%, а при використанні передавальної функції (6) – не буде перевищувати 3.5%.

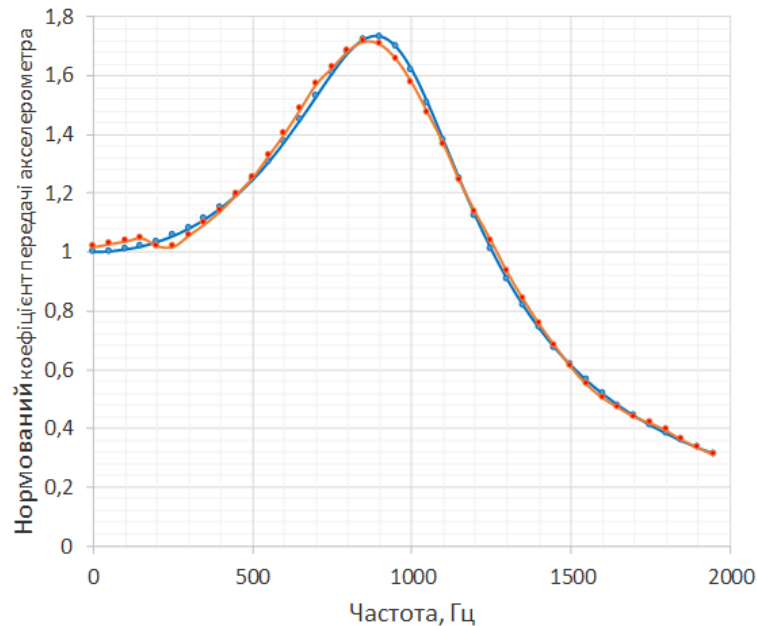


Рис. 2. Нормована АЧХ МЕМС-акселерометра MMA7331LT (діапазон  $\pm 12g$ )

### Список використаних джерел

1.  $\pm 4g, \pm 12g$  Three Axis Low-g Micromachined Accelerometer MMA7331L Freescale Data Sheet: [Електронний ресурс]. – <http://www.datasheetdir.com>.
2. Квасніков В.П., Рудик А.В. Математичні моделі MEMS-акселерометра // Вісник Інженерної академії України. – 2016. - № 4. - С. 86-92.

УДК 004

Наукове видання

# ІНТЕГРОВАНІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ РОБОТОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ (ІРТК-2024)

СІМНАДЦЯТА МІЖНАРОДНА  
НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ

21-22 травня 2024 р.

Київ, Україна

Збірка тез

Тези надруковані в авторській редакції на одній із двох робочих мов конференції

Оригінал-макет

підготовлено на кафедрі комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій

Аерокосмічного факультету

Національного авіаційного університету

Комп'ютерна верстка:

Шелуха О.О.

---

Підп. до друку 20.05.24. Формат 60x84/16.

Папір офс. Гарн. Times New Roman.

Ум. друк. арк. 24,5. Тираж 100 прим. Замовлення № 5

---

Віддруковано у СПД «Андрієвська Л.В.»

м. Київ, вул. Бориспільська, 9,

Свідоцтво серія ВОЗ № 919546 від 19.09.2004 р.