

ПРИСТРОЇ ДЛЯ РЕЄСТРАЦІЇ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ СЕРЦЯ НА ОСНОВІ MEMS-ТЕХНОЛОГІЙ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

В роботі представлено огляд і результати дослідження пристроїв для реєстрації акустичних сигналів серцевого м'яза людини, заснованих на технології MEMS. Розглянуто конструкції сучасних MEMS-сенсорів, принципи їх роботи та особливості чутливості до низькочастотних сигналів. Запропоновано методику розрахунку чутливості MEMS-сенсорів для діапазону частот звуків серця, виконано теоретичний аналіз основних параметрів, що впливають на ефективність роботи сенсорів, зокрема його форми та типу перетворювача. Розглянуто методику розрахунку амплітудно-частотної характеристики моделі MEMS-сенсора. Результати показують потенціал застосування MEMS-пристроїв для неінвазивного моніторингу серцевих звуків із високою чутливістю та точністю виявлення патологічних змін.

Ключові слова: MEMS, акустичні сигнали серця, фонокардіографія, чутливість сенсора.

Abstract

The paper presents a review and research findings on devices for recording acoustic signals of the human heart muscle based on MEMS technology. The designs of modern MEMS sensors, their operating principles, and sensitivity to low-frequency signals are discussed. A methodology for calculating the sensitivity of MEMS sensors in the frequency range of heart sounds is proposed, along with a theoretical analysis of key parameters that affect sensor performance, including shape and transducer type. A method for calculating the amplitude-frequency characteristic of a MEMS sensor model is also presented. The results demonstrate the potential of using MEMS devices for non-invasive monitoring of heart sounds, providing high sensitivity and accuracy in detecting pathological changes.

Keywords: MEMS, heart acoustic signals, phonocardiography, sensor sensitivity.

Вступ

Акустичні сигнали серця є важливим джерелом інформації для неінвазивної діагностики та моніторингу стану серцево-судинної системи людини. Традиційний метод аускультатії, який використовує класичний стетоскоп, був розроблений ще у XIX столітті та залишається одним із базових інструментів у практиці лікаря. Однак обмеження традиційного підходу, такі як залежність від суб'єктивного сприйняття лікаря, низька чутливість до низькочастотних сигналів (20–100 Гц) та неможливість цифрової обробки даних, стимулювали розвиток нових технологій для точнішої та об'єктивної оцінки стану серцевої діяльності [1].

Серед сучасних рішень, особливу увагу привертають мікроелектромеханічні системи (MEMS), що дозволяють створювати мініатюрні, високочутливі сенсори для реєстрації серцевих звуків. MEMS-технології забезпечують можливість інтеграції електронних та механічних компонентів в одному пристрої, що відкриває нові горизонти у створенні портативних, гнучких та високопродуктивних медичних пристроїв. MEMS-сенсори демонструють високу точність вимірювань у широкому частотному діапазоні, особливо в області низьких частот, що є критично важливим для виявлення патологічних серцевих шумів.

В роботі розглянуто конструкції MEMS-пристроїв для реєстрації акустичних сигналів серця, проведено аналіз їхніх характеристик, а також теоретичне моделювання технічних характеристик. Проведене дослідження дозволяє оцінити перспективи застосування MEMS-технологій у клінічній практиці для точного виявлення патологій серцево-судинної системи та підвищення ефективності кардіологічної діагностики.

Результати дослідження

Чутливість є ключовим параметром MEMS-сенсорів, особливо в контексті біомедичних застосувань, таких як реєстрація звуків серцевого м'яза людини. Висока чутливість дозволяє

сенсору виявляти слабкі акустичні сигнали, що є критично важливим для точної діагностики серцево-судинних захворювань. Наприклад, здатність сенсора виявляти низькоамплітудні звуки, такі як третій (S3) і четвертий (S4) тони серця, може допомогти виявити наявність серцевої недостатності або інших патологій [2].

Чутливість MEMS-сенсора залежить від кількох факторів. Геометрія мембрани, зокрема її товщина, форма та розміри, визначає механічні властивості сенсора. Тонші мембрани зазвичай мають вищу чутливість, але можуть бути менш стійкими до механічних навантажень. Матеріал мембрани та п'єзорезистивних елементів також критично впливає на чутливість. Вибір матеріалу визначає механічну міцність та електричні характеристики сенсора. Розташування п'єзорезисторів у зонах максимального механічного напруження забезпечує кращу чутливість. Температурна стабільність є важливим чинником, оскільки зміни температури можуть впливати на електричні властивості матеріалів, що призводить до зміни чутливості [3]. Конструкція електричної схеми сенсора, зокрема використання мостових схем, дозволяє зменшити вплив шумів та покращити точність вимірювань.

Чутливість п'єзорезистивного сенсора визначається як відношення зміни вихідного сигналу до зміни вхідного тиску:

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta P} \quad (1)$$

де ΔV – зміна вихідної напруги; ΔP – зміна прикладеного тиску.

Для п'єзорезистивних сенсорів, де зміна опору ΔR відбувається внаслідок механічного напруження, чутливість також можна виразити через коефіцієнт п'єзорезистивності π , механічне напруження σ та початковий опір R :

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi \cdot \sigma \quad (2)$$

У випадку використання мостової схеми Уітстона, вихідна напруга V_{out} залежить від зміни опору п'єзорезисторів:

$$V_{out} = \left(\frac{\Delta R}{R} \right) \cdot \left(\frac{V_{in}}{4} \right) \quad (3)$$

де V_{in} – вхідна напруга.

Таким чином, чутливість сенсора можна розрахувати як:

$$S = \frac{V_{out}}{\Delta P} = \left(\frac{\pi \cdot \sigma}{\Delta P} \right) \cdot \left(\frac{V_{in}}{4} \right) \quad (4)$$

Цей розрахунок дозволяє оцінити, як зміна механічного напруження в мембрані сенсора впливає на його електричний вихід, що є основою для подальшого аналізу та оптимізації конструкції MEMS-сенсорів для біомедичних застосувань.

Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) є ключовим параметром, що визначає ефективність MEMS-сенсора в біомедичних застосуваннях, зокрема для реєстрації в акустичному діапазоні діяльності серця. Вона описує залежність амплітуди вихідного сигналу сенсора від частоти вхідного акустичного сигналу. У контексті фонокардіографії важливо, щоб сенсор мав високу чутливість у діапазоні частот 20–600 Гц, який охоплює основні та додаткові тони серця [4].

Частотна характеристика MEMS-сенсора формується під впливом кількох факторів, включаючи геометрію та матеріали мембрани, масу рухомих елементів, жорсткість пружних елементів, а також демпфування. Ці параметри визначають резонансну частоту сенсора, яка є частотою, на якій сенсор має максимальну чутливість. Резонансна частота f_0 для системи, що моделюється як маса на пружині, визначається за формулою:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m_{eff}}} \quad (5)$$

де k – ефективна жорсткість системи; m_{eff} – ефективна маса рухомих елементів.

Для моделювання АЧХ сенсора використовується передавальна функція гармонічного осцилятора:

$$H(f) = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right)^2 + \left(\frac{f}{f_0 Q}\right)^2}} \quad (6)$$

де f – частота вхідного сигналу; Q – добротність системи, що характеризує ступінь демпфування.

Добротність Q визначається як:

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f} \quad (7)$$

де Δf – ширина смуги пропускання на рівні -3 дБ відносно максимуму.

У випадку MEMS-сенсора з діаметром мембрани 2 мм і товщиною 10 мкм, виготовленого з кремнію, розрахунки показують, що резонансна частота становить приблизно 300 Гц. При добротності $Q=10$, сенсор має ширину смуги пропускання близько 30 Гц, що дозволяє ефективно реєструвати основні тони серця [5].

Таким чином, аналіз амплітудно-частотної характеристики є важливим етапом у проектуванні MEMS-сенсорів для біомедичних застосувань, оскільки дозволяє забезпечити необхідну чутливість у відповідному частотному діапазоні.

Висновки

В роботі проведено аналіз конструкцій і робочих характеристик MEMS-сенсорів для реєстрації акустичних сигналів серця. Детально розглянуто особливості чутливості таких сенсорів, а також вплив різних параметрів, таких як геометрія мембрани, вибір матеріалів, розташування п'єзорезистивних елементів, температурні фактори та конструктивні особливості електричних схем. Показано, що чутливість MEMS-сенсорів має ключове значення для забезпечення точного виявлення серцевих звуків, особливо слабких компонентів, які часто є маркерами патологічних змін у роботі серцево-судинної системи.

Розрахунки підтверджують придатність таких сенсорів для медичних застосувань, де важливо забезпечити високу чутливість у низькочастотному діапазоні. Отримані результати демонструють перспективність використання MEMS-технологій для створення високочутливих, мініатюрних і недорогих пристроїв для діагностики захворювань серцево-судинної системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Zhang, G., Liu, M., Guo, N., Zhang, W. (2016). Design of the MEMS Piezoresistive Electronic Heart Sound Sensor. *Sensors*, 16(11), 1728. <https://doi.org/10.3390/s16111728>
2. Zauli, M., Peppi, M.P., Di Bonaventura, L., Arcobelli, A.V., Spadotto, A., Diemberger, I., Coppola, V., Mellone, S., De Marchi, L. (2023). Exploring Microphone Technologies for Digital Auscultation Devices. *Micromachines*, 14(11), 2092. <https://doi.org/10.3390/mi14112092>
3. Torabi, Y., Shirani, S., Reilly, J.P., Gauvreau, G.M. (2024). MEMS and ECM Sensor Technologies for Cardiorespiratory Sound Monitoring – A Comprehensive Review. *Sensors*, 24(21), 7036. <https://doi.org/10.3390/s24217036>
4. Wang, B., Shi, P., Yang, Y., Cui, J., Zhang, G., Wang, R., Zhang, W., He, C., Li, Y., Wang, S. (2022). Design and Fabrication of an Integrated Hollow Concave Cilium MEMS Cardiac Sound Sensor. *Micromachines*, 13(12), 2174. <https://doi.org/10.3390/mi13122174>
5. Ahmad, R.S., Khan, M.S., Hilal, M.E., Khan, B., Zhang, Y., Khoo, B.L. (2025). Advancements in Wearable Heart Sounds Devices for the Monitoring of Cardiovascular Diseases. *SmartMat*, 6(1), e1311. <https://doi.org/10.1002/smm2.1311>

Дячук Олексій Олександрович – аспірант кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, email: dayte2@gmail.com

Тимчик Сергій Васильович – канд. техн. наук, доцент кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: tymchyksv@ukr.net

Diachuk Oleksii O. – graduate student of the Department of Biomedical Engineering and Optical-Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email: dayte2@gmail.com

Tymchik Serhii V. – Cand. Sc. (Eng), Associate Professor of the Department of Biomedical Engineering and Optical-Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: tymchyksv@ukr.net