

К. В. Базіло, к.т.н., доцент,
Ю. Ю. Бондаренко, к.т.н., доцент,
В. М. Зайка, к.т.н.,

Черкаський державний технологічний університет
вул. Шевченка, 460, Черкаси, 18006, Україна,

С. Ф. Петренко, д.т.н., професор,
НВК ТОВ «Лілея», м. Київ, Україна

П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ДЛЯ ОЦІНКИ НЕБЕЗПЕК НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ) визначає здоров'я як "стан повного фізичного, психічного та соціального благополуччя, а не лише як відсутність хвороби чи недуги". Фізичні чинники (шум, вібрація, електромагнітні поля, іонізоване випромінювання) можуть негативно впливати як на навколишнє середовище, так і на здоров'я населення. П'єзоелектричні датчики можуть використовуватися в різних сферах, таких як медичний аналіз, моніторинг навколишнього середовища тощо. Метою даної роботи є дослідження датчиків для моніторингу навколишнього середовища та їх моделювання. В роботі розглянуто небезпеки навколишнього середовища, їх джерела та вплив на людський організм. Для покращення характеристик п'єзоелектричних перетворювачів може бути застосований метод просторової та кутової взаємодії, який використовується для максимального збільшення коливань згину, а також метод додаткових елементів. Фізичні процеси, що відбуваються в дискових п'єзоелектричних перетворювачах, змодельовано в програмі COMSOL Multiphysics.

Ключові слова: моніторинг навколишнього середовища, фізичне забруднення, шум та вібрація, оцінка небезпек навколишнього середовища, моделювання, п'єзоелектричні перетворювачі.

Вступ. Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ) визначає здоров'я як "стан повного фізичного, психічного та соціального благополуччя, а не лише як відсутність хвороби чи недуги". Фізичні чинники (шум, вібрація, електромагнітні поля, іонізоване випромінювання тощо) можуть негативно впливати як на навколишнє середовище, так і на здоров'я населення [1]. Шум та вібрація представляють для суспільства зростаючі екологічні проблеми. Вони є небезпечними для людини, коли мають високі рівні, або продовжуються протягом тривалого часу [2].

Шум та вібрація як екологічні небезпеки. Шум є одним із факторів навколишнього середовища, який впливає на наше здоров'я в сучасному світі. Шум, як правило, визначається як неприємні звуки (наприклад, поширені машиною або літаком), які порушують фізичні і фізіологічні характеристики людини та спричиняють забруднення навколишнього середовища шляхом руйнування екологічних властивостей [3]. Прямим впливом на здоров'я, пов'язаним із шумом, є втрата слуху при

шумі, рівень якого перевищує 90 децибел. Існує також декілька неслухових фізіологічних впливів шуму, включаючи головний біль, запаморочення, підвищений кров'яний тиск, втрата концентрації, захворювання серця тощо.

Шум у робочому середовищі спричиняє серйозну людську, соціальну та економічну проблеми. Дії у міжнародному масштабі сприятимуть вирішенню цієї проблеми і будуть особливо корисними для країн, що розвиваються [2].

Відповідно до Директиви ЄС з питань вібрації можна виділити дві її форми: 'whole-body vibration' (WBV), яка передається мобільними або стаціонарними машинами, де оператор стоїть або сидить, а також 'hand-arm vibration' (HAV), яка передається через ручні або керовані інструменти. Директива визначає ці терміни наступним чином:

– 'whole-body vibration': механічна вібрація, яка при передачі всьому тілу спричиняє ризики для здоров'я та безпеки працівників, зокрема захворюваності нижньої частини спини та травми хребта;

– ‘hand-arm vibration’: механічна вібрація, яка при передачі в систему рук людини призводить до ризиків для здоров'я та безпеки працівників, зокрема судинних, кісткових або суглобових, неврологічних або м'язових розладів [4].

WBV впливає на водіїв важких сільськогосподарських тракторів, де вона передається через сидіння, раму та елементи керування до всього тіла водія.

Є чимало негативних медичних ефектів, спричинених впливом вібрації на водіїв. Коли вплив коливань короткотерміновий, симптомами є коротке дихання, нудота та порушена рівновага, тоді як тривалий вплив викликає розлади в психомоторних, фізіологічних та психологічних системах. В свою чергу, сільськогосподарські трактори були визначені як небезпечні машини з точки зору WBV. Існує ризик навіть для тих водіїв, які піддаються вібрації лише одну годину на день.

Тому важливо постійно вимірювати рівень шуму та вібрації, оцінювати їх та визначати ризики для безпеки водія. Залежно від ризику, слід вживати організаційні та технічні заходи для зменшення вібрації [5]. В ряді досліджень було виявлено підвищений ризик для здоров'я людей, які живуть поруч із дорогами та залізницями [6–8].

Безсумнівно, існує потреба в подальших дослідженнях для уточнення цієї комплексної області, включаючи краще вимірювання шуму та вібрації, а також дослідження наслідків їх впливу на здоров'я [9].

Метою даної роботи є дослідження датчиків для моніторингу навколишнього середовища та їх моделювання.

П'єзоелектричні перетворювачі та їх моделювання

П'єзоелектричні датчики можуть використовуватися в різних сферах, таких як медичний аналіз, моніторинг навколишнього середовища тощо. П'єзоелектричний акселерометр – це пристрій, який вимірює вібрацію або прискорення руху структури. Він служить зв'язком між вібраційними конструкціями та електронним вимірювальним обладнанням. П'єзоелектричні акселерометри широко використовуються для вимірювання вібрацій. У порівнянні з іншими типами датчиків, п'єзоелектричні акселерометри мають важливі переваги: надзвичайно широкий динамічний діапазон, низький вихідний шум, лінійність в широкому діапазоні, самогенерація [10].

Принцип дії п'єзоелектричних акселерометрів заснований на п'єзоелектричному ефекті кварцових або керамічних кристалів, що генерують електричний сигнал, пропорційний прикладеному прискоренню. Завдяки п'єзоелектричному ефекту відбувається накопичення заряджених частинок на кристалі. Цей заряд пропорційний прикладеній силі або напруженню. Загальна кількість накопиченого заряду пропорційна прикладеній силі, а прикладена сила пропорційна прискоренню. Такі ж принципи використовуються і при оцінці шуму п'єзоелектричними мікрофонами, які складаються з п'єзоелектричного елемента, прикріпленого до діафрагми [11].

Для покращення характеристик п'єзоелектричних перетворювачів були застосовані метод просторової та кутової взаємодії, який використовується для максимального збільшення коливань згину, а також метод додаткових елементів [12]. Були проведені дослідження схем з трансформаторною розв'язкою, яка дозволяє утворити біжучу хвилю та максимально збільшити коливання згину.

Для експериментальних досліджень використовувався п'єзоелектричний перетворювач діаметром $\varnothing 66$ мм, який показано на рис. 1.

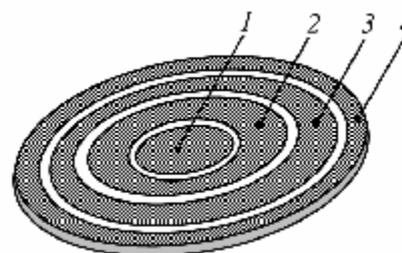


Рис. 1. Дисківий п'єзоелектричний перетворювач з розділеними електродами

Електроди 1–4 на поверхні п'єзоелектричного перетворювача (рис. 1) виготовлені методом хімічного травлення. Така конструкція дозволяє проектувати велику кількість з'єднань, застосовувати різноманітні методи покращення характеристик, такі як метод просторової та кутової взаємодії, метод додаткових елементів, метод трансформаторної розв'язки тощо. Результати вимірювання для різних схем підключення дисків перетворювача з трансформаторною розв'язкою наведені в табл. 1.

Схеми підключення дискового п'єзоелектричного перетворювача з трансформаторною розв'язкою

№	Схема	C , nF	L , H	Звуковий тиск, dB
1		$C_{\Sigma} = 1,7$	–	80
2		$C_{1',4-4'} = 1,7$ $C_{2-4'} = 0,5$	$L_I = 0,25$ $L_{II} = 1,5$	108
3		$C_{1',4-1,4'} = 1,8$ $C_{2-1,4'} = 0,85$	$L_I = 0,12$ $L_{II} = 1,15$	112

В табл. 1 використані наступні позначення: C – міжелектродна ємність; L – додаткова індуктивність.

П'єзоелектричний елемент є електромеханічною коливальною системою. Таким чином, додавання електричних компонентів може впливати на характеристики п'єзоелектричного перетворювача. Точно підібрана індуктивність L до міжелектродної ємності C може значно збільшити вихідний сигнал. Як видно з табл. 1, використання трансформаторної розв'язки (схема 2, 3) дозволяє створити в п'єзоелектричному перетворювачі коливання згину, що призводять до збільшення вихідного сигналу (108–112 dB) порівняно з традиційним підключенням (80 dB) [13] (схема 1).

В даний час відсутні надійні та достовірні методи побудови математичних моделей п'єзоелектричних трансформаторів, які могли б бути використані як теоретичні основи розрахунку характеристик і параметрів цього класу функціональних елементів сучасної п'єзоелектроніки. Описані методи моделювання п'єзоелектричних перетворювачів в більшості своїй засновані на використанні еквівалентних електричних схем [14–16], які не дозволяють проводити аналіз напружено-деформованого стану твердих тіл з п'єзоелектричними ефектами. Кінцевою метою математичного моделювання фізичного стану коливальних п'єзокерамічних елементів є якісний і кількісний опис характеристик і параметрів існуючих в них електричних і пружних полів.

Найбільш ефективним методом чисельного моделювання складних систем є метод кінцевих елементів. Фізичні процеси, що відбуваються в дискових п'єзоелектричних перетворювачах, моделювалися в COMSOL Multiphysics. Зміщення матеріальних частинок п'єзокерамічного дискового перетворювача з найбільшим вихідним сигналом (табл. 1, схема 3) показано на рис. 2.

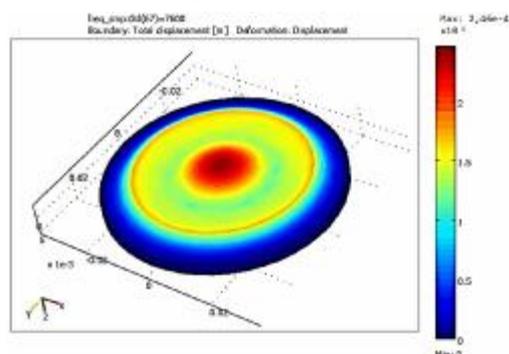


Рис. 2. Зміщення матеріальних частинок дискового п'єзокерамічного перетворювача

Використовуючи таке моделювання, легко визначити чутливість характеристик п'єзоелектричних перетворювачів до варіацій їх конструктивних параметрів. Маючи доступ до цих залежностей, ми можемо виконати раціональний вибір технології виготовлення продукції, тобто вибрати найменш дорогі технології з ряду. Таким чином, якісне моделювання дозволяє істотно скоротити час і вартість розробки нових моделей п'єзоелектричних перетворювачів.

Робота виконана за матеріалами 10th International Conference Environmental Engineering, 2017, Vilnius, Lithuania.

Висновки

Основні результати даної роботи можна зафіксувати наступним чином.

1. Розглянуто небезпеки навколишнього середовища, їх джерела та вплив на людський організм.

2. Для покращення характеристик п'єзоелектричних перетворювачів можуть бути застосовані метод просторової та кутової взаємодії, який використовується для максимального збільшення коливань згину, а також метод додаткових елементів. Використання трансформаторної розв'язки дозволяє створити в п'єзоелектричному перетворювачі коливання згину, що призводять до збільшення вихідного сигналу (108-112 dB) порівняно з традиційним підключенням (80 dB).

3. Фізичні процеси, що відбуваються в дискових п'єзоелектричних перетворювачах, було змодельовано в COMSOL Multiphysics. Максимальне зміщення для перетворювача з трансформаторною розв'язкою в 4 рази більше, ніж для перетворювача з традиційним з'єднанням. Це дає можливість отримати збільшення вихідного сигналу п'єзоелектричних перетворювачів для моніторингу навколишнього середовища.

References

1. Vasilyev, A., Zabolotskikh, V., Vasilyev, V. (2013) Development of methods for the estimation of impact of physical factors on the health of population, *Safety of Technogenic Environment*, 4, pp. 42–45.
2. Abdel-Rahman, S. M. (2008) Environmental impact assessment of pump noise, *Proc. of Twelfth International Water Technology Conference, IWTC12, Alexandria, Egypt*, pp. 459–476. URL: http://iwtc.info/2008_pdf/6-2.PDF
3. Atmaca, E., Peker, I., Altin, A. (2005) Industrial Noise and Its Effects on Humans, *Polish Journal of Environmental Studies*, 14(6), pp. 721–726.
4. EU-OSHA (2008) *Workplace exposure to vibration in Europe: an expert review*. European Agency for Safety and Health at Work. Available from Internet: <https://osha.europa.eu/pt/node/6879>
5. Cvetanovic, B., Zlatkovic, D. (2013) Evaluation of whole-body vibration risk in agricultural tractor drivers, *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 19(5), pp. 1155–1160.
6. Aasvang, G. M., Overland, B., Ursin, R., et al. (2011) A field study of effects of road traffic and railway noise on polysomnographic sleep parameters, *J Acoust Soc Am* 129: 3716–26.
7. Eriksson, C., Nilsson M. E., Willers S. M. et al. (2012) Traffic noise and cardiovascular health in Sweden: The roadside study, *Noise Health*, 14, 140–147.
8. Babisch, W. F., Beule, B., Schust, M. et al. (2005) Traffic noise and risk of myocardial infarction, *Epidemiology*, 16, pp. 33–40.
9. Stansfeld, S., Matheson, M. (2003) Noise pollution: non-auditory effects on health, *British Medical Bulletin*, 68(1), pp. 243–257.
10. Metra Mess- und Frequenztechnik (2001) Piezoelectric Accelerometers: Theory and Application. URL: <http://www.gracey.co.uk/downloads/accelerometers.pdf>
11. PCB Piezotronics, Inc. Introduction to Piezoelectric Accelerometers. URL: [http://www.pcbpiezotronics.be/TestMeasurement\(en-CA\)/Accelerometers\(en-CA\)/tech_accel\(en-CA\)](http://www.pcbpiezotronics.be/TestMeasurement(en-CA)/Accelerometers(en-CA)/tech_accel(en-CA))
12. Bondarenko, Yu. Yu., Bazilo, K. V., Kunytska, L. G. (2015) The increase of sound pressure level of monomorph transducers with the use of spatial energy force structure of a piezoelement, *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu. Seria: Tehnichni nauky*, No. 3, pp. 5–9.
13. Sharapov, V. (2011) Piezoceramic sensors, *Springer*, 500 p.
14. Lineykin, S., Ben-Yaakov, S. (2004) Feedback isolation by piezoelectric transformers: comparison of amplitude to frequency modulation, *35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Aachen, Germany, pp. 1834–1840.
15. Ozeri, S., Shmilovitz, D. (2006) A Time Domain Measurements Procedure of Piezoelectric Transformers Equivalent Scheme Parameters, *ISCAS*, pp. 2281–2284.
16. Buchacz, A., Placzek, M., Wrobel, A. (2014) Modelling of passive vibration damping using piezoelectric transducers – the mathematical model, *Maintenance and reliability*, 16(2), pp. 301–306.

C. V. Bazilo, *Ph. D. (Eng.), associate professor*,
Yu. Yu. Bondarenko, *Ph. D. (Eng.), associate professor*,
V. M. Zaika, *Ph. D. (Eng.)*,
Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine,
S. F. Petrenko, *doctor of science, professor*
Research and production complex “Lileya”, Kyiv, Ukraine

PIEZOELECTRIC TRANSDUCERS FOR ENVIRONMENTAL HAZARDS ASSESSMENT

World Health Organization (WHO) defined health as being “a state of complete physical, mental, and social well-being and not merely the absence of disease or infirmity”. Physical factors (noise, vibration, electromagnetic fields, ionized radiation, etc.) may have a negative influence on both the environment and the health of population. Piezoelectric transducers can be used for environmental monitoring, hazards assessment. Piezoelectric sensors have been employed in different fields such as medical analysis, environmental monitoring, etc. The object of the study is piezoelectric sensors for environmental monitoring and their simulation. Environmental hazards, their sources and effects on the human body are considered. For transducers characteristics improvement the method of spatial and angular interaction, which is used in order to maximize bending vibrations, and the method of additional elements were improved. Physical processes which occur in disk piezoelectric transducers were simulated in COMSOL Multiphysics.

Keywords: *environmental monitoring, physical pollution, noise and vibration, environmental hazards assessment, mathematical simulation, piezoelectric transducers.*

*Рецензенти: В. М. Рудницький, д.т.н., професор,
В. І. Гордієнко, д.т.н.*