

# ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ПОДОЛАННЯ ДЕСТРУКТИВНОЇ ІНТЕРФЕРЕНЦІЇ В СИСТЕМАХ АКТИВНОГО ШУМОЗАГЛУШЕННЯ НА ПРИКЛАДІ ŠKODA DUOBELL

Вінницький національний технічний університет

## Анотація

Досліджено фізичні обмеження систем активного шумозаглушення (ANC) при обробці неперіодичних акустичних коливань. Запропоновано теоретичну модель порушення умов деструктивної інтерференції за рахунок генерації сигналів із високою крутизою початкового фронту. Для верифікації отриманих висновків проведено аналіз хвильових і геометричних параметрів механічного випромінювача Škoda DuoBell.

**Ключові слова:** акустика, суперпозиція хвиль, деструктивна інтерференція, транзйентна атака, консольний резонатор.

## Abstract

The physical limitations of active noise cancellation (ANC) systems in handling non-periodic acoustic oscillations have been studied. A theoretical model of the violation of destructive interference conditions due to the generation of signals with a high initial front steepness has been proposed. To verify the obtained conclusions, an analysis of the wave and geometric parameters of the Škoda DuoBell mechanical emitter was conducted.

**Keywords:** acoustics, wave superposition, destructive interference, transient attack, transverse beam resonator.

## Вступ

Інтеграція систем active noise cancellation (ANC) у повсякденні гаджети суттєво знижує здатність пішоходів сприймати звукові сигнали небезпеки в міському середовищі.

Ця робота присвячена дослідженням фізичних умов, за яких звукові коливання можуть уникати штучного згасання. Метою дослідження є визначення чинників, що обмежують ефективність суперпозиції хвиль у комерційних пристроях, та обґрунтування оптимальних параметрів захисного сигналу.

## Результати дослідження

Процес штучного пригнічення зовнішнього звукового поля базується на класичному явищі деструктивної інтерференції когерентних коливань. Для мінімізації результуючого акустичного тиску система повинна згенерувати компенсуючу хвилю з амплітудою, яка є тотожною амплітуді шуму, але має фазовий зсув рівно на  $\Delta\varphi = \pi$  [1]. Відповідне суперпозиційне рівняння має вигляд [1]:

$$P_{\text{total}}(t) = A \sin(\omega t) + A \sin(\omega t + \pi), \quad (1)$$

де  $P_{\text{total}}(t)$  — результуючий звуковий тиск у момент часу  $t$ ;  $A$  — амплітуда акустичних коливань;  $\omega$  — циклічна частота;  $t$  — час.

Проте в реальних фізичних системах стан  $P_{\text{total}}(t) = 0$  є недосяжним через часову затримку (latency), яка необхідна для інверсії та випромінювання сигналу зустрічної фази. Аналіз експериментальних даних, отриманих у безлунних камерах лабораторії Salford Acoustics, свідчить про те, що здатність систем до фазової компенсації різко падає у низькочастотному тональному спектрі — нижче 1000 Гц. Результати зіставлення акустичного згасання для сигналів різної природи відображено на рис. 1.

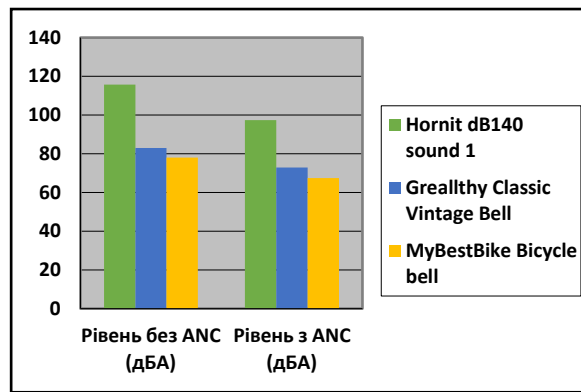


Рис. 1. Зниження рівня звукового тиску (SPL) системами ANC залежно від типу випромінювача

Зіставлення амплітудних показників на рис. 1 виявляє важливу закономірність: попри високу початкову інтенсивність сигналу електронного випромінювача Hornit dB140 sound 1 (115,7 дБА), алгоритми успішно вирівнюють фази, пригнічуючи акустичну енергію на 18,3 дБ. Водночас коливання, що згенеровані механічним ударним способом пристроїв Greallthy Classic Vintage Bell та MyBestBike Bicycle bell, втрачають лише від 10,0 до 10,5 дБ енергії відповідно.

Транзйентна атака (Transient Attack) або висока крутизна початкового фронту хвилі здатна дестабілізувати фазове підлаштування систем ANC. Стрімке зростання амплітуди в перші мілісекунди створює нестационарний режим, де точний розрахунок параметрів компенсуючої хвилі стає неможливим [2].

Практичною реалізацією запропонованого підходу є аналіз коливальних процесів у механічному пристрої Škoda DuoBell. Його частотний спектр сфокусовано безпосередньо у виявленій сліпій зоні алгоритмів — 700-800 Гц [2]. Для подолання геометричних обмежень (адже за законами акустики низькі частоти потребують збільшення радіуса класичного купольного резонатора) авторами конструкції використано консольні балки (Transverse Beam Resonators). Власна частота коливань такого резонатора визначається відношенням довжини до товщини пластини, а не її об'ємом. Завдяки акустичному узгодженню з резонаторною камерою, дана геометрія забезпечує стійкий локальний тиск 83 дБА на відстані 2 метри [2], успішно пробиваючи штучний інтерференційний бар'єр без залучення електронних джерел живлення.

## Висновки

Фізичне моделювання хвильових процесів та аналіз експериментальних даних демонструють фундаментальні ліміти штучної деструктивної інтерференції. Створення акустичних хвиль із високою швидкістю наростання амплітуди у частотному коридорі 700-800 Гц унеможливило своєчасну фазову компенсацію з боку пристроїв ANC. Використання консольних резонаторів підтверджує можливість енергонезалежної генерації таких захисних сигналів у межах жорстких просторових обмежень.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П. Загальний курс фізики : навч. посіб. для студ. вищ. техн. і пед. закл. освіти : у 3 т. / за ред. І. М. Кучерука. Київ : Техніка, 2006. Т. 3 : Оптика. Квантова фізика. Фізика атома та атомного ядра. 518 с.
2. Bailey W., Boys H., Rossi V. Development & evaluation of noise cancellation resistant micro-mobility alert sounds : Research Report No. 07519 / Salford Acoustics (University of Salford), Unit9, Škoda Auto a.s. Salford, 2026. 30 p. URL: [https://cdn.skoda-storyboard.com/2026/04/Skoda-DuoBell-Research-final\\_cf127752.pdf](https://cdn.skoda-storyboard.com/2026/04/Skoda-DuoBell-Research-final_cf127752.pdf) (дата звернення: 28.05.2026).

**Зяць Владислав Олександрович** — студент групи ЗПІ-25б, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, email: [curiositylife3310@gmail.com](mailto:curiositylife3310@gmail.com)

Науковий керівник: **Мартинюк Володимир Валерійович** — кандидат технічних наук, доцент кафедри загальної фізики Вінницького національного технічного університету, м. Вінниця

**Zayats Vladyslav Oleksandrovych** — Faculty of Information Technologies and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email: [curiositylife3310@gmail.com](mailto:curiositylife3310@gmail.com)

Supervisor: : **Martynyuk Volodymyr Valeriyovych** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of General Physics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia