



УДК 534.231

**BEAM PATTERN OF A DISCRETE INTERFERENCE ACOUSTIC
ANTENNA, COMPOSED FROM HELMHOLTZ RESONATORS**
**ХАРАКТЕРИСТИКА НАПРАВЛЕНОСТІ ДИСКРЕТНОЇ ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНОЇ
АКУСТИЧНОЇ АНТЕНИ, СКЛАДЕНОЇ З РЕЗОНАТОРІВ ГЕЛЬМГОЛЬЦА**

Корутко Yu.S. / Копитько Ю.С.

PhD, assistant / аспірант, ас.

ORCID: 0000-0003-2771-5180

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Kyiv, Peremogy avenue, 37, 03056

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського", Київ, проспект Перемоги, 37, 03056

Анотація. Робота присвячена аналізу можливості формування та регулювання характеристики направленості прийомної інтерференційної звукопрозорої дискретної прямолінійної некомпенсованої акустичної антени, складеної з резонуючих елементів – типу резонаторів Гельмгольца.

В роботі проведено аналіз і наведено графічні залежності для гіпотетичної ситуації формування і регулювання характеристики направленості з врахуванням розподілення акустичних тисків по осі резонуючої порожнини кожного з елементів антени.

Мета роботи полягає в аналізі та попередньому визначенні порядку формування та регулювання ХН прийомної акустичної антени на основі хвильової інформації про утворене в горлі та порожнині резонатора Гельмгольца акустичне поле. При цьому сучасний темп розвитку електроакустичної техніки обумовлює актуальність та доцільність такого завдання, забезпечуючи використання результатів аналізу в розробках систем автоматизованого контролю, комунікаційних систем тощо.

Ключові слова: резонатор Гельмгольца, акустична антена, резонуюча порожнина, характеристика направленості, електроакустичні перетворювачі.

Вступ.

Задачі формування і реєстрації акустичних полів в умовах відкритих та напіввідкритих повітряних просторів, а також задачі розробки акустичних приймальних систем вимагають деталізації і уточнення результатів розрахунків просторово-енергетичних характеристик, як нової так і традиційної бази електроакустичних перетворювачів. Це пов'язано з тим, що методи механо- і акусто-електричних аналогій не задовольняють вимогам визначення особливостей побудови та роботи багатьох сучасних електроакустичних перетворювачів. Особливо така ситуація ускладнюється під час роботи в областях частот, віддалених від резонансної області частот перетворювача [1].

Таким чином, уточненню підлягають конструкції та властивості перетворювачів багатьох типів. З яких найбільш простим та перспективним - є мікрофонний елемент з конструктивним виконанням у вигляді резонатора Гельмгольца.

Початкові дослідження характеристик електроакустичних систем та вказаного акустичного пристрою, пропонується провести для такого важливого чинника як характеристика направленості (ХН). Доцільним також є визначення і уточнення частотних характеристик резонатора, а також питань співставлення та відповідності геометрії резонатора його резонансним властивостям. Цікавим



також є питання визначення структури акустичного поля в елементах конструкції резонатора, початкові відомості про яке можуть бути отримані за допомогою підходів роботи [2] та монографії [3].

Тож, в очікуванні нових якісних властивостей, прийомні акустичні антени можуть бути виконані на основі резонаторів Гельмгольца, робота яких має бути детально описана за допомогою сучасних хвильових методів [3], виключаючи недоліки, притаманні методам акусто-електричних аналогій [4].

Також представляється доцільним та цікавим розглянути коливальні режими резонатора як основи процесу формування характеристики направленості прийомної антени, елементами якої є резонатори Гельмгольца. Самі коливальні режими резонаторів в подальшому мають бути розглянуті за допомогою хвильових методів та проілюстровані епюрами (скажімо, розподілення акустичного тиску вздовж осі горла та резонаторної порожнини).

Таким чином, мета роботи полягає в аналізі та попередньому визначенні порядку формування та регулювання ХН прийомних акустичних антен на основі хвильової інформації про утворене в горлі та порожнині резонатора Гельмгольца акустичне поле. При цьому сучасний темп розвитку електроакустичної техніки обумовлює актуальність та доцільність такого завдання, забезпечуючи використання результатів в розробках систем автоматизованого контролю, комунікаційних систем тощо.

Основной текст

Постановка і розв'язок задачі

Розглянемо задачу прийому звуку акустичною антеною, акустична взаємодія елементів якої між собою - відсутня, а самі елементи представлені резонаторами Гельмгольца кубічного типу. Конструкція резонаторів передбачає можливість використання мініатюрного мікрофону. Припустимо також, що вказана система приймачів звукопрозора. Це дозволяє також розглянути набір резонаторів лише в площині (тобто, привести задачу визначення ХН до її проєкцій на площини системи прямокутних координат xOy або yOz).

Нехай в сферичній системі координат (рисунок 1) розглядається прямолінійна еквідистантна дискретна антенна решітка, яка працює в повітряному середовищі і відноситься до класу інтерференційних акустичних антен [5]. Елементи решітки подано кубічними резонаторами Гельмгольца, перерізи вхідних частин горла яких ототожнюють з плоскими прямокутними поршнями, ідентичними вказаним перерізам. Поршні однаково зорієнтовані в просторі та мають однакові функції направленості.

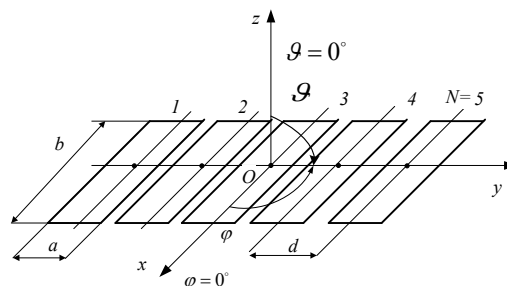


Рисунок 1 - Акустична антенна з елементами поршневого типу



Геометрія задачі визначення ХН зазначеної АА, відповідає набору з $N = 5$ прямокутних поршнів, розміщених вздовж осі Oy з кроком d (d – відстань між фазовими центрами поршнів), розмірами твірних a та b ($a = b$); та кутами φ, ϑ (широтний та меридіональний кути сферичної системи координат).

Елементи акустичної антени – резонатори, збуджуються плоскою хвилею одиничної амплітуди, що надходить з нескінченності. Спрощене зображення резонатора приведено на рисунку 2.

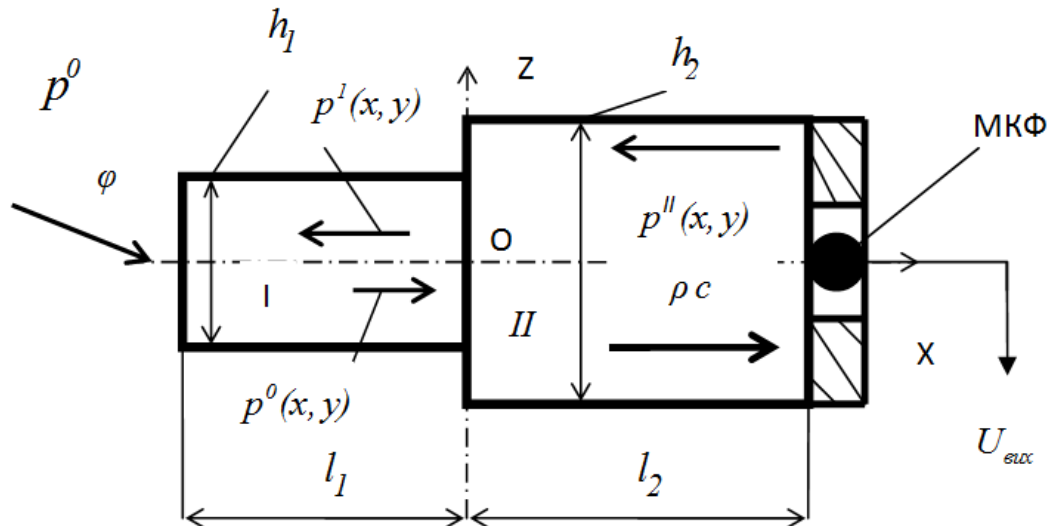


Рисунок 2 - Резонатор кубічного типу (плоска задача)

Отже розглядаємо кубічний резонатор, елементи якого представлено двома областями I і II (область I – горло, область II – резонуюча порожнина) Зовнішній перетин горла - квадратний. Тобто $h_1 = a = b$.

Для розрахунків було обрано наступні розміри:

Довжина горла - $l_1 = 0.01$ м;

Висота перетину горла - $h_1 = a = b = 0.01$ м;

Довжина порожнини резонатора – $l_2 = 0.04$ м;

Висота перетину порожнини резонатора - $h_2 = 0.03$ м;

Досліджуваний частотний діапазон $\Delta f = (1000 - 5000)$ Гц. І, особливо, частоти 1000 Гц, 2000 Гц, 4272 Гц.

Денце має мати технологічний отвір для мініатюрного рухомого вздовж осі Ox мікрофона МКФ. Тиски в горлі і в порожнині позначено як $p^I(x)$ та $p^{II}(x)$ відповідно.

Ширина горла та повздовжні хвильові розміри порожнини резонатора мають забезпечувати виконання умови – “вузької труби” [6]. Коливальний режим резонатора має досліджуватися методом частинних областей [3] з використанням кінематичних умов спряження частинних областей I та II , а також граничних умов для акустично жорстких поверхні денця резонатора, (наприклад, підхід, який залучено з роботи [3] для труб з розширенням, звуженням та відгалуженням хвилеводних напрямків).

На рисунку 3 для різних частот наведено попередні результуючі оцінки



розподілу акустичних тисків в горлі (рисунок 3а) та модулів тисків в порожнині (рисунок 3б) резонатора Гельмгольца. Як видно в горлі та в порожнині має місце частотна і координатна залежність тисків. Така залежність показує, що за певних сполучень геометричних характеристик, резонансної частоти резонатора та частоти збурення, після введення шкал відліку координати x як x_1 та x_2 . Координата x_1 змінюється від перерізу на вході горла до перерізу на вході порожнини (проміжок l_1), а x_2 – від перерізу початку порожнини до денця (проміжок l_2). На частоті резонансу $f = 4272$ Гц на денці виникає максимальне значення тиску, яке зменшується до нульового значення коли x_2 – знаходиться посередині l_2 . При цьому в горлі нерівномірність координатної залежності – незначна. Тобто, виконується майже в повній мірі умова вузької труби. Як видно, при зміні частоти на значення $f = 2000$ Гц тиск на денці взагалі практично нульовий і зростає при зменшенні x_2 до початку порожнини $l_2 = 0$.

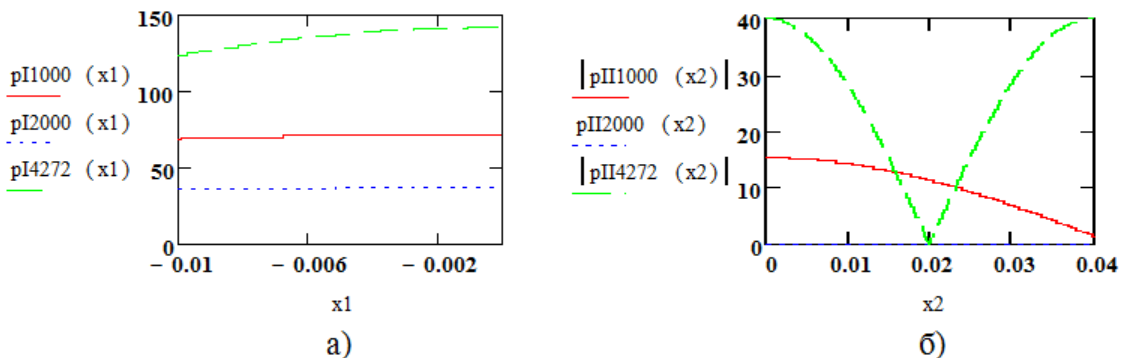


Рисунок 3 - Розподіл по осі резонатора Гельмгольца акустичних тисків на частотах $f = 1000$ Гц, $f = 2000$ Гц, $f = 4272$ Гц

Таким чином, виникає можливість корегування тиску (зменшення або збільшення) як чинника впливу на реєструючий пристрій (скажімо, мініатюрний мікрофон, який може рухатися – просуватися від денця до бажаної точки на осі резонатора). Можливість обрання значення тиску для певної частоти за умови ідентичності мікрофонів системи та виконання умов роботи [7], обумовлює можливість регулювання напруг по виходу мікрофонів $U_{вих}$, що передуює операції формування ХН на суматорі в тракті обробки.

За умов однаковості електричних напруг на виходах мікрофонів за фазою та амплітудою при нормальному падінні плоскої хвилі, маємо прийомну систему без розподілу чутливості елементів акустичної антени. ХН системи при цьому визначатиметься в результаті виконання теореми множення [5,8] виду:

$$D_N(\vartheta, \varphi) = D_e(\vartheta, \varphi) \cdot D_p(\vartheta, \varphi), \quad (1)$$

де $D_e(\vartheta, \varphi) = \left| \frac{\sin(U)}{U} \right| \cdot \left| \frac{\sin(V)}{V} \right|$ – характеристика направленості елемента решітки.

$$U = \frac{\pi a}{\lambda} (\sin \vartheta \sin \varphi - \sin \vartheta_0 \sin \varphi_0); \quad V = \frac{\pi b}{\lambda} (\sin \vartheta \cos \varphi - \sin \vartheta_0 \cos \varphi_0);$$



ϑ_0, φ_0 - кути, що визначають напрямок компенсації;

$D_p(\varphi, \vartheta) = |D_N(\varphi, \vartheta)| = \left| \frac{1}{N} \frac{\sin(NX)}{\sin X} \right|$ - характеристика направленості гіпотетичної

решітки з точкових елементів - множник решітки; $X = \frac{\pi d}{\lambda} (\sin \vartheta \sin \varphi - \sin \vartheta_0 \sin \varphi_0)$.

Отже, для некомпенсованої антени ХН запишемо як:

$$|D_N(\varphi, \vartheta)| = \left| \frac{\sin(U)}{U} \right| \cdot \left| \frac{\sin(V)}{V} \right| \left| \frac{1}{N} \frac{\sin(NX)}{\sin X} \right| \quad (2)$$

Результати розрахунків по формулам (1) та (2) ХН вказаної антени наведені на рисунку 4 для частоти $f = 4272 \text{ Гц}$ і максимального значення тиску на денці. При однаковій відстані просуванні всіх п'яти МКФ вглиб порожнин резонаторів та виконання умов роботи [7], функція направленості залишається без змін, проте абсолютні значення тисків (і, відповідно, $U_{\text{вих}}$) – зменшуються.

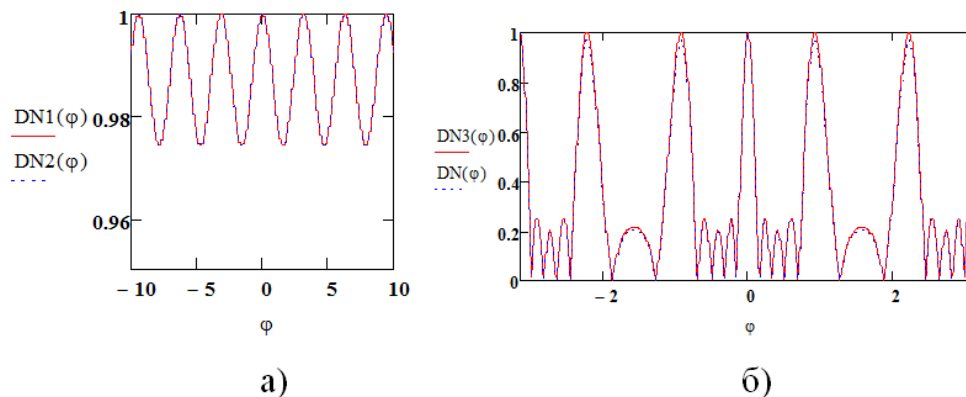


Рисунок 4 - ХН дискретної еквідистантної інтерференційної прямолінійної акустичної антени на основі резонаторів Гельмгольца при $f = 4272 \text{ Гц}$:

- а) ХН перерізу зовнішнього перетину;
б) ХН множника решітки та антени в цілому**

Якщо просування МКФ відбуватиметься в симетричних (відносно початку координат) каналах - резонаторів є однаковим, а напруги за умов нормального падіння плоскої хвилі різні, то це призводить до виникнення асиметрії ХН та зміненню напрямку компенсації. Така амплітудна неідентичність може бути ліквідована шляхом корекції положення МКФ на осі порожнини резонаторів.

Висновки.

Аналіз можливості використання резонаторів Гельмгольца як прикладу конструктивного виконання мікрофонів прийомних акустичних антен, показує, що хоч такий підхід і вимагає подальших досліджень, проте:

- відкриває можливість проведення калібрування елементів акустичних антен безпосередньо у складі самої антени;
- надає можливість введення бажаних амплітудних розподілень чутливості в елементах прийомної системи.

Виходячи з цього, вважаємо, що доцільними є подальші дослідження особливостей антен вказаного типу як в експериментальній (започатковано в роботі [7]) так і в теоретичний спосіб, шляхом удосконалення постановки



хвильових задач і їх розв'язку методами частинних областей при загальних умовах спряження для конструктивних сполучень “пружне середовище- тверде тіло”.

Література:

1. Петрищев О.Н. Гармонические колебания пьезокерамических элементов. Часть 1. Гармонические колебания пьезокерамических элементов в вакууме и метод “резонанса- антирезонанса”. – К.: АВЕРС, 2012. – 299 с.
2. Kopytko Yu., Zaets V., Naida S., Didkovskiy V., Damarad A. Research of the resonance properties of Helmholtz resonators // ScienceRise. - 2020. - №4 (69). – С. 10-16.
3. Гринченко В. Т., Вовк И. В. Волновые задачи рассеяния звука на упругих оболочках. – К.: Наукова думка, 1986. – 240 с.
4. Lependin L. F. Acoustics / L. F Lependin. – М.: Higher school, 1978. - 448 p.
5. Акустичні антени. Навчальний посібник / Коржик О.В., Дідковський В.С., Лейко О.Г., Петрищев О.М., Найда С.А., Порошин С.М., - К.: НТУУ “КПІ”, 2013. - 244 с.
6. Боббер Р. Дж. Гидроакустические измерения. – Л.: Судостроение, 1974. – 340 с.
7. Didkovskiy V., Naida S., Zaets V. Experimental study into The Helmholtz resonators' resonance properties over a broad frequency band // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. - 2019. - №5 (97), Vol. 1. - С. 34-39. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.155417.
8. Смаришев М. Д. Гидроакустические антенны. Справочник. - Л.: Судостроение, 1984.— 304 с.

References.

1. Petrishhev, O. N., 2012. *Garmonicheskie kolebaniya p`ezokeramicheskikh e`lementov. Chast` 1. Garmonicheskie kolebaniya p`ezokeramicheskikh e`lementov v vakuume i metod “rezonansa-antirezonansa”*. [Harmonic vibrations of piezoceramic elements. Part 1. Harmonic vibrations of piezoceramic elements in vacuum and the "resonance-antiresonance" method], Kiev: AVERS.
2. Kopytko, Y. et al., 2020. Research of the resonance properties of Helmholtz resonators. *ScienceRise*, №4 (69), pp.10–16.
3. Grinchenko, V.T. & Vovk, I.V., 1986. *Volnovy`e zadachi rasseyaniya zvuka na uprugikh obolochkakh*. [Wave problems of sound scattering on elastic shells], Kiev: Naukova dumka.
4. Lependin, L. F., 1978. *Acoustics*, Moscow: Higher school.
5. Korzhyk, O.V. et al., 2013. *Akustychni anteny. Navchalnyi posibnyk*. [Acoustic antennas. Tutorial] O. V. Korzhyk, ed., Kyiv: NTUU “KPI.”
6. Bobber, R.D., 1974. *Gidroakusticheskie izmereniya*. [Hydroacoustic measurements], Leningrad: Sudostroenie.
7. Didkovskiy, V., Naida, S. & Zaets, V., 2019. Experimental study into The Helmholtz resonators' resonance properties over a broad frequency band. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(№5 (97)), pp.34–39.
8. Smarishev, M.D., 1984. *Gidroakusticheskie anteny`*. *Spravochnik*. [Hydroacoustic antennas. Handbook], Leningrad: Sudostroenie.



Abstract. *The work is devoted to the analysis of the possibility of forming and adjusting of the beam pattern of the receiving interference sound-transparent discrete rectilinear uncompensated acoustic antenna composed of resonating elements - such as Helmholtz resonators.*

The analysis and graphical dependences for the hypothetical situation of formation and regulation of the directivity characteristic taking into account the distribution of acoustic pressures along the axis of the resonating cavity of each of the antenna elements are given.

The aim of the work is to analyze and pre-determine the order of formation and regulation of directivity characteristic receiving acoustic antenna on the basis of wave information about the acoustic field formed in the throat and cavity of the Helmholtz resonator. At the same time, the current pace of development of electroacoustic technology determines the relevance and feasibility of such a task, ensuring the use of analysis results in the development of automated control systems, communication systems etc.

Key words: *Helmholtz resonator, acoustic antenna, resonating cavity, directional characteristics, beam pattern, electroacoustic transducers.*

Науковий керівник: д.т.н., проф. Найда С.А.

Статтю відправлено: 25.01.2021 р.

© Копитько Ю.С.