

Аналіз направлених властивостей кутикової рупорної антени

Шишкова К. А., ORCID [0000-0002-8564-5582](https://orcid.org/0000-0002-8564-5582)

Кафедра акустичних та мультимедійних електронних систем ames.kpi.ua

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», ROR [00syn5v21](https://ror.org/00syn5v21)

Київ, Україна

Анотація—Розглянуто направлені властивості кутикової рупорної антени, а саме вплив хвильових розмірів радіуса рупору на характеристику направленості такої антени. В якості розрахункової моделі обрано вирішення задачі випромінювання звуку в «наскрізній» постановці з урахуванням багатократного відбиття звуку від елементів конструкції. На основі отриманої некінченної системи лінійних алгебраїчних рівнянь поля випромінювання такої антени, отриманий розрахунковий вираз нормованої діаграми направленості. На основі цього виразу показана залежність діаграми направленості від хвильових розмірів кутикової антени. Проведено аналіз розрахованих діаграм направленостей.

Ключові слова — кутикова рупорна антена, направлені властивості, діаграма направленості

I. ВСТУП

Рупорні антени належать до класу апертурних антен до складу яких зазвичай входять відбивач звукових хвиль та електроакустичний перетворювач. В залежності від типу конструкції відбивача розрізняють кутикові та кінцеві рупорні антени. Через простоту виготовлення, високий рівень ККД (близький до 100%), малі втрати, гарна діапазонність обумовила широке використання кутикових рупорних антен застосування в міліметровому, сантиметровому й дециметровому діапазоні [1]

Вона складається з кутикового рупора 1 і розміщеного в його горлі електроакустичного перетворювача 2, зазвичай циліндричного типу (рис. 1). Тильна частина перетворювача зазвичай також покривається відображає звук матеріалом 3.

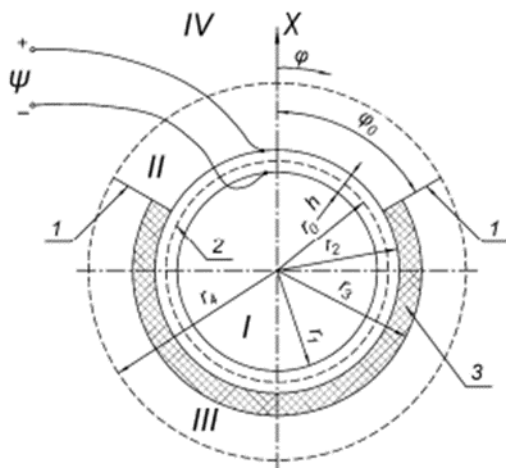


Рис.1 Зображення нормального перерізу кутикової рупорної антени.

При вивченні питання про випромінювання звуку такими антенами, в наш час, використовують два типи розрахункових моделей. При використанні першої моделі [2,3] електроакустичний перетворювач представляється у вигляді еквівалентної електромеханічної схеми. Така модель виправдовує своє використання лише у випадку конкретних проектних робіт, оскільки є певним спрощенням реальної ситуації. Друга модель ґрунтується на використанні всіх математичних співвідношень, що описують процеси перетворення в циліндричному п'єзокерамічних перетворювачів електричної енергії в акустичну

Для варіанту технічної реалізації електроакустичного перетворювача у вигляді кутикової антени обраний другий тип моделі, в якій враховане багатократне відбиття випромінених звукових хвиль від елементів конструкції антени.

Мета роботи: визначення основних закономірностей впливу хвильових розмірів кутикової рупорної антени на її діаграму направленості

II. ЗАДАННЯ ПАРАМЕТРІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідження акустичних властивостей антени будемо проводити у рамках наступних припущень:

Висота кутикової антени h нескінченно велика; розподіл коливальної швидкості на поверхні джерела залежить від координати Z ;

Всі поверхні рупору та тильного екрану випромінювача виконані з ідеально акустично м'якого матеріалу;

Товщина стінок кутикового рупору δ нескінченно мала.

Перше припущення дозволяє суттєво спростити рішення задачі, хоча і являється значною ідеалізацією. Тим не менш така ідеалізація у більшості випадків допустима. Це пояснюється тим, що при висоті антени, що значно перевищує діаметр та довжину випромінюваної хвилі, впливом торців антени, на визначення поля в площині нормальній її повздовжній осі, можливо знехтувати.

Друге припущення пов'язано з тим, що хвильовий опір екрануючих матеріалів, котрі широко використовують у рідкому середовищі, значно нижче хвильового опору води.

Третє припущення введено у зв'язку з тим, що реальна товщина стінок рупору завжди суттєво менша за довжину хвилі. Тим не менш розвинутий у роботі метод дозволяє врахувати кінцеву товщину стінок рупору, якщо апроксимувати кожен з них тонким клином.

З врахуванням прийнятих допущень поле кутикової антени може бути визначено через рішення рівнянь Гельмгольца при наступних умовах :

на внутрішніх стінках рупору :

$$\Phi = 0; |\varphi| = \varphi_0; r_0 \leq r \leq r_1; \quad (2.1)$$

на зовнішніх стінках рупору :

$$\Phi = 0; |\varphi| = \varphi_0; r_2 \leq r \leq r_1; \quad (2.2)$$

На тильному екрані випромінювача:

$$\Phi = 0; \varphi_0 \leq |\varphi| = \pi; r = r_2; \quad (2.3)$$

Ці умови доповнюються відомими умовами випромінювання на нескінченності .

$$\begin{cases} S_n H'_n(kr_1) - \frac{1}{N_n} \sum_q A_q \Delta_q(kr_1) - \frac{1}{N_n} \sum_p C_p \Delta_p(kr_1) N_{np} = \frac{1}{N_n} \sum_q L_q N_{nq} \frac{N_{m_q}(kr_1)}{N'_{m_q}(kr_0)}; \\ A_q \Delta'_q(kr_1) - \frac{1}{N_q} \sum_n S_n H'_n(kr_1) N_{nq} = -L_q \frac{N'_{m_q}(kr_1)}{N'_{m_q}(kr_0)}; \\ C_p \Delta'_p(kr_1) - \frac{1}{N_p} \sum_n S_n H'_n(kr_1) N_{np} = 0; \end{cases} \quad (3.1)$$

Визначимо нормовану діаграму направленості кутикової антени, для того, щоб скориставшись асимптотичним представленням функції Ханкеля при великих значеннях аргументу [4], попередньо перетворивши вираз (1), що визначає зовнішнє поле антени :

$$\Phi_{III} \approx \left(\frac{2}{\pi kr} \right)^{y_2} e^{j(kr - \frac{\pi}{4})} \sum_{n=0}^N S_n e^{j \frac{\pi}{2} n} \cos n\varphi ;$$

$kr \gg 1$
 $kr \gg N$

З урахуванням вище зазначеного виразу отримаємо наближене значення нормованої діаграми направленості:

III. РОЗВ'ЯЗОК ЗАДАЧІ

Рішення сформульованої у попередньому параграфі задачі будемо визначати методом часткових областей. У відповідності до ідеї даного методу розіб'ємо всю область існування поля на три часткові області (рис.1.):

$$\text{I область} \quad |\varphi| \leq \varphi_0; r_0 \leq r \leq r_1;$$

$$\text{II область} \quad \varphi_0 \leq |\varphi| = \pi; r_2 \leq r \leq r_1;$$

$$\text{III область} \quad 0 \leq |\varphi| = \pi; r \geq r_1;$$

Координатна поверхня $r = r_1$ у данному випадку є границею розділу областей. Потенціал швидкості що створюється кутиковою антеною, тепер може бути представлений через потенціали швидкостей у кожній з вказаних часткових областей, загальний вид котрих визначається за методом власних функцій:

$$\Phi_I = \sum_q \left[A_q I_{m_q}(kr) + B_q N_{m_q}(kr) \right] \cos(m_q \varphi);$$

$$\Phi_{II} = \sum_p \left[C_p I_{m_p}(kr) + D_p N_{m_p}(kr) \right] \cos[m_p(\pi - \varphi)];$$

$$\Phi_{III} = \sum_n S_n H_n^{(2)}(kr) \cos n\varphi;$$

де $q = 0, 1, 2, \dots; p = 0, 1, 2, \dots; n = 0, 1, 2, \dots;$

$I_m(kr); N_m(kr); H_n^{(2)}(kr)$ - функції Беселя, Неймана та Ханкеля 2-го роду відповідно; $A_q; B_q; C_p; D_p; S_n$ - комплексні коефіцієнти .

Часова залежність для Φ_{III} обрано у формі $\exp(-j\omega t)$. Вирази для потенціалів швидкості Φ_I та Φ_{II} задовільняють хвильове рівняння при довільних m_q та m_p .

З урахуванням всіх скорочень та перетворень, а також з умовою неперервності поля на границі часткових областей отримаємо нескінченну систему лінійних алгебраїчних рівнянь :



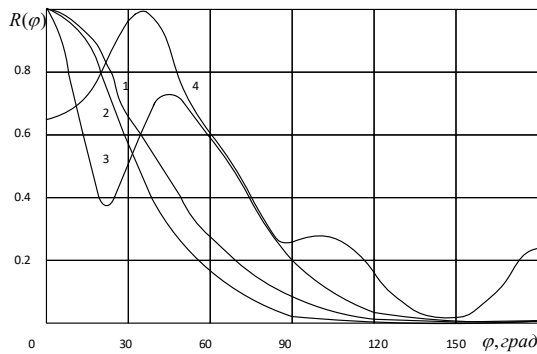


Рис.2 Діаграми направленості для випадку $kr_0 = 4,52$, $kr_1 = 6,9$, $r_2 = 1,1r_0$

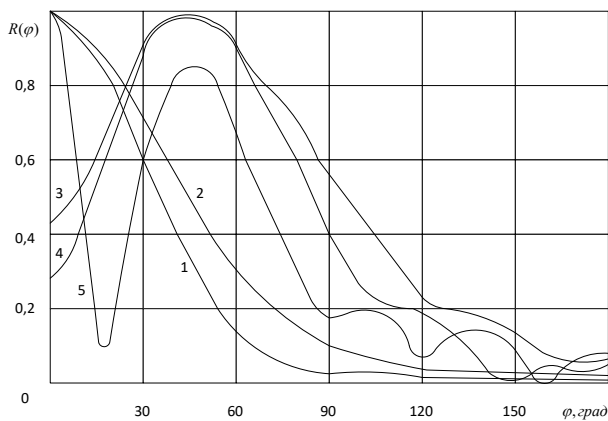


Рис.3 Діаграми направленості для випадку $kr_0 = 2,26$, $kr_1 = 3,5; 4,14; 4,77; 5,39; 8,54$; $\varphi_0 = \frac{3}{8}\pi$;

$$R(\varphi) = \frac{\left| \sum_{n=0}^N S_n e^{-j\frac{\pi}{2}n} \cos n\varphi \right|}{\left| \sum_{n=0}^N S_n e^{-j\frac{\pi}{2}n} \cos n\varphi_{\max} \right|}$$

де φ_{\max} напрямлення максимальної інтенсивності випромінювання.

IV. НАПРАВЛЕНІ ВЛАСТИВОСТІ АНТЕНИ

Вивчення особливостей направлених властивостей кутикової антени шляхом безпосереднього аналізу виразу не виявляється можливим. Тому таке вивчення будемо вести на основі розрахункових діаграм направленості, отриманих за допомогою ЕЦВМ для широкого діапазону хвильових розмірів та геометричних характеристик кутикової антени.

Діапазон зміни хвильових розмірів радіусу циліндричного випромінювача $kr_0 \approx 1,5 - 4,5$ обирався з врахуванням того, щоб вивчити властивості антени, сконструйованої на основі найбільш вживаних в теперішній час циліндричних електроакустичних

перетворювачів з п'єзокераміки складу типу ТБК-3, ЦТС-19, ЦТБС-3 та інші [34,72], котрі працюють в області частот механічного резонансу (нульової та першої моди). Верхня межа хвильових розмірів кутикової антени рупору kr_1 обмежується величиною 18, а нижня межа обирається з умови $kr_1 > kr_0$. Кут напіврозкриття кутикового рупору φ_0 змінився в межах від $\frac{\pi}{8}$ до $\frac{\pi}{2}$. При всіх розрахунках обирався рівномірний розподіл коливальної швидкості на поверхні випромінювача

Перейдемо тепер до аналізу направлених властивостей кутикової антени. Оскільки у цьому випадку кутикова антена характеризується змінними r_0, r_1 та φ_0 , кількість діаграм направленості, необхідних для проведення вичерпного аналізу направлених властивостей антени, значно зростає. У зв'язку з тим обмежимося розглядом одного випадку, коли $r_2 = 1,1r_0$. Таке співвідношення r_2 та r_0 у достатній мірі характерно для більшості кутикових антен, що використовуються на практиці [3].

Описуючи направлені властивості кутикових антен в цілому, можливо сказати, що діаграма направленості при $r_2 \neq r_1$ та $r_2 = 1,1r_0$ по формі стає складнішою. У ній з'являються, наприклад, бокові та тильні пелюстки; при деяких кутах φ_0 спостерігаються розщеплення основного пелюстки. У певній мірі цього слід було очікувати, поскільки ускладнення конфігурації антени повинні приводити до більш складніших дифракційних явищ. На рис.2 наведено декілька діаграм направленості для випадку $kr_0 = 4,52$, $kr_1 = 6,9$, $r_2 = 1,1r_0$. Кривим 1,2,3,4 відповідає кут $\varphi_0 = \frac{\pi}{6}; \frac{\pi}{4}; \frac{\pi}{3}; \frac{\pi}{2}$. При проведенні кількість коефіцієнтів S_n обмежувалось 12, а кількість коефіцієнтів A_q та C_p обирались з співвідношення $m_q, m_p \leq 12$.

Зупинимось більш детально на направлених властивостях антени. На рис.3 наведені діаграми направленості, для одного з найбільш несприятливих, у цьому сенсі, кутів кривим 1,2,3,4,5 відповідають значення. Слід зауважити, що спостерігається різко виражена залежність форми діаграми направленості від величини хвильового розміру рупору kr_1 . Це проявляється в тому, що основний пелюсток розщиплюється на два або навіть на три пелюстки, а також у збільшенні загальної порізаності діаграми направленості.

ВИСНОВОК

Для варіанту технічної реалізації електроакустичного перетворювача у вигляді кутикової антени розв'язана задача випромінювання звуку такою антеною. Для цього методом зв'язних полів в багатозв'язних областях розв'язано рівняння Гельмгольца при граничних умовах, відповідаючи фізичній моделі

антени та одержані аналітичні співвідношення для визначення акустичних полів у всіх часткових областях Розв'язок рівняння Гельмгольца зведено до розв'язку нескінченної системи лінійних алгебраїчних рівнянь.

На основі одержаних співвідношень проведені широкі числові експерименти відповідно діаграм направленості антен. Аналіз їх результатів дозволив встановити закономірності змін цих параметрів в залежності від хвильових розмірів джерела звуку.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Didkovskij V.S., Poroshin S.M., Lejko O.G., Lejko A.O., Drozdenko O.I., Konstruyuvannya elektroakustichnih priladiv i sistem dlya multimedijnih akustichnih tekhnologij., Harkiv, 2013, p. 390 S.
- [2] P. A. Borisejko, B. C. Martynenko, A. F. Ulitko "K teorii kolebanij p'ezokeramicheskikh obolochek", Kiev: Matem. fizika, 1997, pp. 71-76.
- [3] Grinchenko V. T., Vovk I. V., Maczipura V. T., Osnovi akustiki, K.: Nauk. dumka, 2007, p. 640.
- [4] T. Oishi, B. Aronov, D. A. Brown II "Broadband multimode baffled piezoelectric cylindrical shell transducers", *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 121, no. 6, pp. 3465-3471, 2007.

Надійшла до редакції 08 квітня 2021 р.

UDC 534.6

Analysis of Directional Properties of Angular Horn Antenna

K. A. Shyshkova, ORCID [0000-0002-8564-5582](https://orcid.org/0000-0002-8564-5582)

Department of Acoustic and Multimedia Electronic Systems ames.kpi.ua

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", ROR [00syn5v21](https://ror.org/00syn5v21)
Kyiv, Ukraine

Abstract—In this paper, horn antennas are considered to belong to the class of aperture antennas which usually include a sound wave reflector and an electroacoustic transducer. For the variant of technical implementation of the electroacoustic transducer in the form of a corner antenna, the problem of sound emission by such an antenna is solved. Taking into account the repeated reflection of emitted sound waves from the antenna design elements. The study of the acoustic properties of such an antenna was carried out taking into account a number of assumptions. What material, the thickness of the walls of the mouthpiece is infinitesimal. These conditions are supplemented by the known conditions of radiation at infinity. All the above assumptions make it possible to greatly simplify the solution of the problem of sound radiation by an angular horn antenna.

To do this, the Helmholtz equation under boundary conditions was solved by the method of connected fields in multi-connected domains, corresponding to the physical model of the antenna. The radiation field of such an antenna is presented in the form of three partial regions, which in turn, according to the method of partial regions - in the form of Fourier series expansions, the coefficients of which are determined by solving differential equations describing piezoceramic transducer oscillations and wave processes. in acoustic environments in contact with it. The solution of the Helmholtz equation is reduced to the solution of an infinite system of linear algebraic equations taking into account the above assumptions, as well as the conditions of field continuity at the boundary of partial domains, we obtain an infinite system of linear algebraic equations. Based on the system, an approximate expression for the normalized radiation pattern is obtained.

Studying the features of the directional properties of the angular antenna by direct analysis of the expression is not possible. Therefore, such a study was carried out on the basis of calculated directivity diagrams obtained using a computer for a wide range of wave sizes and geometrical characteristics of the angular antenna. cylindrical electroacoustic transducers. In all calculations, a uniform distribution of the oscillating velocity on the surface of the emitter was chosen

Analyzing the obtained data, there is a pronounced dependence of the shape of the pattern on the magnitude of the wave size of the speaker. This is manifested in the fact that the main petal splits into two or even three petals, as well as in increasing the overall sharpness of the pattern.

Keywords — angular horn antenna; directional properties; directional diagram

DOI: [10.1121/1.2722053](https://doi.org/10.1121/1.2722053)

- [5] Smaryshev M.D., Napravlennost' gidroakusticheskikh antenn, L.: Sudostroenie, 1973, p. 277.
- [6] Z. T. Gusak, A. G. Lejko, « "Radiation field angled horn antenna with a piezoceramic transducer with radial polarization" » *Electron. Commun.*, vol. 19, no. 2, pp. 75-81, 2014.
DOI: [10.20535/2312-1807.2014.19.2.142208](https://doi.org/10.20535/2312-1807.2014.19.2.142208)
- [7] Husak, Z. T., Leiko, O. H., & Kandrachuk, I. V. «The properties of mechanical fields of shielded sonar radiators with power structure depending on parameters of shield" *Electronics and Communications*, vol. 21, no. 1, pp. 27-35, 2016. DOI: [10.20535/2312-1807.2016.21.1.50650](https://doi.org/10.20535/2312-1807.2016.21.1.50650)
- [8] Chatterjee R., Narayanan K.G., and Kumar A., «Radiation Characteristics of Rectangular Solid Dielectric Horns,» *Proc. Inst. Elect. Eng. 7th Int. Conf. on Antennas and Propagation (ICAP)*, vol. 1, pp. 109-112, Apr. 1991. ISBN: 0-85296-508-7.
URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/98188>
- [9] Salema C., Fernandes C., and Jha R. K., *Solid Dielectric Horn Antenna*, Artech House: MA, 1998.
- [10] Lee K.-H., Chen C.-C., Lee R., «UWB Dual-Linear Polarization Dielectric Horn Antennas as Reflector Feeds,» *IEEE Trans., V.AP.* vol. 55, no. 3, p. 798, 2007.
DOI: [10.1109/TAP.2007.891804](https://doi.org/10.1109/TAP.2007.891804)

