

УДК 621.647.23

# Експериментальне дослідження впливу рупора на чутливість ультразвукового далекоміра

Лемежа В. О., Шулъга А. В.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна

E-mail: [vl@defhat.com](mailto:vl@defhat.com)

Розглянуто завдання, де виникає необхідність вимірювання точної відстані між об'єктами. Встановлено, що ефективними для вимірювання відстані є ультразвукові далекоміри завдяки їхній безконтактній роботі, високій точності, широкому діапазону вимірювань та здатності функціонувати в різних умовах. Використання рупора в ультразвукових далекомірах є досить поширеною практикою, оскільки вони дозволяють підвищити їх чутливість. Відомо, що існує багато різних типів рупорів, які відрізняються формою, розмірами та матеріалами. Однак, найпоширенішими з них є конічні рупори, які не вимагають складності при виготовленні та мають досить низьку вартість. Зпроектовано та виготовлено за допомогою 3D-друку шість варіантів дослідних рупорів з довжиною від 10 мм до 60 мм. Розроблено експериментальний стенд з поворотною платформою, який має приймача та передавача, між якими вимірюється відстань та діаграми спрямованості звукового тиску. Експериментальні дослідження проводились на відстанях від одного до трьох метрів з інтервалом 0.5 метра. Оброблено всі результати вимірювання та побудовані діаграми спрямованості для всіх випадків, використовуючи один з виготовлених рупорів. Представлено діаграми спрямованості саме для мінімальної і максимальної відстаней обраного діапазону. Дослідження показало, що застосування рупора довжиною 50 або 60 мм призвело до підвищення рівня звукового тиску на 10 дБ відносно вимірювань без рупора. Але при зменшенні довжини рупора менше 40 мм спостерігається зниження ефективності випромінювання звуку. Це пояснюється порушенням оптимальних умов для формування звукової хвилі, що призводить до втрат енергії та розширення діаграми спрямованості. Обґрунтовано вибір довжини рупора, при якій не відбуваються падіння ефективності випромінювання звукових хвиль.

*Ключові слова:* ультразвук; рупор; інтенсивність; далекомір; п'єзоелектричний перетворювач

DOI: [10.20535/RADAP.2024.97.30-37](https://doi.org/10.20535/RADAP.2024.97.30-37)

## Вступ

В сучасному світі вимірювання відстані між двома об'єктами є актуальною задачею, яка розглядається у різних галузях. Так, наприклад, у геодезії це потрібно для вимірювання відстаней та висот на місцевості, визначення координат точок та створення топографічних карт [1]. В будівництві – для вимірювання відстаней, висот та площ, контролю за ходом будівництва та для розбивки осей споруд [2]. У військовій справі – визначення відстані до цілі для артилерії, танків, стрілецької зброї, розвідки та спостереження за полем бою і наведення зброї та ракет [3,4]. Також, вимірювання відстані потрібне в інших сферах діяльності, наприклад, морській та повітряній навігації, астрономії, археології, дослідженнях природи та інше.

На сьогоднішній день відомо декілька методів вимірювання відстані. Найбільш поширеними є радіометричний, оптичний та ультразвуковий. Кожен з цих методів має свої переваги і обмеження. Оптичний метод має найбільшу точність, але використа-

ння його під час дощу, задимленості або пильового забруднення є неможливим у зв'язку з великим затуханням розсіювання світла [4]. Радіометричний метод ближньої радіолокації позбавлений цих недоліків, але є чутливим до електричних властивостей, а саме – провідності, діелектричної та магнітної проникності матеріалу поверхні, до якої вимірюється відстань. Це знижує точність вимірювання, та змушує переходити на більш високі частоти, що в свою чергу доволі суттєво підвищує вартість обладнання. Ультразвуковий метод вимірювання, внаслідок наявності загасання ультразвукових хвиль в атмосфері, придатний до вимірювання відносно невеликих відстаней, але при цьому він мало чутливий до складу середовища, в якому проводиться вимірювання, та властивостей поверхні, до якої проводиться вимірювання відстані. І вартість обладнання порівняно невисока.

Тому доцільними у використанні є ультразвукові далекоміри [5,6], які вимірюють відстань до об'єкта, оскільки вони мають такі переваги як безконтактність, точність, широкий діапазон вимірювань,

незалежність від освітлення, портативність, можливість роботи в екстремальних умовах, багатофункціональність, доступність та низька вартість. Їх дія ґрунтується на відправленні звукового імпульсу та реєстрації часу його повернення після відбиття від об'єкта. В свою чергу, постає питання до чутливості далекоміра, тобто його здатності виявляти слабкі сигнали, що визначає максимальну відстань вимірювань [7]. Для досягнення максимальної дальності вимірювань необхідно оптимізувати конструкцію ультразвукового датчика.

Метою даного дослідження є визначення доцільних розмірів акустичного рупора для формування вузької діаграми спрямованості ультразвукового випромінювача. Це дозволить підвищити дальність та точність вимірювань відстаней в умовах, де традиційні методи неефективні.

Тому необхідно виконати такі задачі:

- розробити методика експериментального дослідження діаграм спрямованості ультразвукових випромінювачів з різними типами рупорів;
- зробити порівняльний аналіз ефективності різних типів рупорів та визначення оптимальних конструкцій для конкретних умов застосування.

## 1 Аналіз попередніх досліджень акустичних характеристик рупорів далекомірів

Одним з ключових питань вимірювання відстані є формування вузької діаграми спрямованості ультразвукового випромінювача. Це дозволить зменшити вплив відбиттів від сторонніх об'єктів та підвищити точність вимірювань. Однак, стандартні п'єзоелектричні перетворювачі, які широко використовуються в ультразвукових датчиках, зазвичай мають широкую діаграму спрямованості. Щоб змінити цю діаграму необхідно застосувати акустичні рупори. Рупор дозволяє узгодити хвильовий опір випромінювача та середовища, фокусуючи звукову енергію в потрібному напрямку. Однак, традиційні розрахунки розмірів рупорів не підходять для ультразвукових частот, оскільки довжина хвилі ультразвуку часто співмірна з розмірами самого випромінювача [8].

Використання рупора в ультразвукових далекомірах дозволяє значно підвищити їх чутливість. Даною тематикою займається багато провідних вчених України та за її межами. Наприклад, наукова школа Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара під керівництвом Сокол Г. І. вивчає та досліджує акустичні характеристики у рупорах на інфразвукових частотах [9, 10]. Професор

Донський Д. та його команда з Технологічного інституту Стівенса (США) займаються акустичними рупорами, за допомогою яких забезпечують підсилення звуку та зменшення шуму потоку [11–13]. Однак саме оптимальні розміри рупорів не було досліджено.

В свою чергу, діаграма спрямованості є одним з ключових параметрів, який характеризує роботу ультразвукового далекоміра. Вона відображає просторовий розподіл звукового тиску та зазвичай представлена у вигляді двовимірної або тривимірної діаграми [14–17].

При необхідності більш точного опису діаграм спрямованості ультразвукових сенсорів можна класифікувати їх за формою головного пелюстка (однопелюсткові та багатопелюсткові), за шириною головного пелюстка (вузьконаправлені та широконаправлені) та за формою бічних пелюстків (високі та низькі).

Слід також відзначити, що на діаграму спрямованості впливають такі фактори, як частота звуку (чим більш високі частоти, тим вужчий кут випромінювання), розмір самого датчика (більший датчик має ширший кут випромінювання), і, звичайно, сама форма датчика.

## 2 Методика і результати експериментальних досліджень

Сучасні технології дозволили створити звукові сенсори, які можуть не лише пасивно сприймати звуки, але й активно впливати на звукове середовище. Це відкриває нові горизонти в різних галузях, від промисловості до медицини. Такі сенсори можуть перемикатися між режимами передавача і приймача. В режимі передачі вони генерують звукові хвилі, а в режимі прийому – аналізують відбиті або інші звукові сигнали. Зазвичай для цього використовуються п'єзоелектричні елементи, які здатні перетворювати механічні коливання (звук) на електричні сигнали і навпаки.

Для поширення сигналу від пристрою на більшу відстань, зменшення впливу перешкод та забезпечення більшої точності визначення напрямку на об'єкт, необхідно сформулювати більш вузький промінь випромінювання (більш вузьку форму діаграми спрямованості).

Для поставленої задачі вирішено скористатися методом рупорних систем, оскільки вони є ефективним інструментом для фокусування енергії, особливо в акустиці та електромагнітних хвилях.

Наступним етапом слід підібрати тип рупора. Існує багато різних їх типів, які відрізняються формою, розмірами та матеріалами. Однак, найпоширенішими є експоненціальні, гіперболічні та конічні рупори (Рис. 1).

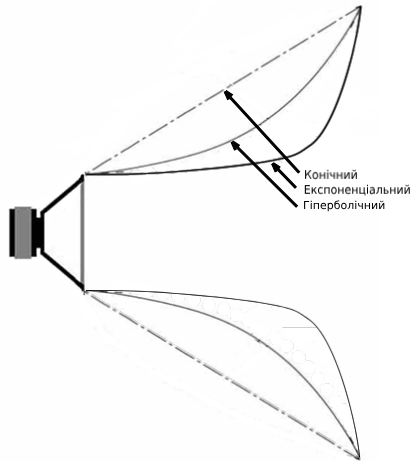


Рис. 1. Схематичне зображення найрозповсюджених типів рупорів

Порівняно з іншими типами рупорів, такими як експоненціальні [18] та гіперболічні, конічні рупори [19] відзначаються більш простою конструкцією і більш широким застосуванням. Тому для експерименту було обрано саме таку форму. Конічні рупори (Рис. 2) відносно прості у виготовленні і мають порівняно невисоку вартість.

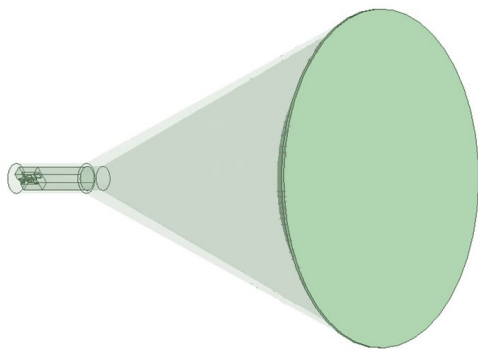
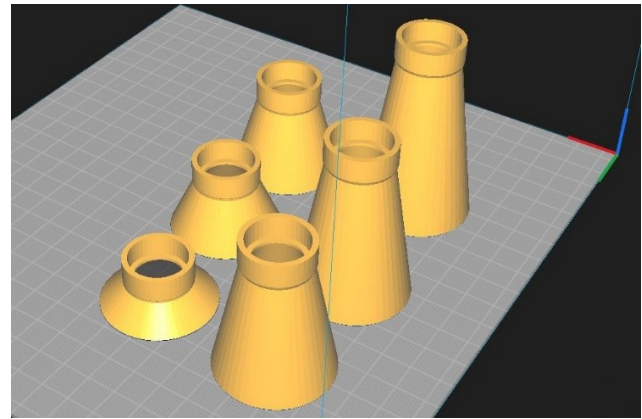


Рис. 2. Конічний рупор RM-LHA85115-30 [19]

Питання раціональних розмірів рупора, зокрема його довжини та діаметра рупорної частини, за умови використання конкретного сенсора, залишається відкритим. Тому було спроектовано в середовищі SolidWorks декілька варіантів рупору (Рис. 3а) та виготовлено за допомогою 3D-друку (Рис. 3б). Надруковано шість різних варіантів рупорів. Всі запропоновані конструкції мають однаковий діаметр вхідного отвору, що відповідає діаметру встановленого перетворювача, та однаковий діаметр вихідного отвору, рівний 45 мм, що пов'язано з конструктивними особливостями давача, який розробляється. Однак, довжини цих рупорів взято кратним 10 мм, тобто маємо рупори з довжиною 10 мм, 20 мм, 30 мм, 40 мм, 50 мм та 60 мм.



(а)



(б)

Рис. 3. Рупори для експерименту:  
(а) – змодельовані рупори для 3D-друку;  
(б) – прототипи рупорів

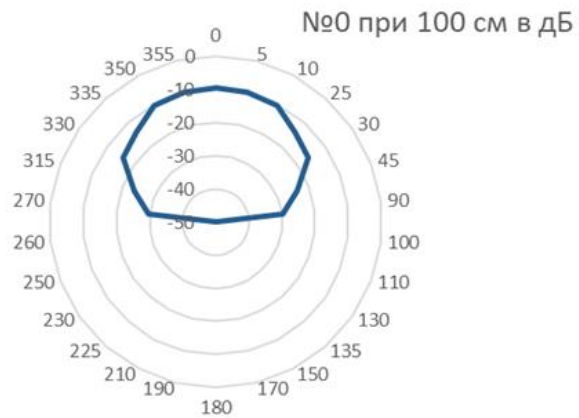
Експерименти проведені на стенді, який представлено на рисунку 4.

Для експериментального стенду було розроблено вузькочастотний акустичний випромінювач, який закріплено на поворотній платформі з точністю позиціонування 0.1 градуса. Платформа забезпечує обертання в горизонтальній площині в діапазоні від 0 до 360 градусів. Для зняття діаграми спрямованості використовується ультразвуковий перетворювач, який обертається на поворотній платформі навколо своєї осі. В дальній зоні на фіксованій відстані розташовується ультразвуковий перетворювач, який виконує роль сенсора.

Для початку було виконано дослідження, де приймач і передавач розташовані на відстані 1 метр. Змінними у цьому дослідженні були рупори. Результатом вимірювання стали діаграми спрямованості, які показані на рисунку 5.



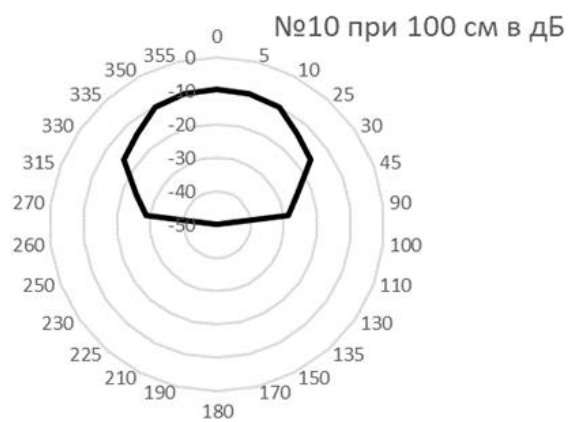
(а)



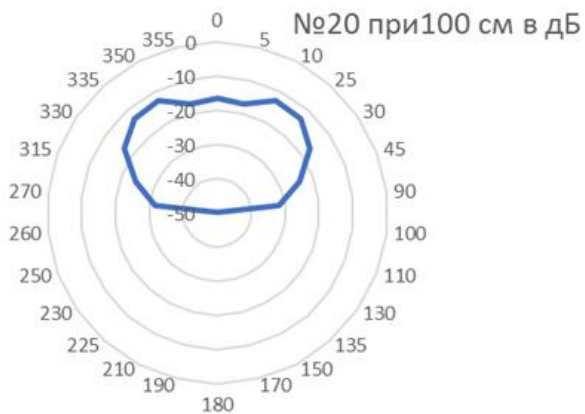
(а)



(б)

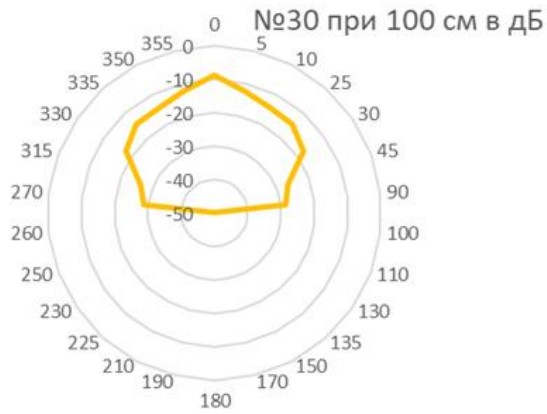


(б)

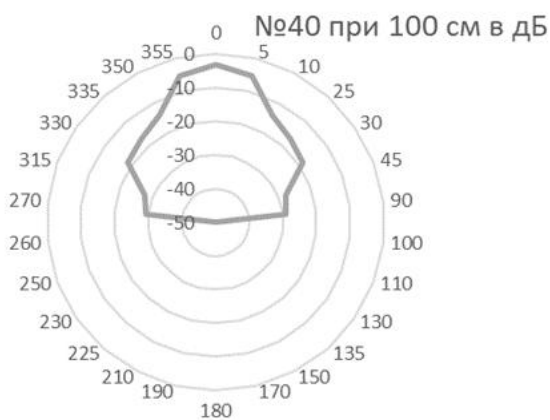


(в)

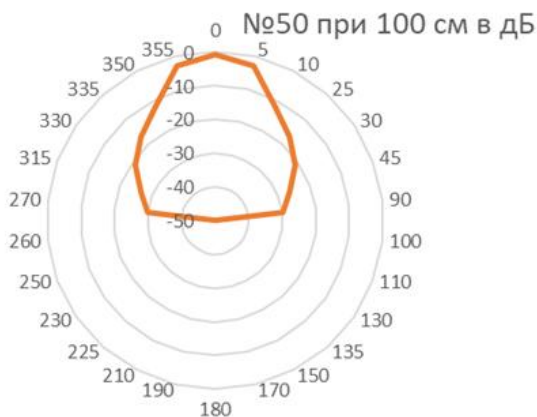
Рис. 4. Експериментальний стенд:  
 (а) – закріплений приймач,  
 (б) – закріплений передавач



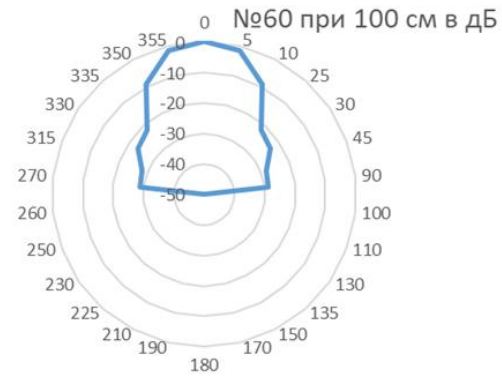
(г)



(д)



(е)

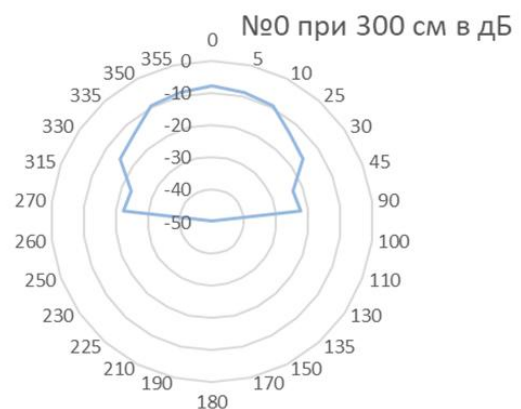


(е)

Рис. 5. Діаграми спрямованості для різних за довжиною рупорів на відстані 1 метр: (а) – без рупора; (б) – рупор довжиною 10 см; (в) – рупор довжиною 20 см; (г) – рупор довжиною 30 см; (д) – рупор довжиною 40 см; (е) – рупор довжиною 50 см; (є) – рупор довжиною 60 см

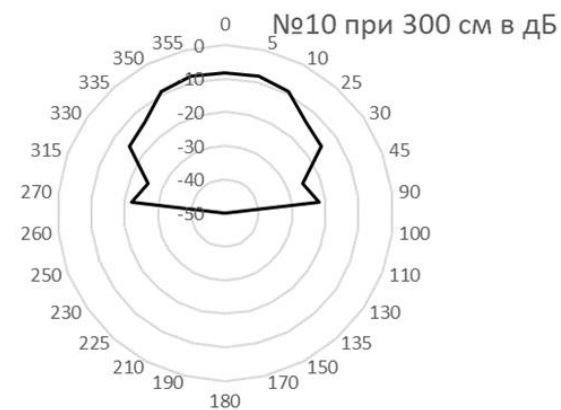
Віднормувавши дані результати за максимальним значенням тиску і побудувавши діаграми спрямованості видно, що при довжині рупора 50 мм і 60 мм затухання звукового тиску дорівнюють 0 дБ. Зменшення довжини рупора до 40 мм призводить до затухання звукового тиску на 3 дБ, що відповідає приблизно дворазовому зменшенню амплітуди звукових коливань. При використанні рупора довжиною 30 см спостерігається значне затухання звукового тиску на 10 дБ, що вказує на різке зменшення ефективності випромінювання. Аналогічна тенденція до затухання звукового тиску спостерігається при подальшому зменшенні довжини рупора, як з використанням додаткових експериментальних даних, так і без них.

Для більш ясної картини було проведено експерименти на відстані 1,5 м, 2 м, 2,5 м, 3 м. І для наглядності представимо результати для найбільшої відстані (Рис. 6).

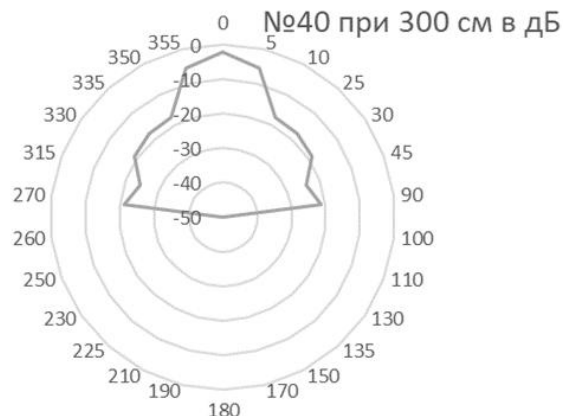


(а)

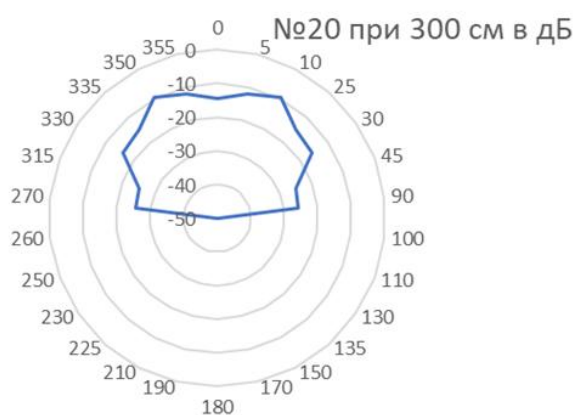




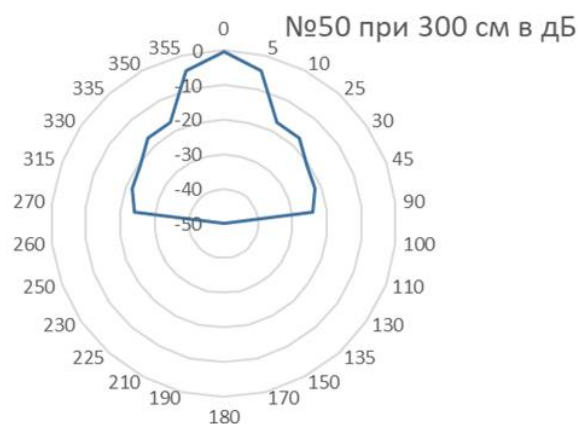
(б)



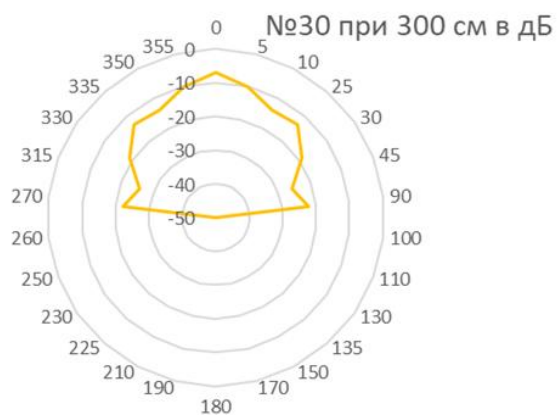
(д)



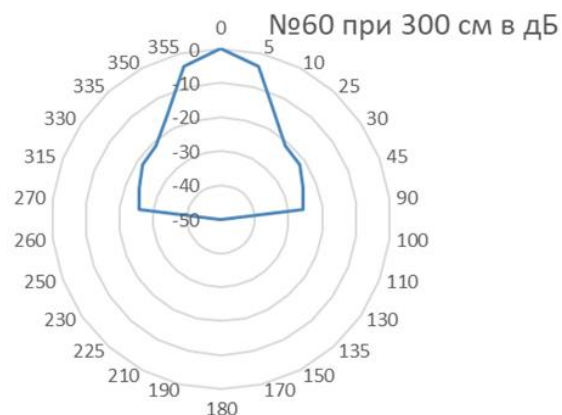
(в)



(е)



(г)



(е)

Рис. 6. Діаграми спрямованості для різних за довжиною рупорів на відстані 3 метра: (а) – без рупора; (б) – рупор довжиною 10 см; (в) – рупор довжиною 20 см; (г) – рупор довжиною 30 см; (д) – рупор довжиною 40 см; (е) – рупор довжиною 50 см; (е) – рупор довжиною 60 см

## Висновки

Проведені експерименти демонструють значний вплив довжини рупора на рівень звукового тиску та формування діаграми спрямованості. Без використання рупора рівень звукового тиску був на 10дБ нижчим порівняно з випадком використання рупора довжиною 50 або 60 мм. В цьому разі таке значення підвищення звукового тиску на осі випромінювача досягається за рахунок звуження діаграми спрямованості, тобто концентрації звукової енергії в певному напрямку.

Однак, при зменшенні довжини рупора нижче 40 мм спостерігається тенденція до зниження ефективності. Це пов'язано з тим, що при надто коротких рупорах порушується оптимальний режим випромінювання звукових хвиль, що призводить до втрат звукової енергії та розширення діаграми спрямованості.

Таким чином, для забезпечення максимального рівня звукового тиску на відстані один та три метри при мінімальних розмірах системи, оптимальною довжиною рупора є 50 мм. Цей результат свідчить про те, що існує певна оптимальна довжина рупора для кожної конкретної акустичної системи, яка залежить від таких факторів, як частотний діапазон та розміри випромінювача.

## References

- [1] Filipiak-Kowszyk D., Janowski A. et al. (2016) The Geodetic Monitoring of the Engineering Structure – A Practical Solution of the Problem in 3D Space. *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, Vol. 102, Iss. 1. doi: 10.1515/rgg-2016-0024.
- [2] Martinez J., Ordonez C., Arias P., Armesto J. (2011). Non-contact 3D Measurement of Buildings through Close Range Photogrammetry and a Laser Distance Meter. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, No 8, pp. 805-811. doi:10.14358/PERS.77.8.805.
- [3] Laznya O., Dorofeev N. and Melnyk B. (2021). Justification of technical requirements for the sight anti-tank artillery. *Social Development and Security*, No 11(3), pp. 140-147. doi:10.33445/sds.2021.11.3.13.
- [4] Tur O. H., Savvova O. V., Fesenko O. I. (2023). Suchasni napriamky stvorennia materialiv dlia lazernoi tekhniki viiskovoho pryznachennia. Modern research in world science. *Proceedings of the 11th International scientific and practical conference. SPC "Sci-conf.com.ua"*, Lviv, Ukraine., pp. 21-27.
- [5] Choi, Kyeung-Sik et al. (2013) Ground Altitude Measurement Algorithm using Laser Altimeter and Ultrasonic Rangefinder for UAV. *Journal of Advanced Navigation Technology*, No 17(6), pp. 749-756.
- [6] McRoberts, M. (2010). *Ultrasonic Rangefinders*. Chapter In: *Beginning Arduino*, pp 293–315. Apress, Berkeley, CA. doi:10.1007/978-1-4302-3241-4\_14.
- [7] Sokolskyi S. O., Movchanyuk A. V. (2023). Electro-Acoustic Path of the Detector for Detection of Small Unmanned Aerial Vehicles. *Visnyk of Vinnytsia Polytechnical Institute*, No 2, pp. 135-144. doi:10.31649/1997-9266-2023-167-2-135-144.
- [8] Luhovskiy O. F., Movchaniuk A. V. et al. (2021). Aparatne zabezpechennia ultrazvukovykh kavitatsiinykh tekhnolohii: monohrafia. *Kyiv: KPI im. Ihora Sikorskoho*, 216 p.
- [9] Sokol G. I., Kotlov V. Yu., Mironenko E. S., Kirichenko S. Yu. (2021). Study on Infrasonic Propagation of Finite Amplitude Wave in the Big Size Horn. *New Approaches in Engineering Research*, Vol. 13, pp. 110-119, doi:10.9734/bpi/naer/v13/12106D.
- [10] Sokol G. I. (2003). Osoblyvosti poshyrennia potuzhnykh zvukovykh syhnaliv u ruporakh [Features of the propagation of powerful sound signals in horns]. *Journal "Acoustic Bulletin"*, Vol. 6, pp. 67–73.
- [11] Donskoy D. M. and Cray B. A. (2012). Acoustic particle velocity horns. *J. Acoust. Soc. Am.*, No 131(5), pp. 3883–3890. doi:10.1121/1.3702432.
- [12] Donskoy D. M. and Cray B. A. (2011). Horn as a particle velocity amplifier. *J. Acoust. Soc. Am.*, No 130(5), pp. EL311–EL315. doi:10.1121/1.3642644.
- [13] Donskoy D. and Hassan S. E. (2014). Sound amplification and flow noise reduction with acoustic velocity horns. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 135(4):2396. DOI:10.1121/1.4877932.
- [14] Libertario Demi (2018). Practical Guide to Ultrasonic Beam Forming: Beam Pattern and Image Reconstruction Analysis. *Appl. Sci.*, No 8(9), pp. 7-12. doi:10.3390/app8091544.
- [15] Szabo T. L. (2013). *Diagnostic Ultrasound Imaging: Inside Out*, 2nd ed.; Elsevier: New York, USA.
- [16] Cobbolt R.S.C. (2006). *Foundation of Biomedical Ultrasound*. Oxford University Press: Oxford, UK, 2006.
- [17] Ramalli A., Boni E., Savoia A. S., Tortoli P. (2015). Density-tapered spiral arrays for ultrasound 3-D imaging. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, Vol. 62, Iss. 8, pp. 1580–1588. doi: 10.1109/TUFFC.2015.007035.
- [18] Daniyan O. L., Opara F. E. et al. (2014). Design and Fabrication of a Prototype Exponential Horn Antenna for L - Band Applications. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Vol. 4, Iss. 7, pp. 18-20.
- [19] *RF Microwave Solution*, access data 09.2024.

## Experimental Study of Horn Influence on Sound Ranger Sensitivity

Lemekha V. O., Shulga A. V.

The tasks where it is necessary to measure the exact distance between objects are considered. Ultrasonic rangefinders have been found to be the most effective for distance measurement due to their non-contact operation, high accuracy, wide measurement range and ability to function in various conditions. The use of a horn in ultrasonic rangefinders is a fairly common practice, as they allow to significantly increase their sensitivity. It is known that there are many different types of horn that differ in shape, size and materials. However, the most common of them are conical horns, which do not require complexity in manufacturing and have a fairly low cost. Six variants of experimental horns with lengths ranging from 10 mm to 60 mm were designed and manufactured using 3D printing. An experimental stand with a rotating platform has been

developed, which has a receiver and a transmitter between which the distance and sound pressure directional diagrams are measured. Experimental studies were carried out at distances from one to three meters with an interval of half a meter. All measurement results were processed and directional diagrams were constructed for all cases using one of the manufactured horns. Directional diagrams are presented for the minimum and maximum distances of the selected range. The study showed that the use of a horn with a length of 50 or 60 mm resulted in an increase in sound pressure level

by 10 dB compared to measurements without a horn. But when the length of the horn is reduced to less than 40 mm, there is a decrease in the efficiency of sound emission. This is explained by the violation of optimal conditions for the formation of a sound wave, which leads to energy losses and expansion of the directional pattern. The most rational length of the horn, at which there is no drop in the efficiency of the emission of sound waves, is substantiated.

*Keywords:* ultrasound; horn; intensity; sound ranger; piezoelectric transducer