

УДК 534.864

С.А. Луцьова, І.М. Санжара

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

## ДО ПИТАННЯ СТВОРЕННЯ НЕНАПРАВЛЕНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ЗВУКУ ПЛОСКИМИ МАСИВАМИ ГУЧНОМОВЦІВ

Проаналізовані можливі конфігурації плоских масивів гучномовців, коефіцієнти збудження яких задаються на основі набору функцій Бесселя. Виявлені переваги побудови прямокутних масивів, в яких використовуються лінійні масиви Бесселя по горизонталі і вертикалі.

**Ключові слова:** масив Бесселя, характеристика направленості, діаграма направленості, гучномовець, функції Бесселя першого роду.

### Вступ

Масиви випромінювачів в сучасній акустиці застосовують достатньо часто. Здебільшого широко використовуються лінійні масиви, зокрема криволінійні, для озвучення великих за площею приміщень і відкритих просторів [1]. Плоскі масиви гучномовців здатні ще більше підвищити загальну потужність випромінювання, але виникає питання щодо розподілу створюваного звукового тиску в просторі. Справа в тому, що поєднання окремих гучномовців у масив значно загострює направленість випромінювання, що звужує розміри озву чуваної площі.

Отже, бажано створити у вертикальній і горизонтальній площинах приміщення діаграму направленості випромінювання масиву подібну до направленості одного гучномовця. В результаті виник інтерес до створення акустичних масивів «ненаправленого» випромінювання. Можливий підхід до вирішення проблем полягає у виборі коефіцієнтів збудження гучномовців у відповідності до значень набору функцій Бесселя першого роду порядку  $m$  [2, 3].

В той час, як обговоренню направлених властивостей так званого лінійного масиву Бесселя присвячена значна кількість робіт, в тому числі [2 – 5], формування розподілу звукового тиску аналогічного плоского масиву в повній мірі не досліджено і його «ненаправлені» властивості здебільшого знаходяться на рівні припущення. У зв'язку з цим, виникає потреба у створенні аналітичного апарату для розрахунків плоских масивів Бесселя прямокутної конфігурації, побудованих з окремих гучномовців.

### Постановка задачі

Ідея формування масивом випромінювачів звукового поля, подібного до поля одного гучномовця, базується на можливості певним чином задати амплітудно-фазові коефіцієнти збудження випромінювачів звуку [2]:

$$P(\theta, r) = R_1(\theta) \frac{e^{-ikr}}{r} \sum_{m=-M}^M x_m e^{im\Psi}, \quad (1)$$

де  $P(\theta, r)$  – звуковий тиск, що у дальньому полі утворюється лінійною групою  $N$  перетворювачів ( $M = (N-1)/2$ );  $R_1(\theta)$  – діаграма направленості одного з гучномовців ( $\theta$  – кут спостереження);  $x_m$  – коефіцієнт збудження для  $m$ -го гучномовця;  $\Psi = k\Delta r$  – фазова різниця між коливаннями сусідніх випромінювачів ( $\Delta r = d \sin \theta$ ,  $d$  – відстань між випромінювачами,  $k = \omega/c$  – хвильове число,  $\omega$  – кругова частота,  $c$  – швидкість звуку);  $r$  – загальна відстань від точки спостереження до масиву випромінювачів. Якщо коефіцієнти збудження представити у вигляді

$$x_m = \frac{\mathfrak{J}_m(z)}{\sigma}, \quad (2)$$

(де  $\sigma$  – деяка константа нормалізації) і використати розкладення функції [6]:

$$\frac{z}{e^2} (e^{i\Psi} - e^{-i\Psi}) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{\mathfrak{J}_m(z)}{\sigma} e^{im\Psi} \quad (3)$$

в ряд через функції Бесселя першого роду  $\mathfrak{J}_m(z)$ , то при  $M \rightarrow \infty$  рівняння (1) можна записати у вигляді:

$$P(\theta, r)_{M \rightarrow \infty} = R_1(\theta) \frac{e^{-ikr}}{r} e^{iz \sin \Psi}. \quad (4)$$

Таким чином, масив випромінювачів з точністю до фази буде проявляти направлені властивості, пропорційні направленості одного гучномовця.

Авторами робіт [4, 5] пропонується величину нормалізувати чого фактора  $\sigma$  обрати на основі компромісу між похибкою, що виникає при заміні безкінечного ряду (3) кінцевою сумою в (1) та ефективністю випромінювання звуку масивом.

З такого підходу витікає значення аргументу функції Бесселя  $z=M$ , і величина  $\sigma$  має дорівнювати найбільшому з доданків у сумі (3):

$$\sigma = \max \{ \mathfrak{J}_m(z) \}. \quad (5)$$

В роботі [7] показано, що використання розкладення функції  $\mathfrak{J}_m(z)$  в степеневий ряд [6]:

$$\mathfrak{J}_m(z) = \left(\frac{z}{2}\right)^m \sum_{k=0}^{\infty} \left(-z^2/4\right)^k / (k!(m+k)!) \quad (6)$$

дозволяє, зокрема для п'ятиелементного масиву, обрати нормалізуючий фактор

$$\sigma = 1 / (2n^2), \quad (7)$$

де  $n$  – деякий множник, пов'язаний з обраним значенням аргументу  $z$  ( $z=2/n$ ).

Тоді розподіл коефіцієнтів збудження гучномовців описується таким співвідношенням:

$$1 : 2n : 2n^2 : -2n : 1. \quad (8)$$

Виходячи з рекомендацій авторів робіт [4, 5], значення множника  $n$  слід обрати як  $n=1$ , але дослідження, виконані в роботі [7], свідчать про розширення діаграми направленості і наближенні її до направленості окремого гучномовця при збільшенні величини  $n$ . Тому пропонується значення аргументу  $z$  функцій Бесселя обрати дещо меншим, в межах  $z \approx [M / 2; M]$ , що надасть можливості величину множника  $n$  збільшити до  $n=2$ .

### Реалізації прямокутних масивів Бесселя

Розглянемо два варіанти можливих реалізацій масивів гучномовців, створених на базі лінійних масивів Бесселя [3].

Варіант 1 (рис. 1): масив із п'ятнадцяти гучномовців (у конструкції 3x5) складається з трьох однакових рядків, кожний з яких представляє собою п'ятиелементний масив Бесселя з розподілом коефіцієнтів збудження за співвідношення (8) при  $n=1$ , тобто

$$1 : 2 : 2 : (-2) : 1. \quad (9)$$

1	2	2	-2	1
1	2	2	-2	1
1	2	2	-2	1

Рис. 1. Схема розподілу коефіцієнтів збудження масиву Бесселя (варіант 1)

Варіант 2 (рис. 2): масив із двадцяти п'яти гучномовців (у конструкції 5x5). Кожний з рядків і стовпців випромінювачів має розподіл коефіцієнтів збудження у відповідності із співвідношенням (9), для реалізації чого розподіл коефіцієнтів збудження по стовпцям (або по рядкам) будувється у пропорції (9), відповідно, від першого коефіцієнту стовпця (або рядка).

1	2	2	-2	1
2	4	4	-4	2
2	4	4	-4	2
-2	-4	-4	4	-2
1	2	2	-2	1

Рис. 2. Схема розподілу коефіцієнтів збудження масиву Бесселя (варіант 2)

Проаналізуємо направлені властивості представлених масивів гучномовців з ціллю порівняння можливостей створення ними «ненаправленого» випромінювання.

### Розрахунок характеристики направленості масивів Бесселя

Характеристика направленості (ХН) прямокутного масиву гучномовців  $R_B(\theta, \varphi)$  ( $\theta, \varphi$  – кутові координати сферичної системи координат) представляється двома її перетинами, тобто діаграмами направленості (ДН) у двох взаємно перпендикулярних площинах – вертикальній  $R_B(\theta, \varphi = \pi/2)$  і горизонтальній  $R_\Gamma(\theta, \varphi = 0)$ . На основі підходу, викладеному в роботі [1], відповідно, вирази для  $R_B(\theta)$  і  $R_\Gamma(\theta)$  можна отримати у вигляді:

$$R_B(\theta) = R_1(\theta) \cdot R_{BT}(\theta); \quad (10)$$

$$R_\Gamma(\theta) = R_1(\theta) \cdot R_{\Gamma T}(\theta), \quad (11)$$

де  $R_1(\theta) = 2\mathfrak{J}_1((\pi D/\lambda)\sin\theta) / ((\pi D/\lambda)\sin\theta)$  – ДН окремого екранованого гучномовця (через вістову симетрію випромінювача для ДН від кута  $\varphi$  не залежить);  $\mathfrak{J}_1$  – функція Бесселя першого роду першого порядку;  $D$  – діаметр випромінювача;  $\lambda$  – довжина звукової хвилі на відповідній частоті випромінювання.

У формулах (10) і (11) функції  $R_{BT}$  та  $R_{\Gamma T}$  визначаються як вертикальна і горизонтальна ДН еквівалентної групи точкових перетворювачів, що знаходяться як

$$R_{BT} = |P_\Sigma(\theta, \varphi = \pi/2)| / \max |P_\Sigma(\theta, \varphi = \pi/2)|; \quad (12)$$

$$R_{\Gamma T} = |P_\Sigma(\theta, \varphi = 0)| / \max |P_\Sigma(\theta, \varphi = 0)|, \quad (13)$$

де  $P_\Sigma(\theta, \varphi)$  – сумарний звуковий тиск, створений еквівалентною групою точкових випромінювачів на відстані  $r \gg \lambda$  ( $r = \text{const}$ ).

Закономірності формування звукового тиску у двох площинах показані на прикладі масиву з п'ятнадцяти випромінювачів на рис. 3.

Для реалізації масиву Бесселя, представленого варіантом 1 (рис. 1), вирази для обчислення звукового тиску еквівалентної точкової групи, що формують направленість у горизонтальній площині  $P_{\Gamma T}(\theta)$  (нормованого на продуктивність джерела), знаходяться як

$$P_{\Gamma T 5}(\theta) = \frac{e^{-ikr}}{r} \cdot P_{B\Gamma}(\theta), \quad (14)$$

де 
$$P_{B\Gamma}(\theta) = 1 + 2e^{-ikd \cos \theta} + 2e^{-i2kd \cos \theta} - 2e^{-i3kd \cos \theta} + e^{-i4kd \cos \theta}. \quad (15)$$

Відповідно, у вертикальній площині:

$$P_{\Sigma B 3}(\theta) = \sum_{l=1}^3 e^{-ik[r+(l-1)d \sin \theta]} / r. \quad (16)$$

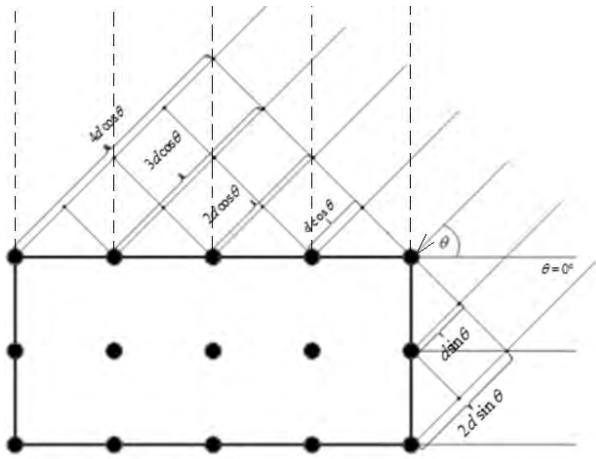


Рис. 3. Схема формування розподілу звукового тиску масивом випромінювачів (варіант 1)

Для реалізації масиву за варіантом 2, відповідно, вирази для звукового тиску будуть представлені у горизонтальній площині формулами

$$P_{УГ5}(\theta) = \frac{e^{-ikr}}{r} \cdot P_{БГ}(\theta), \quad (17)$$

де

$$P_{БГ}(\theta) = 1 + 2e^{-ikd \cos \theta} + 2e^{-i2kd \cos \theta} - 2e^{-i3kd \cos \theta} + e^{-i4kd \cos \theta}, \quad (18)$$

а у вертикальній площині:

$$P_{УВ5}(\theta) = \frac{e^{-ikr}}{r} \cdot P_{БВ}(\theta), \quad (19)$$

де

$$P_{БВ}(\theta) = 1 + 2e^{-ikd \sin \theta} + 2e^{-i2kd \sin \theta} - 2e^{-i3kd \sin \theta} + e^{-i4kd \sin \theta}. \quad (20)$$

### Аналіз результатів розрахунків

Результати обчислення діаграм направленості для  $D=0,077$  м і  $d=0,1155$  м, відповідно, у вертикальній і горизонтальній площинах наведені на рис. 4 і 5.

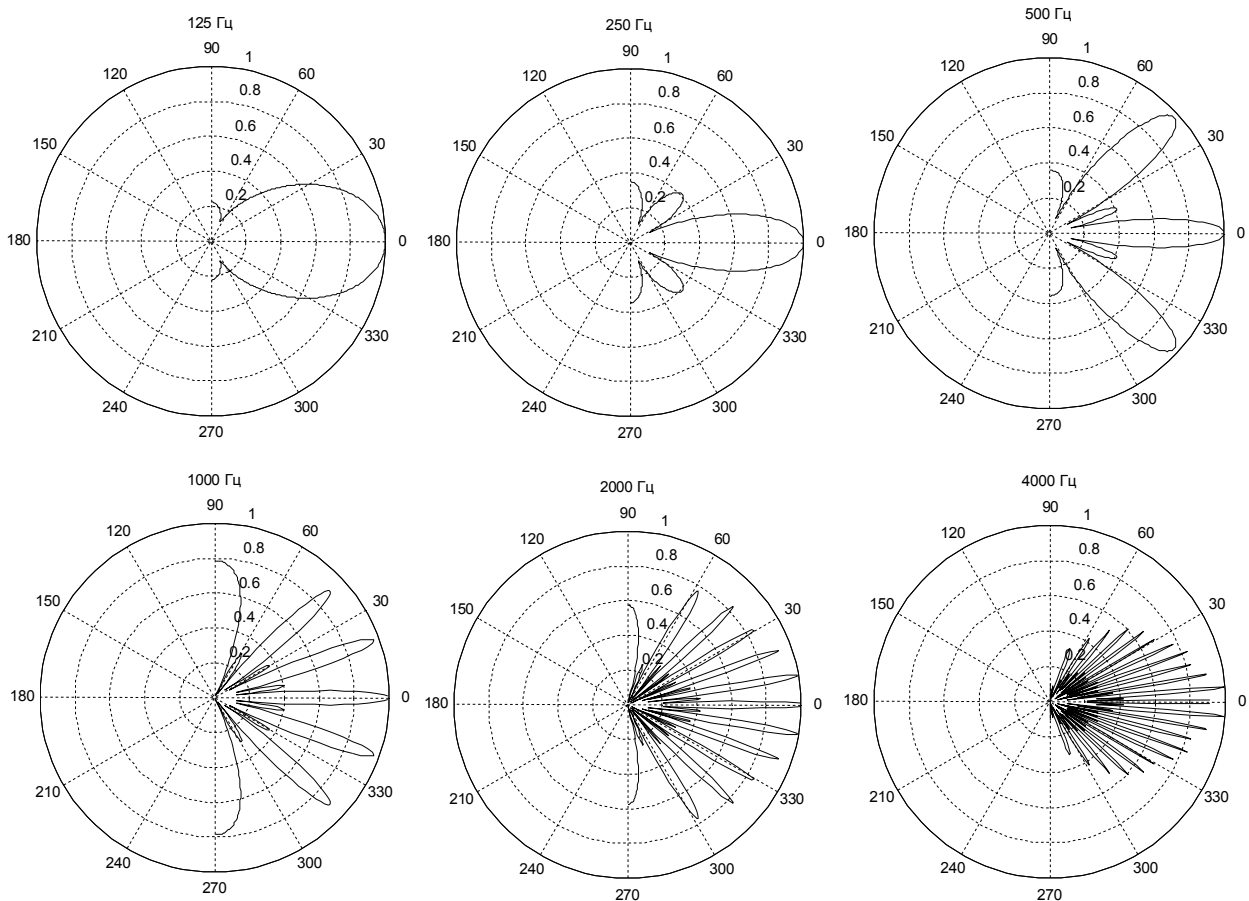


Рис. 4. Вертикальні діаграми направленості масиву гучномовців, реалізованого за варіантом 1

Як витікає з графіків, представлених на рис. 4, діаграма направленості масиву випромінювачів у вертикальній площині більш відповідає направленості лінійної групи випромінювачів, і, практично, з частоти 500 Гц є багатопелюстковою, що робить її непригодною для озвучування в цій площині. У

горизонтальній площині (рис. 5), де реалізована лінійна група випромінювачів з коефіцієнтами збудження у відповідності з функціями Бесселя (9), діаграма направленості суттєво розширюється і в значній мірі наближається до направленості окремого гучномовця.

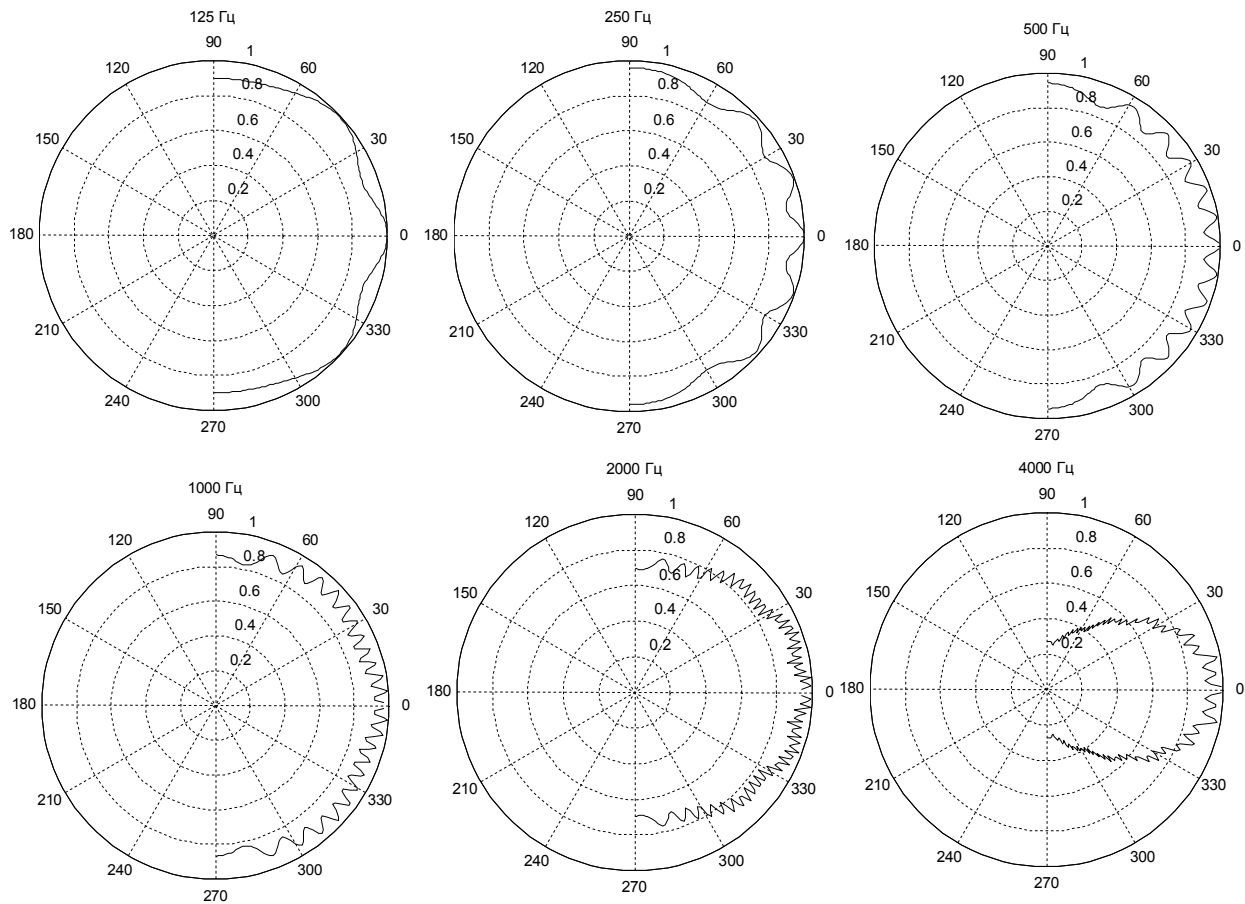


Рис. 5. Горизонтальні діаграми направленості масиву гучномовців, реалізованого за варіантом 1

Таким чином, на основі отриманих результатів, доречний висновок, що масив Бесселя, реалізований за варіантом 1, не може бути ефективно використаний для озвучення слухацьких місць, оскільки не забезпечує «ненаправлене» випромінювання звуку одночасно, як в горизонтальній, так і в вертикальній площинах. Для масиву Бесселя, побудованого за варіантом 2, графіки діаграм направленості подані на рис. 6. Оскільки система у відповідності до побудови коефіцієнтів збудження є практично симетричною у двох площинах, наводиться одна діаграма направленості, яка буде однаковою у вертикальній і горизонтальній площинах (рис. 6).

З графіків, представлених на рис. 6, очевидно, що діаграми направленості у двох площинах носять майже рівномірний характер, що, відповідає ненаправленим властивостям окремого перетворювача.

Таким чином, реалізація плоского масиву Бесселя за варіантом 2 рекомендується до практичного використання для озвучування значних за розміром площ і об'ємів приміщення.

## Висновки

Застосування плоских масивів Бесселя, в яких коефіцієнти збудження гучномовців задаються у

відповідності зі значеннями функцій Бесселя у двох площинах, є ефективним для створення ненаправленого випромінювання в горизонтальному і вертикальному перетині приміщень або відкритого простору.

Використання декількох однакових лінійних масивів Бесселя у створенні плоскої конфігурації не є ефективним, оскільки у вертикальній площині масиву Бесселя, діаграма направленості носить багатопелюстковий характер і, навіть гірша за направленість звичайного лінійного масиву.

Кількість випромінювачів, застосованих у двох взаємно перпендикулярних площинах, рекомендується в межах п'яти гучномовців.

## Список літератури

1. Лунева С.А. Направленность излучения криволинейными акустическими массивами / С.А. Лунева, В.П. Заец, А.В. Красников // *Электроника и связь*. – 2012. – № 6. – С. 49-54.
2. Kitzen W.J.W. Multiply loudspeaker arrays using Bessel coefficients / W.J.W. Kitzen // *Philips Electronic Components and Application*. – 1983. – №5. – 6 p.
3. Bessel panels – high-power speaker systems with radial sound distribution // *Literature given out by Philips at the European AES*. – Technical publication 091, 1983. – 4 p.
4. Aarts R.M. On analytic design of loudspeaker arrays with uniform radiation characteristics / R.M. Aarts, A.J.E.M. Janssen // *J. Acoust. Soc. Am.* – January, 2000. – №107(1). – 6 p.

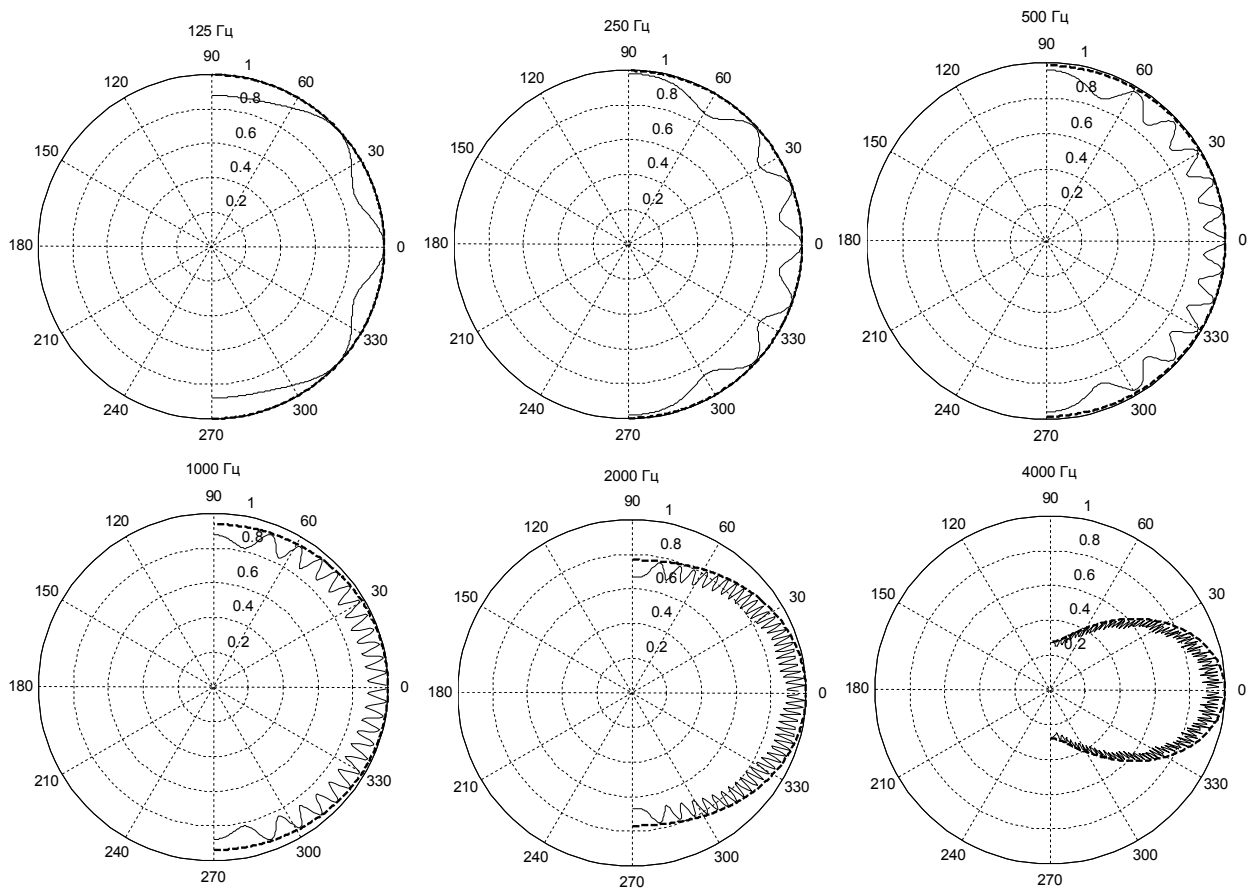


Рис. 6. Діаграма направленості масиву Бесселя, побудованого за варіантом 2, у вертикальній і горизонтальній площинах:  
 — масив Бесселя; - - - - - один гучномовець

5. Pat. 4.399.328 United States Patent, Appl. No.: 237.303. Directional and Frequency independent column of electro-acoustic transducer / N.V. Franssen. Aug., 1983. – 13 p.

6. Корн Г. Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн. – М: Наука, 1968. – 720 с.

7. Лунева С.А. Направленность излучения линейными массивами Бесселя / С.А. Лунева, И.Н. Санжара // Электроника и связь. – 2014. – № 6. – 6 с.

Надійшла до редколегії 12.06.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.А. Найда, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ.

### К ВОПРОСУ СОЗДАНИЯ НЕНАПРАВЛЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЗВУКА ПЛОСКИМИ МАССИВАМИ ГРОМКОГОВОРИТЕЛЕЙ

С.А. Лунева, И.Н. Санжара

Проанализированы возможные конфигурации плоских массивов громкоговорителей, коэффициенты возбуждения которых задаются на основе набора функций Бесселя. Обнаружены преимущества построения прямоугольных массивов, в которых используются линейные массивы Бесселя по горизонтали и вертикали.

**Ключевые слова:** массив Бесселя, характеристика направленности, диаграмма направленности, громкоговоритель, функции Бесселя первого рода.

### TO THE QUESTION OF FORMING OMNIDIRECTIONAL SOUND RADIATION BY PLANAR ARRAYS OF LOUDSPEAKERS

S.A. Luniova, I.N. Sanzhara

The possible configurations of planar loudspeaker arrays, which excitation coefficients are given based on a set of Bessel functions, were analyzed. The benefits of building rectangular arrays, in which linear Bessel arrays are used horizontally and vertically, were discovered.

**Keywords:** Bessel array, directional characteristic, directivity pattern, loudspeaker, Bessel functions of the first kind.