

**ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ  
АКУСТИЧНОГО ПОЛЯ КІЛЬЦЕВОЇ ЕКВІДИСТАНТНОЇ ТА НЕЕКВІДИСТАНТНОЇ  
ДВОСЕКЦІЙНОЇ МІКРОФОННОЇ РЕШІТКИ З ЕЛЕКТРОННИМ КЕРУВАННЯМ**

**Вступ**

Фазовані мікрофонні решітки знайшли широке застосування пристроїв обробки акустичних сигналів з метою збільшення співвідношення сигнал/шум в заданому напрямку. Наприклад, у стільниковому телефоні найпростіші мікрофонні решітки складається всього з двох мікрофонів і служить для збільшення співвідношення сигнал/шум говорить [1 – 3].

Більш складні фазовані мікрофонні ґрати зазвичай складаються з чотирьох і більше мікрофонів. Їхня кількість може досягати 64 і навіть 512 штук. Головне призначення фазованих мікрофонних ґрат – створити потрібну діаграму спрямованості в заданому напрямку, оперативно змінювати цей напрям у просторі і тим самим збільшити співвідношення сигнал/шум від обраного акустичного джерела, на який спрямована фазована антенна решітка [4 – 7]. Велика кількість мікрофонів значно впливає на вартість решітки.

**Особливості аналізу акустичних решіток**

У роботі описано аналіз просторового розподілу амплітуди акустичного поля кільцевої мікрофонної решітки (рис. 1). Кожен мікрофон був представлений моделлю – випромінювачем сферичної хвилі (ізотропний випромінювач). Проведено аналіз впливу числа випромінювачів, радіуса ґрат на концентрацію акустичного поля в центрі ґрат і на довільній відстані. Складено алгоритм, що дозволяє враховувати довільне парне та непарне число випромінювачів, розташоване по довжині дуги при рівномірному та нерівномірному розташуванні [4, 7].



Рис. 1. Мікрофонна решітка BSWA-TECH SPS-980 [3]

Сигнал з мікрофона решітки (рис. 1) надходить на підсилювач, далі йде на аналоговий коректор фази, який побудований на операційному підсилювачі, що зсуває фазу RC ланцюжком. Причому використовується не звичайний резистор, а керований I2C. Далі сигнал йде на аналого-цифровий перетворювач АЦП, де оцифровується і надходить у програмовану логічну інтегральну схему – ПЛІС по паралельній шині або, у кращому випадку, послідовному периферійному інтерфейсу ППІ. У першому випадку потрібно щонайменше 17 ліній зв'язку, у другому – 5. На практиці широко використовуються мікрофонні решітки з великим масивом випромінювачем, що потребує використання дорогого електронного обладнання,

вартість якого пропорційна кількості мікрофонів [1, 5, 6]. У зв'язку з цим актуальним стає питання зниження кількості використовуваних мікрофонів в решітці при збереженні їх електричних характеристик, що призводить до зниження вартості відповідного електронного обладнання.

Метою статті є пошук шляхів вирішення зазначеної задачі на основі виявлення фізичних особливостей акустичних ґрат.

Особливості ближньої та проміжної зони проявляються насамперед у тому [4, 7], що просторовий розподіл амплітуд та потужності звукового поля не має характеру сформованої діаграми спрямованості з головними та бічними пелюстками. В області напрямів нулів діаграми спрямованості ґрат амплітуда поля досить висока. Однак поза напрямом максимуму діаграми спрямованості в області проміжної зони, де потенційно може бути джерело звуку, можуть виникати ситуації, коли менше випромінювачів при певній конфігурації забезпечує більш високе значення потужності поля в певних локальних областях [4, 7, 8].

### Основна частина

У [7] розглянуто розподіл комплексної потужності акустичного поля лінійних ґрат випромінювачів у припущенні, що кожен мікрофон (випромінювач) транслює акустичне поле у вигляді сферичної хвилі. Відповідно до класичних положень (лема Лоренца, теорема "Взаємності") вважаємо, що форма діаграми спрямованості як сформованої немає, тобто розподіл поля випромінювача в режимі прийому та передачі акустичного сигналу ідентичний.

Через малі відстані між мікрофонами решітки і точками спостереження останні можуть перебувати як у ближній (проміжній), так і в дальній зоні безпосередньо кожного випромінювача.

У нашій поточній задачі точки спостереження знаходяться також у проміжній зоні решітки випромінювачів. Таким чином, необхідно враховувати обидва прояви особливостей проміжного поля одиночного випромінювача, і решітки, зокрема, розробки алгоритмів розрахунків розподілу поля і потужності.

Обмежимося розглядом задачі, яка полягає в аналізі фізичних закономірностей формування розподілу амплітуди поблизу ґрат випромінювачів. Це дозволяє врахувати особливості ближньої та проміжної зони як решітки випромінювачів, а й кожного випромінювача окремо. Візьмемо рішення для ізотропного випромінювача як сферичної хвилі:

$$U_n = \sum_{n=-N/2}^{N/2} U_0 \frac{\cos(\omega t - kR_n)}{R_n}; \quad (1)$$

де  $R$  – відстань від центру випромінювача до точки спостереження;  $N$  – число випромінювачів, симетрично розташованих від центру решітки.

Розглянемо далі лінійні ґрати з  $N+N_m$  мікрофонів, розташованих за великим і малим радіусом. Введемо декартову систему координат, як показано на рис. 2. Для знаходження амплітуди поля поблизу ґрат мікрофонів розташуємо їх уздовж осі  $OX$ , і відстань  $R_n$  до точки спостереження будемо визначати в декартових координатах. Спочатку представимо результат аналізу просторового розподілу амплітуди поля решітки на малих та середніх відстанях за відсутності взаємодії між елементами решітки (теорія елементарного випромінювача). Сумарні компоненти полів у кожній точці спостереження знаходимо згідно з принципом суперпозиції:

$$U = \sum_{n=-(N+N_m)/2}^{(N+N_m)/2} U_n \quad (2)$$

для парного числа мікрофонів,

$$U = U_0 + \sum_{n=(-N-Nm+2)/2}^{(N+Nm-2)/2} U_n \quad (3)$$

для непарного числа випромінювачів (мікрофонів), де  $n$  – номер випромінювача (мікрофона),  $N$ ,  $Nm$  – число випромінювачів, розташованих уздовж півосі  $OX$  по великому та малому радіусах відповідно.

Для конкретності розглядатимемо близьку до практики систему [4, 7, 8], коли

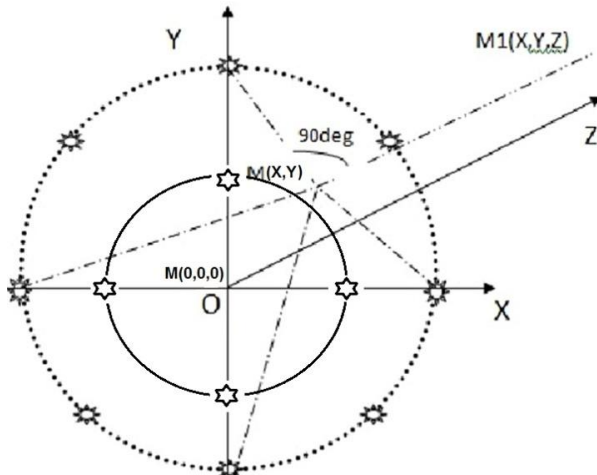


Рис. 2. Схема розташування мікрофонів у кільцевій двосекційній решітці

випромінювачі розташовуються еквідистантно на колі радіуса  $R$  і  $Rm$  (рис. 2). Для аналізу досліджуваних фізичних закономірностей необхідно враховувати, що область фокусування акустичного поля знаходиться у ближній зоні як джерела звуку, так і масиву. Сумарні амплітуди полів мікрофонів у кожній точці простору знаходимо згідно з принципом суперпозиції.

При цьому відстані  $R_n$  від  $n$ -го випромінювача до точки спостереження  $M(X, Y, Z)$ , що визначають фази складових полів кожного мікрофона в точці спостереження (рис. 2), знаходимо аналогічно викладеному вище алгоритму для лінійних решіток. Формула для розрахунку відстаней  $R_n$  залежить від взаємного розташування

точки випромінювання та точки спостереження. У загальному випадку

$$R_n = \sqrt{Z^2 + (Y_n \pm Y)^2 + (X_n \pm X)^2}; \quad (4)$$

де  $X_n, Y_n$  – координати  $n$ -го випромінювача;  $X, Y$  – координати точки спостереження в декартових координатах, пов'язаних з ґратами;  $Z$  – відстань від площини решітки, як показано на рис. 2.

Знак “+” у виразі (4) береться у разі, якщо точка спостереження  $M(X, Y)$  перебуває у першому квадранті, знак “-” береться у разі, якщо вона у третьому квадранті, знаки “+,-” чергуються, якщо точка спостереження та джерело знаходяться у другому та четвертому квадрантах.

На практиці в решітках, що розглядаються, зручно розташовувати мікрофони на однакових відстанях один від одного, вибираючи відповідним чином радіус решітки  $R$ . Тоді вираз для  $R_n$  може бути записаний через радіус решітки та кут  $\alpha$  між променями, спрямованими з початку координат на два сусідні джерела.

Для точки спостереження всередині кільця радіуса  $R$  на відстані  $Z$ :

$$R_n = \sqrt{Z^2 + (X - R \sin(n\alpha))^2 + (Y - R(\cos(\pi - n\alpha)))^2}, \quad (5)$$

$n=0, \pm 1, \pm 2, \dots, N/2$  для непарного  $N$ ,

$$R_n = \sqrt{Z^2 + (X - R \sin((2n - 1)\alpha / 2))^2 + (Y - R(\cos(\pi - (2n - 1)\alpha / 2)))^2}, \quad (6)$$

$n=\pm 1, \pm 2, \dots, N/2$  для парного  $N$ .

Для мікрофонів, розташованих по малому радіусу,

$$Rm_n = \sqrt{Z^2 + (X - Rm \sin(nm\alpha))^2 + (Y - Rm(\cos(\pi - nm\alpha)))^2}, \quad (7)$$

$nm=0, \pm 1, \pm 2, \dots, Nm/2$  – для непарного  $Nm$ ,

$$Rm_n = \sqrt{Z^2 + (X - Rm \sin((2nm - 1)\alpha / 2))^2 + (Y - Rm(\cos(\pi - (2nm - 1)\alpha / 2)))^2}, \quad (8)$$

$n = \pm 1, \pm 2, \dots, N/2$  – для парного  $N$ .

У разі нееквідистантного розташування мікрофонів у ґратах формули (5) – (6) трохи перетворюються так:

$$Rd_n = \sqrt{Z^2 + (X - R \sin(n(\alpha \pm \Delta\alpha))^2 + (Y - R(\cos(\pi - n(\alpha \pm \Delta\alpha))))^2}, \quad (9)$$

$n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, N/2$  – для непарного  $N$ ;

$$Rd_n = \sqrt{Z^2 + (X - R \sin((2n - 1)(\alpha \pm \Delta\alpha) / 2))^2 + (Y - R(\cos(\pi - (2n - 1)(\alpha \pm \Delta\alpha) / 2)))^2}, \quad (10)$$

$n = \pm 1, \pm 2, \dots, N/2$  – для парного  $N$ .

У цих співвідношеннях  $\Delta\alpha = 2 \arcsin(d / 2R)$ , де  $d$  – найкоротша відстань між мікрофонами (довжина хорди),  $R$  – радіус дуги розміщення мікрофонів.

Кут меж мікрофонами  $\alpha = 2\pi / N$ , де  $N$  – кількість мікрофонів.

Таким чином, задаючи радіус кільця –  $R$ , кут –  $\alpha$ , який визначає відстань між джерелами звуку та їх число, будемо аналізувати вплив цих параметрів на просторовий розподіл поля всередині та поза ґратами, а також і вздовж якоїсь осі. З'являється можливість отримати просторове розподілення поля на відстані  $Z$  від площини розташування мікрофонів.

З використанням виразів (5) – (8) були розроблені алгоритм та програма комп'ютерного аналізу, що дозволяє досліджувати просторовий розподіл потужності поля всередині решітки з урахуванням та без урахування особливостей полів ближньої та проміжної зони елемента решітки.

### **Аналіз розрахунків параметрів решітки з односекційним розмішуванням мікрофонів**

Результати розрахунків можуть бути представлені як ліній рівного рівня амплітуд полів або потужності, так і у вигляді відповідних залежностей уздовж будь-якої координати. У розроблених алгоритмах і програмах жодних обмежень на розміри решітки, кількість випромінювачів та їх становище у ґратах не накладається.

Розрахунки проводилися для двох варіантів: у першому задавалася відстань по дузі кола між випромінювачам у довжинах хвиль, що виключало симетрію решітки, а також для цілих значень кута  $\alpha$  наприклад – 15, 30, 45, 60 град. Другий варіант дозволяв розташувати випромінювачі (мікрофони) симетрично не тільки щодо осі  $OY$ , але і щодо осі  $OX$ , а також по дузі меншого радіусу.

На рис. 3 представлено просторовий розподіл сумарної амплітуди поля випромінювання кільцевої решітки 12 мікрофонів. з радіусом рівним  $1,5\lambda$  (три випромінювачі по дузі з радіусом  $R = 0,7\lambda$ ). Розрахункові значення нормовані на максимальне значення. Видно чіткі концентрації акустичного поля в центрі решітки, і на відстанях від центру, рівних  $\lambda$ . Виразно спостерігається концентрація поля у точках розташування випромінювачів. Чітко видно інтерференційні максимуми між мікрофонами.

На відстані рівних приблизно чверть довжини хвилі простежується інтерференційний сплеск амплітуди акустичного поля поблизу кожного випромінювача.

Розрахункові значення унормовані на максимальне значення. Цей результат відповідає фізичному уявленню та свідчить про правильність створеного алгоритму. Подальші розрахунки встановили чіткі концентрації акустичного поля у центрі решітки, з відносним значенням поля більшого розміру, ніж решітки з радіусом рівним  $2\lambda$ . Виразно спостерігається концентрація поля у точках розташування випромінювачів. Другий варіант дозволяв розташувати випромінювачі (мікрофони) симетрично щодо осі  $OY$ , але і щодо осі  $OX$ .

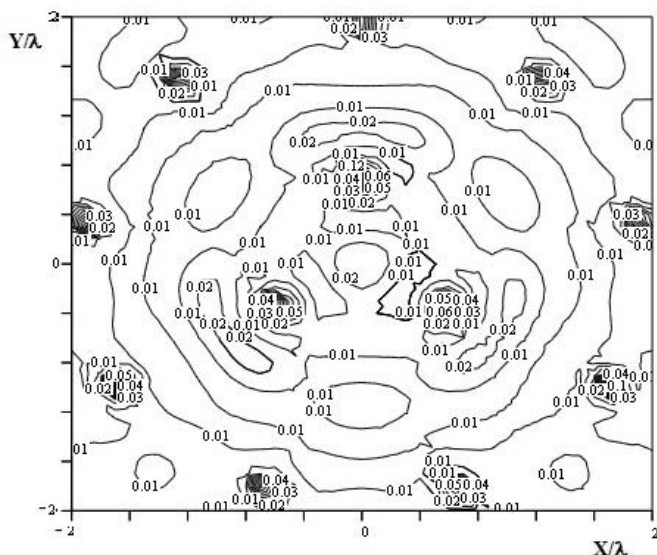


Рис. 3. Розподіл сумарного поля двосекційної акустичної решітки  $N=12$  мікрофонів (3 мікрофони на малій дузі  $R_m=0,7\lambda$ )  $Z=0$ ,  $R=2\lambda$

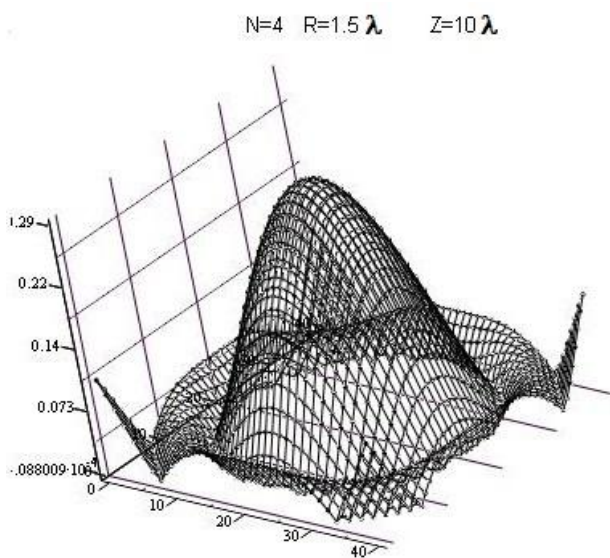


Рис. 4. Розподіл поля акустичної еквідистантної решітки мікрофонів рівня  $N=4$  (по великій дузі),  $Z=10\lambda$ ,  $R=1,5\lambda$

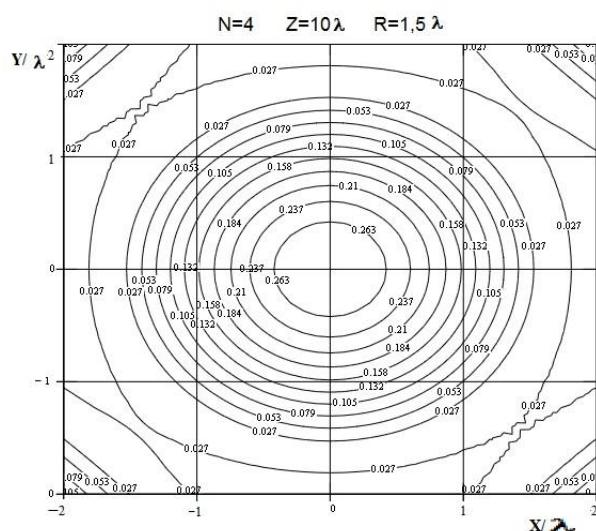


Рис. 5. Розподіл поля еквідистантної решітки з  $N=4$ ,  $Z=10\lambda$ ,  $R=1,5\lambda$  у вигляді контурів рівного значення

На відстані, рівній приблизно чверті довжини хвилі, простежується інтерференційний сплеск амплітуди акустичного поля поблизу кожного випромінювача.

Цей результат відповідає фізичному уявленню та свідчить про правильність створеного алгоритму. Подальші розрахунки встановили чіткі концентрації акустичного поля у центрі решітки з відносним значенням поля більшого розміру, ніж решітки з радіусом рівним  $2\lambda$ .

Збільшення радіуса решітки призводить до більшої кількості інтерференційних максимумів, ніж видно на рис. 3. Аналіз наступних розрахунків показав, що збільшення числа мікрофонів при фіксованому радіусі призводить до більш рівномірного розподілу звукового випромінювання в центрі решітки на відстані, що дорівнює довжині хвилі.

На рис. 4 представлено просторовий розподіл сумарної амплітуди поля випромінювання кільцевої решітки 4 акустичних випромінювачів, з радіусом рівним  $1,5\lambda$  при рівномірному розміщенні по великому радіусу.

На рис. 5 видно розподіл акустичного поля для ґрат з чотирьох випромінювачів у вигляді поверхневих ліній, з виразним максимумом в центрі решітки на відстані в 10 довжин хвиль. Довжина хвилі у разі є параметром рівним 1.

На рівновіддаленій від центру решітки, більшому, чи рівному радіусу решітки, відмінності за абсолютним значенням менш значні, але відрізняються формою. Форма розподілу поля у напрямку, перпендикулярному центру решітки, має конусоподібну форму, представлена на рис. 5, для чотирьох мікрофонів на відстані 10 довжин хвиль.

Графіки, представлені на рис. 6, показують, що у відстанях рівних близьких до  $1,8\lambda$  і  $2,4\lambda$  вздовж лінії рівновіддаленої від координатних осей абсолютні значення сумарної амплітуди полів практично збігаються.

Графіки, представлені на рис. 7, показують більше значення абсолютної амплітуди поля для двох випромінювачів, розташованих на осі X на відстані між  $1,4\lambda - 2\lambda$ . Показано також, що розподіл поля вздовж осі Y при  $Z=10\lambda$  и радіусі решітки  $R=1,5\lambda$  для решіток з двох та чотирьох мікрофонів має практично рівні значення сумарної амплітуди акустичного поля на відстанях, відповідних  $1,6\lambda - 1,7\lambda$ , які рівновіддалені від центру решітки вздовж осі Y.

Далі розглянемо еквідистантне розташування випромінювачів по двох радіусах (двох кільцях) аналогічно рис. 1 в моделі, запропонованій на рис. 2. Рис. 3 наочно демонструє правильність роботи запропонованого алгоритму (5) – (8), видно розташування кожного мікрофона (дворадіусне розташування) по дузі з малим радіусом  $0,7$  довжини хвилі та зовнішнім радіусом – рівним двом довжинам хвилі  $R=2\lambda$ .

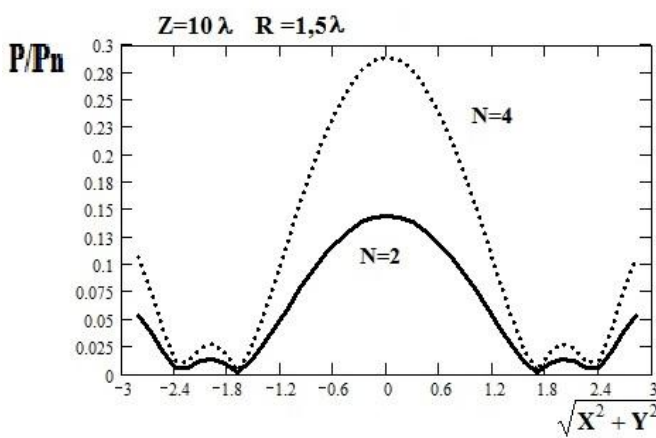


Рис. 6. Розподіл поля решітки з двох та чотирьох мікрофонів уздовж діагоналі (див рис. 5)  $Z=10\lambda$ ,  $R=1,5\lambda$

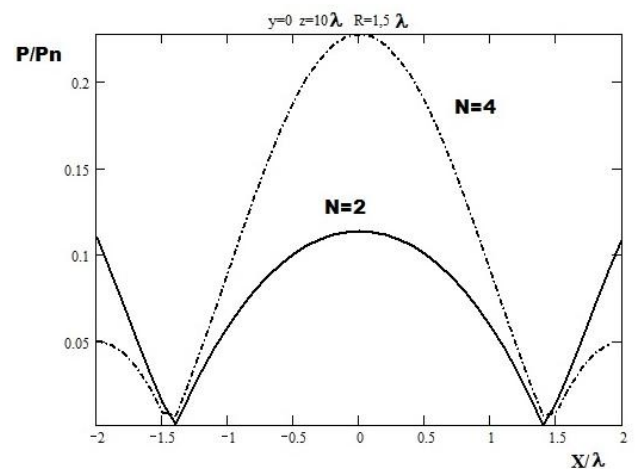


Рис. 7. Розподіл поля решітки з двох та чотирьох мікрофонів (на зовнішній дузі) вздовж осі X,  $Z=10\lambda$ ,  $R=1,5\lambda$

### Аналіз розрахунків параметрів решітки з двосекційним розмішуванням мікрофонів

На рис. 8 представлено розподіл поля в двокільцевих еквідистантних ґратах, змодельований за алгоритмом (1) – (8) складається з трьох мікрофонів ( $R_{\text{зовн.}}$ ) на великій дузі та трьох на внутрішній ( $R_m$  – малої дуги). Вздовж лінії рівновіддаленої від координатних осей абсолютні значення сумарної амплітуди полів практично збігаються.

Аналіз інформації, наведеної на рис. 9 – 11, показує ефективність використання переваги розміщення мікрофонів у двосекційній решітці.

Рис. 9 і 11 аналогічні за розташуваннями мікрофонів на рис. 8 і 10, точка спостереження знаходиться на відстані  $Z = 11$  довжин хвиль (у центрі), яка відповідає проміжній зоні (Френеля).

З порівняння рис. 8 і 9 видно, що в центрі решітки нормоване значення поля (потужності) буде великим (або рівним) при застосуванні всього 6 мікрофонів у порівнянні з 9 мікрофонами у точці головного максимуму на відстані  $11\lambda$ . Графіки на рис. 10 і 11 також підкреслюють висновки з графіків на рис. 8 і 9, у всіх випадках абсолютне значення амплітуд поля нормоване на максимальне значення поля трьох випромінювачів, розташованих еквідистантно по радіусу, що дорівнює двом довжинам хвиль, по абсолютному значенню буде більше при меншій кількості мікрофонів, тобто на рис. 8 і 10.

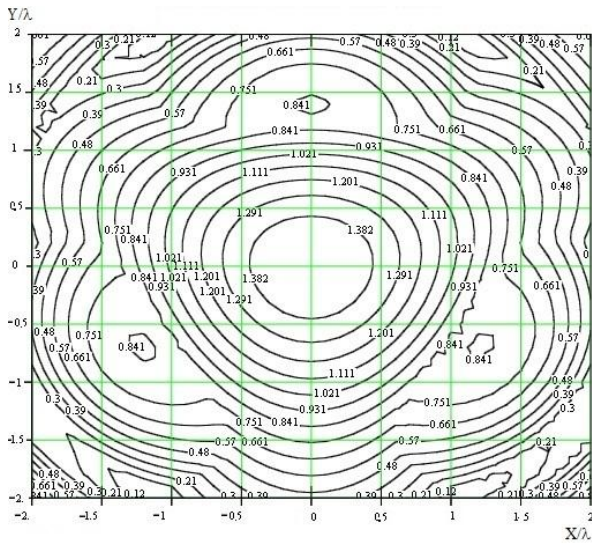


Рис. 8. Розподіл поля двосекційної акустичної решітки мікрофонів у вигляді контурів рівного значення  $N=6$  мікрофонів (3 по малій дузі),  $Z=11\lambda$ ,  $R_{\text{зовн.}}=2\lambda$ ,  $R_{\text{малий}}=0,7\lambda$

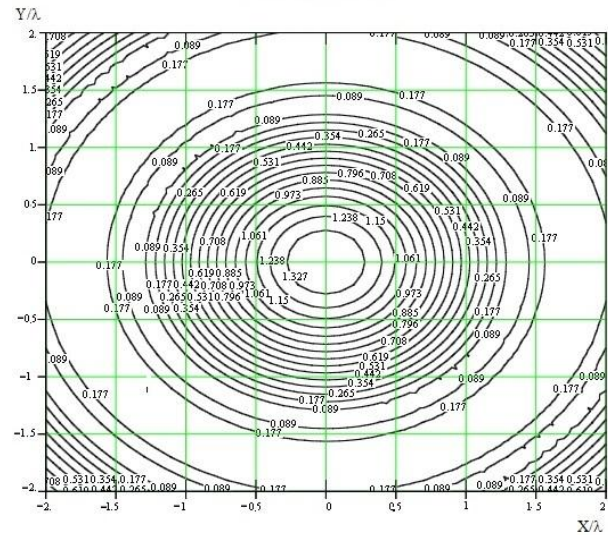


Рис. 9. Розподіл сумарного поля еквідистантної акустичної решітки  $N=9$  мікрофонів,  $Z=11\lambda$ ,  $R_{\text{зовн.}}=2\lambda$  у вигляді контурів рівного значення

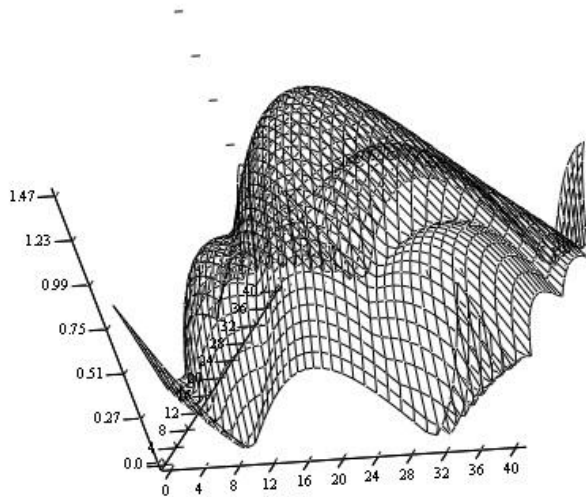


Рис. 10. Структура поля у вигляді поверхневого розподілу сумарного поля двосекційної акустичної решітки  $N=6$  (3 по малій дузі),  $Z=11\lambda$ ,  $R_{\text{зовн.}}=2\lambda$ ;  $R_{\text{малий}}=0,7\lambda$

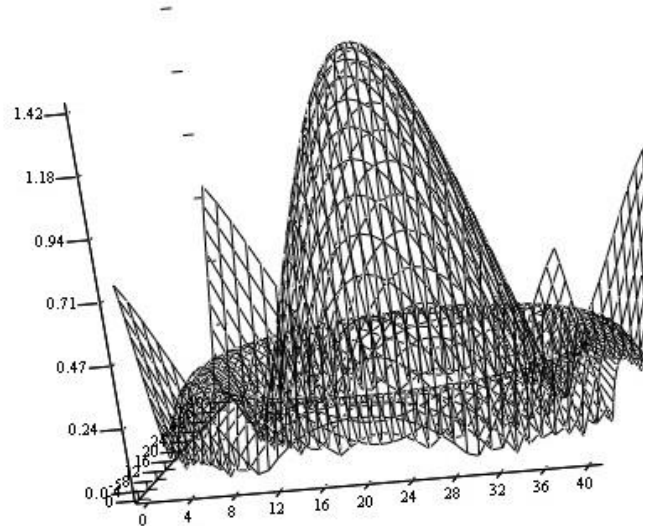


Рис. 11. Структура поля акустичних ґрат у вигляді поверхневого розподілу сумарного поля еквідистантної акустичної решітки  $N=9$  мікрофонів,  $Z=11\lambda$ ,  $R_{\text{зовн.}}=2\lambda$

## Висновки

Досліджено хвильові процеси випромінювання лінійних решіток акустичних випромінювачів на малих та проміжних відстанях.

Показано, що облік особливостей полів на відстанях, менших за довжину хвилі, та інтерференція акустичного поля, кількість випромінювачів, відстань між ними призводить до різного характеру рівномірності розподілу амплітуди акустичного поля. Продемонстровано, що збільшення числа випромінювачів призводить до більш рівномірного характеру зміни амплітуди поля в центрі решітки при фіксованому радіусі. Збільшення радіусу решітки при фіксованому числі призводить до появи інтерференційних максимумів поля. Показано

можливості керування концентрацією амплітуди акустичного поля всередині ґрат зміною її параметрів.

Показано, що на відстанях між межами проміжної та дальньої зони ( $D^2/\lambda < Z < 2D^2/\lambda$ ,  $D$ -зовнішній діаметр решітки) можливі появи локальних областей, у яких меншою кількістю мікрофонів можна забезпечити таке ж акустичне поле або навіть більше, ніж за більшої кількості мікрофонів. Цього можна досягти за умови використання внутрішньої дуги розташування мікрофонів, тоді можливе досягнення еквівалентного поля по осі решітки. Меншим числом мікрофонів, розташованих еквідистантно по зовнішньому радіусу, можна досягти еквівалентного поля. Варіація діаметру внутрішнього кільця, де розташовані мікрофони, також може сприяти максимальному розподілу потужності у центрі решітки при зменшеній загальній кількості мікрофонів при розміщенні у проміжній зоні джерел звуку.

Проведені дослідження можуть бути корисними також у рішенні задачі визначення розпізнавання конкретного джерела звуку конкретним мікрофоном решітки.

#### Список літератури:

1. Bolotina I.O., Kroening H.M., Kvasnikov K.G., Sednev D.A., Sumtsova O.V. Acoustic Field Simulation of an Antenna Array at Scanning by the SPA Method for Modern Ultrasonic Testing Technologies // J. Advanced Materials Research. 2014. Vol. 1040. P. 959–964.
2. Kartashov V.M., Kulia D.M., Kushnir M.V. and Tolstyh E.G. Selection of the Model for Varying Speed of Sound for the Optimal Linear Filter of Atmosphere Radio Acoustic Sounding Systems // Telecommunications and Radioengineering. 2014. Vol. 73, no. 91. P. 803–812.
3. BSWA Technology: product Catalogue – China, BSWA Technology Co., Ltd, 2008. Available <http://www.bswa-tech.com>.
4. Gorobets N.N., Gorobets Yu.N. and Tsekhmistro R.I. Near-Field Effects in the Electromagnetic Power Distribution in the Vicinity of Lattice of Hertzian Dipoles // Telecommunications and Radioengineering. 1999. Vol. 53, № 3. P. 24–29.
5. Lamonaca F., Carrozzini A., Grimaldi D. and Olivito R.S. Acoustic emission monitoring of damage concrete structures by multi-triggered acquisition system // Proceedings of IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 13 – 16 May, 2012. P. 1630–1634.
6. Carni D.L., Scuro C., Lamonaca F., Olivito R.S., & Grimaldi D. Damage analysis of concrete structures by means of b-value technique // International Journal of Computing. 2017. vol. 16(2). P. 82–88.
7. Omarov M., Tsekhmistro R., Shapovalov S. Analysis of Acoustic Field Distribution of Circular Microphone Array in Free Space // Proceedings – 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering. TCSET 2022. P. 134–138.
8. Цехмістро Р.И. Особенности излучения телекоммуникационных импедансных проволочных антенн // Радиотехника. 2004. № 139. С. 28–32.

*Надійшла до редколегії 15.09.2023*

#### *Відомості про авторів:*

**Цехмістро Роман Іванович** – канд. фіз.-мат. наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем; Україна; e-mail: [roman.tsekhmistro@nure.ua](mailto:roman.tsekhmistro@nure.ua); ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3628-3658>

**Шаповалов Сергій Вікторович** – канд. техн., наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем; Україна; e-mail: [serhii.shapovalov@nure.ua](mailto:serhii.shapovalov@nure.ua); ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0066-5291>