

УДК 534.29

С.О. Козерук, Д.В. Мазніченко, Ю.О. Митяй

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ УЛЬТРАЗВУКУ В ЗВУК

В статті розглянуто питання параметричної трансформації ультразвуку в звук для випромінювача невеликого хвильового розміру. Представлені результати теоретичних та експериментальних досліджень розподілу звукового тиску вздовж осі випромінювача, характеристики спрямованості на ультразвуковій та звукових частотах, залежність рівня звуку від виду та параметру амплітудної модуляції.

Ключові слова: *ультразвуковий випромінювач, параметрична звукова антена, первинне випромінювання, амплітудна модуляція, вторинна звукова хвиля, характеристика спрямованості.*

Вступ

Властивість трансформації ультразвукових хвиль в звук, дала поштовх розробці пристроїв з високою просторовою спрямованістю для передачі мовних та музикальних програм. Вперше нелінійна взаємодія акустичних хвиль була розглянута теоретично в роботах [1 – 2]. В подальшому теорія була розвита та доповнена для задач спрямованого низькочастотного випромінювання в гідроакустиці [3 – 7], де для генерації звукової хвилі використовувались високочастотні параметричні випромінювачі. Суть параметричної трансформації полягає у взаємодії високочастотних хвиль великої інтенсивності (первинних хвиль) у середовищі з нелінійними властивостями, які приводять до виникнення слабких ударних хвиль [8]. Ударні хвилі виникають вздовж напрямку розповсюдження ультразвукових хвиль та приводять до створення пульсуючих джерел випромінювання різницевої частоти. Така випромінююча система – антена біжучої хвилі, генерує вторинні акустичні хвилі у тілесному куті заданому характеристикою спрямованості ультразвукового випромінювача. Інтенсивність вторинних хвиль суттєво менша від інтенсивності первинних хвиль, але висока спрямована дія та практична відсутність бокового випромінювання на низьких частотах визначила широке впровадження параметричних антен в гідроакустичних пристроях.

В повітряній акустиці параметричний ефект почали використовувати з розвитком аудіо та медіа технологій. Перші важливі дослідження по використанню параметричного ефекту в повітряній акустиці з'явилися у 1975 р. після публікації статті «Параметричний ефект у повітрі» [9]. Автори роботи доказали, що параметричний ефект спостерігається і в повітряному середовищі. Після цього почалися розробки параметричних акустичних пристроїв трансляції звуку. В роботі [10] описують проведені експерименти, в яких вдалося отримати рівномірне вторинне поле в діапазоні частот (1.5 – 7) кГц та гостру спрямованість для всіх частот звукового сигналу.

В роботі [11] розглянуто три проблеми: оптимальна частота первинної хвилі, корекція спотворень та ізоляція слухачів від ультразвуку. Рекомендовано використовувати частоту несучої хвилі в межах 30 – 70 кГц. Для забезпечення безпеки від дії ультразвуку запропоновано обмежити рівень випромінювання величиною 130 дБ.

В процесі розробки параметричних випромінювачів виникає ряд проблем [12], які потребують вирішення. До них відноситься: вибір виду модуляції сигналу випромінювача, зменшення нелінійних спотворень вторинних звукових хвиль, розширення смуги частот характеристики випромінювача, оптимізація алгоритму попередньої обробки аудіо сигналу і інші.

Метою роботи є дослідження процесу параметричної трансформації ультразвуку в звук для випромінювача невеликого хвильового розміру, а саме – розподіл звукового тиску вздовж осі випромінювача, вплив виду та параметру амплітудної модуляції на рівень звуку. В роботі представлені результати теоретичних та експериментальних досліджень розподілу звукового тиску вздовж осі випромінювача, характеристики спрямованості на ультразвуковій та звукових частотах, залежність рівня звуку від параметру модуляції. Отримані результати: рівень звуку на відстані 1 м в діапазоні частот (0.25 – 1) кГц перевищив 60 дБ для амплітудної модуляції сигналу випромінювача з однією боковою полосою величиною 110 дБ.

1. Розрахунок вторинного звукового поля

Враховуючи те, що строгої теорії параметричної нелінійної антени поки що не існує, дослідники та розробники параметричних антен користуються наближеними рішеннями. Такий підхід дозволяє зняти труднощі складних розрахунків та отримати результати, які добре узгоджуються з експериментом.

Для розрахунку осьового розподілу звукової хвилі, яка виникає в результаті нелінійної трансформації ультразвуку, скористуємось загальним рішенням, приведеним в роботі [6], записаним для вторинного звукового тиску p_{Ω} :

$$p_{\Omega} = p_1 \epsilon M \Lambda^{-1} V(x, L_3, l_3, \Phi, L_D). \quad (1)$$

Прийняті позначення:

p_1 – тиск первинної хвилі;

$\epsilon = 1.2$ – коефіцієнт нелінійності для повітря;

M – число Маха;

Λ – довжина хвилі звукової частоти;

V – деяка функція осьового розподілення

p_1 від вказаних в дужках параметрів;

x – координата вздовж осі розповсюдження хвилі;

$L_3 = 1/\alpha_{\omega}$ – протяжність області затухання первинної хвилі частоти ω ;

$l_3 = 1/\alpha_{\Omega}$ – протяжність області затухання звукової хвилі частоти Ω ;

$\Phi = \omega/\Omega$ – зниження по частоті;

$L_D = \omega a^2 / 2c_0$ – довжина області Френеля;

$2a$ – діаметр випромінювача ультразвукових хвиль;

c_0 – швидкість звуку.

Вид функції V визначається моделлю первинного поля – тобто поля ультразвукової хвилі. Вестервельт [1] отримав цю функцію для вузько колінеарного пучка двох первинних хвиль з різницевою

частотою Ω , яке має місце в ближній зоні випромінювача:

$$V(x, \theta) = \frac{\pi a^2 L_3}{2x\Lambda} \left[1 - \frac{4(2\pi L_3)}{\Lambda} \sin^4 \frac{\theta}{2} \right]^{-1/2}, \quad (2)$$

де θ – кут відхилення точки спостереження від осі розповсюдження хвилі.

Як вказується у роботі [6], ця функція є наближенням плоскої хвилі і не враховує дифракції та поглинання первинної хвилі у дальньому полі випромінювача, тому результати розрахунків аксіального та радіального розподілу вторинного звукового поля не співпадають з експериментом.

Більш точною теорією параметричних випромінюючих антен є теорія, розроблена Р.В. Хохловим [3 – 5] та його учнями. Авторами знайдено рішення нелінійного рівняння, яке описує трьохмірну взаємодію первинних хвиль та формування низькочастотної хвилі. Для розрахунку аксіального розподілу низькочастотної хвилі за умови $L_3 > L_D$; $\Phi \gg 1$, скористаємось співвідношенням для розрахунку $V(x)$:

$$V(x) = 2L_D / \sqrt{4\Phi^2 + \Phi^2 x_n^2} \times \sqrt{\arctg^2(2\Phi x_n) + 0.25 \ln^2 \frac{1 + \Phi^2 x_n^2}{(1 + x_n^2)^2}}, \quad (3)$$

де $x_n = \frac{x}{L_D}$.

Щоб отримати вторинну звукову хвилю (ВЗХ), треба випромінювати мінімум дві ультразвукові хвилі з різницевою частотою звукового діапазону. Для цього електричний сигнал збудження випромінювача повинен бути сформований або сумою двох тональних коливань, або з використанням процедури амплітудної модуляції. Завдяки нелінійним властивостям повітря виникає ВЗХ та хвилі з комбінаційними частотами. Процес виникнення ВЗХ можна порівняти, для спрощення складної фізики нелінійних параметричних перетворень, з процесом демодуляції у амплітудному детекторі з зосередженими параметрами. На входи детектора подаються опорний та модульований сигнали, а на виході, після низькочастотної фільтрації, отримуємо різницевий сигнал. Наближений розв'язок задачі параметричного випромінювання звуку в повітря наведено в роботах [9 – 12]. В цих роботах використовується запропоноване Берктаєм [2] загальне рішення для вторинного поля.

Суть робіт зводиться до того, що тиск $p_{\Omega}(t)$ ВЗХ в процесі параметричної взаємодії первинних хвиль $p_1(t)$:

$$p_1(t) = P_1 E(t) \cos(\omega t), \quad (4)$$

з амплітудою P_1 , огинаючою $E(t)$ та частотою ω пропорційний другій похідній від квадрату огинаючої:

$$p_{\Omega}(t) \equiv \frac{\partial^2 E^2(t)}{\partial t^2}. \quad (5)$$

Запишемо сигнал первинної хвилі для випадку тональної амплітудної модуляції з параметром модуляції m :

$$p_1(t) = P_1(1 + m \cos \Omega t) \cos(\omega t).$$

Вплив параметру модуляції на звуковий сигнал можна оцінити, провівши математичні перетворення згідно з (5):

$$\frac{\partial^2 E^2}{\partial t^2} = -2\Omega^2 m (\cos \Omega t + m \cos 2\Omega t). \quad (6)$$

Звідки можна зробити висновок про наявність у ВЗХ коливань основної та подвійної частоти та їх залежність від параметру модуляції. Для підтвердження цих припущень були проведені експериментальні дослідження.

2. Експериментальні дослідження

Для проведення експериментальних досліджень був виготовлений випромінювач круглої форми радіусом 30 мм із 19 ультразвукових перетворювачів типу Т4008А1. Робоча частота та смуга пропускання випромінювача становила 40.5 кГц і 2.0 кГц відповідно. Електрична напруга збудження регулювалася таким чином, щоб підтримувати постійний результуючий тиск хвилі накачки на рівні 110 дБ на відстані 1 м від випромінювача.

На першому етапі досліджувався спектральний склад ВЗХ в залежності від виду амплітудної модуляції – з однією несучою і однією (АМ1) або двома (АМ2) бічними частотами для параметру модуляції $m = 1$.

Спектральний аналіз показав присутність у звуковому сигналі, який виник в результаті випромінювання, ультразвуку з АМ2 модуляцією (рис. 1), крім основного звуку з частотою 500 Гц додаткової спектральної компоненти з подвоєною частотою 1000 Гц.

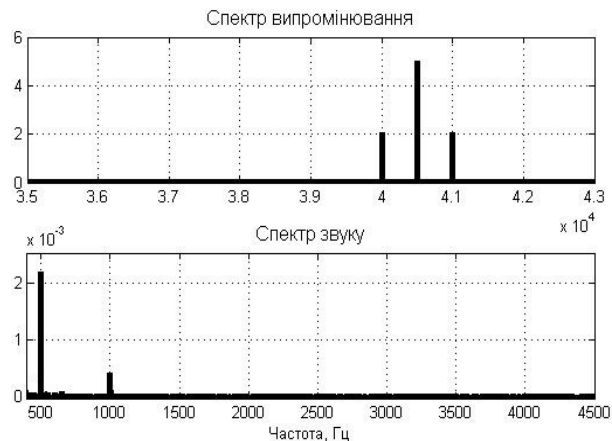


Рис. 1. Спектри випромінювання та звуку з АМ2 модуляцією

Для ультразвуку з АМ1 модуляцією (рис. 2) додаткова звукова компонента не виявлена.

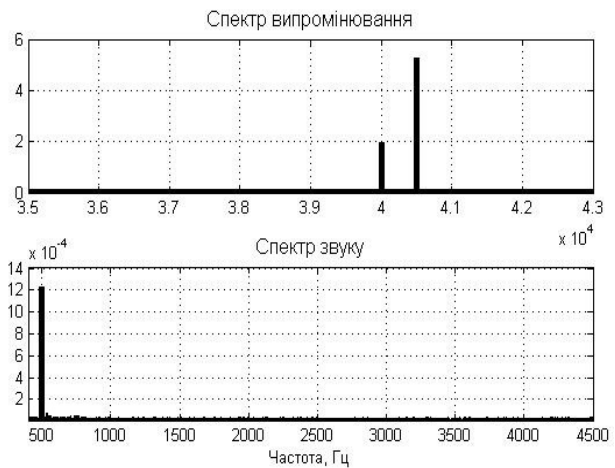


Рис. 2. Спектр випромінювання та звуку з АМ1 модуляцією

Дослідження залежності ВЗХ від параметру модуляції приведені на рис. 3 та 4.

Результати досліджень для модуляції АМ2 (рис. 3) демонструють зростання величини звукового тиску на основній (500 Гц) та подвійній частоті (1000 Гц) із збільшенням значення параметру m від 0 до 1.

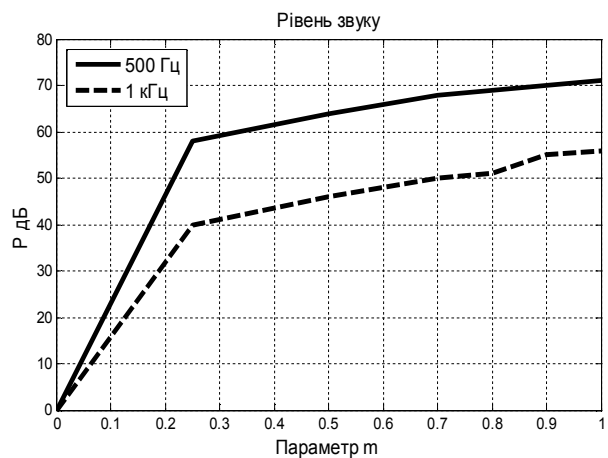


Рис. 3. Рівень звуку для АМ2 модуляції

Для модуляції АМ1 (рис. 4) спостерігається та сама залежність, але звукові компоненти з подвійною частотою відсутні.

Як видно з приведених результатів, меншим рівнем спотворень, який визначається відношенням величин тиску компонент з подвійною частотою до основної, є ВЗХ з АМ1 модуляцією, тобто модульований сигнал з однією бічною частотою. Цей вид модуляції більш вигідний і з енергетичних характеристик і з міркувань зменшення смуги частот випромінювача.

В подальших дослідженнях будемо використовувати цей вид модуляції.

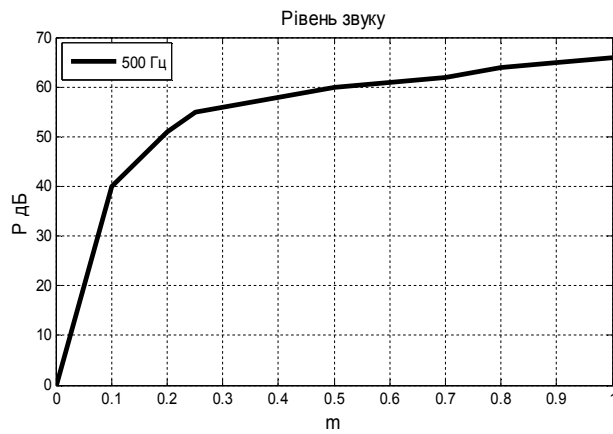


Рис. 4. Рівень звуку для AM1 модуляції

Розподіл тиску звукової хвилі вздовж осі випромінювача був розрахований по наближеним рішенням Вестервельта (2) та Хохлова-Заболотської (3). У обох випадках враховувалось згасання ультразвукової хвилі, а в виразі (3) – твердження, що ефективна область трансформації у дальньому полі випромінювача оцінюється величиною $\sim L_D\Phi$. Результати розрахунків та експериментальних досліджень приведені на рис. 5, а, б.

Результати розрахунків та експериментальних досліджень добре узгоджені. Тобто наближені оцінки осьового розподілу звуку для параметричної антени в дальньому полі випромінювача малого хвильового розміру можна проводити з використанням співвідношень (2) та (3).

Результати експериментальних вимірювань осьового розподілу тиску ультразвуку та звуку приведені на рис. 6. Звукові частоти вибрані з урахуванням смуги пропускання випромінювача. Слід відзначити більш стрімке спадання рівня звукової хвилі в порівнянні з ультразвуком, що пояснюється пропорційною залежністю тиску ВЗХ від квадрату ультразвукового.

Ефективна зона генерації звуку, рівень якого перевищує рівень завади, становить 3 м, при цьому рівень ультразвуку перевищує 90 дБ.

На рис. 7 приведені діаграми спрямованості (ДС) ультразвукового випромінювача на частоті 40.5 кГц та антени біжучої хвилі – параметричної антени, на звукових частотах.

Діаграмі спрямованості параметричної антени повторює основну пелюстку випромінювача, та має суттєво менші бокові пелюстки.

Наявність бокових пелюсток ДС параметричної антени та їх незначний рівень пояснюється пропорційною залежністю тиску ВЗХ від інтенсивності ультразвуку. Тобто, величина бічної пелюстки діаграми спрямованості параметричної антени може бути оцінена піднесенням в квадрат нормованої величини відповідної бічної пелюстки діаграми спрямованості випромінювача.

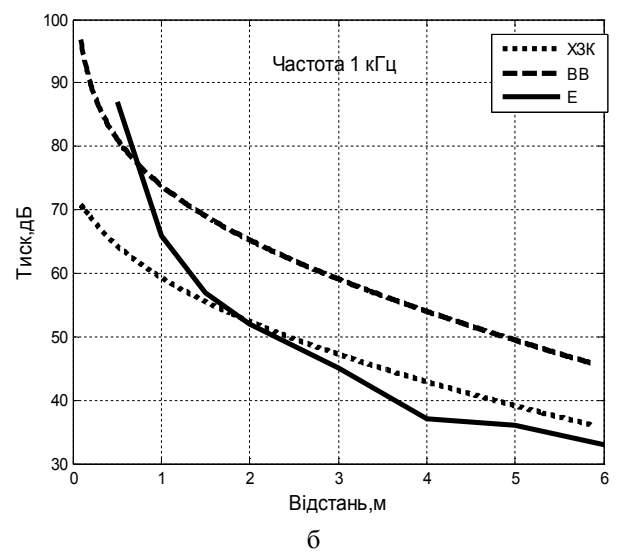
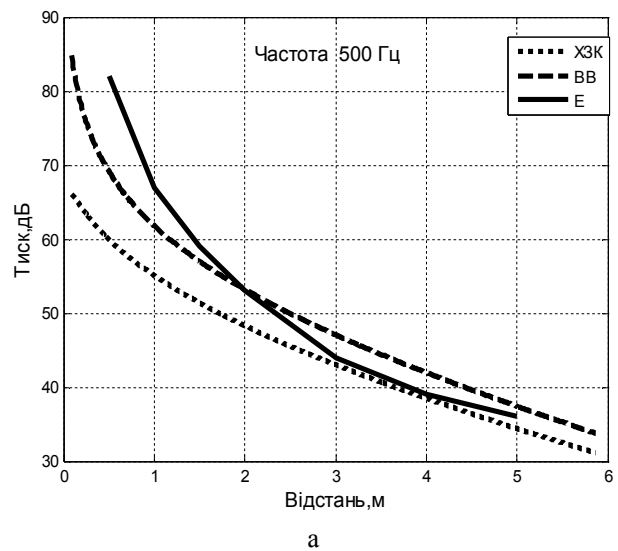


Рис. 5. Порівняння результатів розрахунку осьового розподілу звукового тиску по Вестервельту (ВВ), Хохлову (ХЗК) та експерименту (Е)

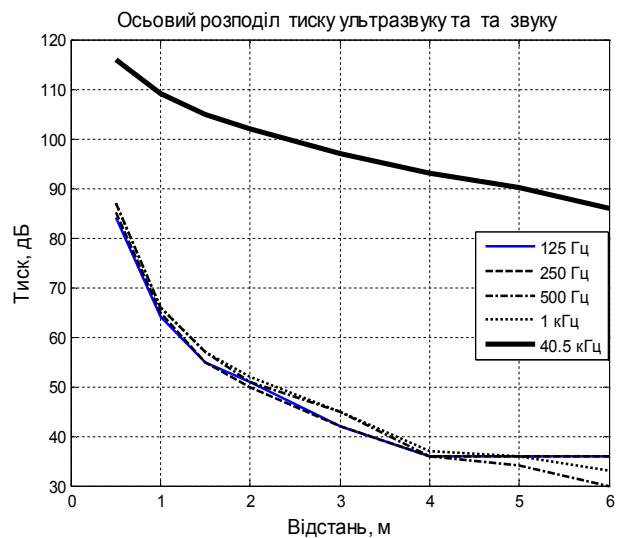


Рис. 6. Експериментальні графіки осьового розподілу тиску

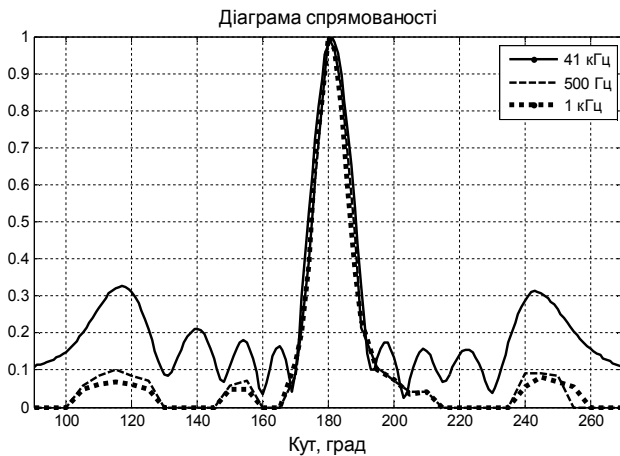


Рис. 7. Діаграми спрямованості

ВИСНОВКИ

1. Модульований сигнал випромінювання з однією бічною частотою більш вигідний з енергетичних характеристик та міркувань зменшення смуги частот випромінювача. Рекомендований параметр модуляції – 0.9.

2. Ефективна зона параметричної генерації звукової хвилі знаходиться в дальньому полі випромінювача ультразвуку невеликого хвильового розміру.

3. Рівень вторинного звуку в точці спостереження пропорційний інтенсивності відповідним чином модульованої ультразвукової хвилі в цій же точці.

4. Бічні пелюстки діаграми спрямованості параметричної антени можна оцінити піднесенням в квадрат нормованої величини відповідної бічної пелюстки діаграми спрямованості ультразвукового випромінювача.

5. Отримані результати: рівень звуку на відстані 1 м в діапазоні частот (0.25-1) кГц перевищив 60 дБ для ультразвукового сигналу випромінювача величиною 110 дБ.

Список літератури

1. Westervelt P.J. / P.J. Westervelt. – *J. Acoust. Soc. Amer.* – 1963. – V. 35. – P. 539.
2. Berklay H. Possible exploitation of nonlinear acoustics in underwater transmitting arrays / H. Berklay // *Journal of Sound and Vibration.* – April 1965. – Vol. 2, no. 4.
3. Заболотская Е.А. Квазиплоские волны в нелинейной акустике ограниченных пучков / Е.А. Заболотская, Р.В. Хохлов // *Акуст. ж.* – 1969. – Т. 9. – С. 40.
4. Кузнецов В.П. Уравнения нелинейной акустики / В.П. Кузнецов // *Акуст. ж.* – 1970. – Т. 16. – С. 548.
5. Руденко О.В. Ограниченные квазиплоские пучки периодических возмущений в нелинейной среде / О.В. Руденко, С.И. Солуян, Р.В. Хохлов // *Акуст. ж.* – 1973. – Т. 19. – С. 871.
6. Зарембо Л.К. Акустическая излучающая параметрическая антенна / Л.К. Зарембо // *Успехи физических наук.* – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – Том 128, вып. 4. – С. 713-720.
7. Новиков Б.К. Параметрические антенны в гидролокации / Б.К. Новиков, В.И. Тимошенко. – Л.: Судостроение, 1990. – 256 с.
8. Красильников В.А. Введение в физическую акустику: учебное пособие / В.А. Красильников, В.В. Крылов; под ред. В.А. Красильникова. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 400 с.
9. Bennet M. Parametric array in air / M. Bennet, D. Blackstock // *JASA.* – March 1975. – Vol. 57, no. 3.
10. Yoneyama / Yoneyama, Kamakura, Kumamoto, Aoki, Ikegaya // *J. Acoust. Soc. Amer.* – 1983. – V. 73 (5). – P. 1532.
11. Yoneyama. Developments of Parametric Loudspeaker for Practical Use / Yoneyama, Kamakura, Kumamoto, Aoki, Ikegaya // *10th International Symposium of Nonlinear Acoustic.* – 1984.
12. Pompei J. The use of airborne ultrasonic for generating audible sound beams / J. Pompei // *JASA.* – September 1999. – Vol. 47, no. 9.

Надійшла до редколегії 25.07.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.Г. Лейко, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ УЛЬТРАЗВУКА В ЗВУК

С.А. Козерук, Д.В. Мазниченко, Ю.А. Митяй

В статье рассмотрен вопрос параметрической трансформации ультразвука в звук для излучателя малого волнового размера. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований распределения звукового давления вдоль оси излучателя, характеристики направленности на ультразвуковой и звуковых частотах, зависимость уровня звука от вида и параметра амплитудной модуляции.

Ключевые слова: ультразвуковой излучатель, параметрическая звуковая антенна, амплитудная модуляция, первичное излучение, вторичная звуковая волна, характеристика направленности.

RESEARCH OF THE PARAMETRIC TRANSFORMATION OF THE ULTRASOUND INTO THE SOUND

S.O. Kozeruk, D.V. Maznichenko, Y.O. Mytai

The problem of parametric transformation of the ultrasound into the sound for emitter of small wavesize is examined. The results of theoretical and experimental studies of sound pressure distribution along the axis of the emitter, the radiation pattern for ultrasonic and audio frequencies, the sound level dependent on the type and parameter of amplitude modulation are presented.

Keywords: ultrasonic emitter, parametric audio antenna, amplitude modulation, secondary sound wave, the radiation pattern.