

Дерепа А.В., Лейко О.Г., Стьопченко А.М., Козак Д.А.

АКУСТИЧНІ ПОЛЯ НИЗЬКОЧАСТОТНИХ ЕЛІПТИЧНИХ ВИПРОМІНЮВАЧІВ ПОЗДОВЖНЬО-ЗГИННОГО ТИПУ В ГІДРОАКУСТИЧНИХ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

Пріоритетним напрямком розвитку гідроакустичних навігаційних систем і засобів підводного спостереження є низькочастотна активна гідролокація. Практична реалізація тенденції зниження робочих частот гідроакустичних станцій потребує пошуку нових електромеханічних коливальних систем, які мали б низькі частоти механічного резонансу і одночасно малі розміри та масу. В якості однієї з таких систем запропоновано еліптичний перетворювач поздовжньо-згинного типу. Він поєднує в собі поздовжні коливання п'єзокерамічного стрижня та згинні коливання металеві еліптичної оболонки, жорстко з'єднаної з торцями стрижня. Встановлено, що поздовжньо-згинний випромінювач має дві особливості. Перша полягає в тому, що в поперечному перерізі поздовжньо-згинний випромінювач має відносно малі розміри, завдяки чому вони є малими порівняно з довжиною робочої хвилі випромінювача. Друга особливість пов'язана з тим, що коливання випромінюючої поверхні випромінювача є неоднорідними. Оскільки коливання еліптичної оболонки є згинними, це обумовлює появу на окремих її ділянках, які прилягають до великої осі еліпсу, протифазних коливань порівняно з іншими ділянками оболонки. Запропонована схема побудови еліптичного поздовжньо-згинного перетворювача. Наведена його фізична модель, яка складається із активного п'єзокерамічного елемента стрижньового типу, що здійснює поздовжні коливання, та металеві еліптичної оболонки, яка перетворює ці поздовжні коливання в згинні коливання оболонки. Розроблена розрахункова модель поздовжньо-згинного випромінювача і на її основі в еліптичній системі координат з використанням кутових і радіальних функцій Мат'є розв'язане рівняння Гельмгольца відносно потенціалу швидкості акустичного поля. На основі отриманих співвідношень для акустичного поля визначені направлені властивості поздовжньо-згинного випромінювача.

Ключові слова: поздовжньо-згинний перетворювач, п'єзокерамічний елемент стрижньового типу, направлені властивості.

Постановка проблеми. умовах широкомасштабної агресії російська федерація здійснює руйнування всієї господарської діяльності України, в тому числі зрив морських перевезень шляхом руйнування портової інфраструктури, мінування акваторій, фарватерів, рекомендованих курсів, спотворення (спуфінг) та глушіння супутникового сигналу. В цих умовах для забезпечення навігаційної безпеки судноплавства являється доцільним більш широке використання гідроакустичних засобів навігації. Гідроакустичні засоби судна призначені для вирішення задач навігації надводних і підводних об'єктів (вимірювання вектору швидкості судна, визначення координат підводного об'єкта, вироблення навігаційних рекомендацій) з метою забезпечення безпеки плавання. Такими гідроакустичними засобами являються навігаційні ехолоти, гідроакустичні лаги, гідроакустичні навігаційні системи з гідроакустичними донними маяками. Гідроакустичні навігаційні засоби комплексуються з іншими навігаційними засобами – гіроскопічними, радіонавігаційними, астрономічними, супутниковими навігаційними системами.

Очевидним достоїнством гідроакустичних навігаційних засобів являється стійкість до можливих спроб порушити їх роботоспроможність, як це має місце сьогодні при використанні супутникової навігації. Гідроакустичний сигнал неможливо спотворити або придушити на

значних морських акваторіях існуючими засобами гідроакустичної протидії. Гідроакустичні навігаційні засоби наряду з обладнанням акваторій, фарватерів, підходів до портів гідроакустичними маяками дозволяють надійно забезпечити навігаційну проводку суден (кораблів) в тому числі в стиснутих акваторіях. Необхідно враховувати, що гідроакустичне озброєння суден являється ефективним засобом виявлення міноподібних об'єктів, що підвищує навігаційну безпеку плавання суден. Гідроакустичні системи також являються неодмінною складовою безекіпажних надводних і підводних апаратів, які використовуються для вирішення розвідувальних, гідрографічних задач і для боротьби з мінною загрозою.

Пріоритетним напрямком розвитку гідроакустичних навігаційних систем і засобів підводного спостереження є низькочастотна активна гідролокація. Явно виражена тенденція зниження значень робочих частот гідроакустичних станцій (ГАС) із зосередженими антенами. За останні роки робочі частоти ГАС із зосередженими антенами знизилась в середньому від 9,35 кГц до 5,85 кГц. Однак, зниження робочих частот веде до збільшення масогабаритних характеристик антен. Подальше зниження частот ехопеленгування ГАС надводних кораблів (суден) із підкільовими та буксируваними антенами затруднене в силу наступних причин:

- обмеження можливості розміщення на надводних кораблях (суднах) антенних систем з великими масогабаритними характеристиками;
- діапазон оптимальних частот, з урахуванням вимог по дальності дії та різноманітності умов, у яких передбачається експлуатація ГАС, лежить у межах 3-5 кГц. Таким чином є актуальним проведення досліджень щодо збільшення дальності виявлення підводних об'єктів шляхом зниження частот активної гідролокації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Розв'язок проблеми збільшення дальності дії гідроакустичних станцій (ГАС) обумовлює необхідність зниження значень їх робочих частот [1, 2]. При цьому вимога наявності максимального коефіцієнта корисної дії перетворювача може бути реалізована тільки при умові випромінювання звуку на частоті механічного резонансу перетворювача [3]. При побудові низькочастотних гідроакустичних перетворювачів ця вимога суттєво обмежує застосування існуючих механічних коливальних систем – циліндричної та стрижневої, на основі яких в теперішній час будуються сучасні гідроакустичні перетворювачі [4-9], і потребує пошуку нових коливальних систем. Дійсно, циліндричний випромінювач з резонансною частотою 510 Гц має діаметр порядку 2000 мм. Досвід свідчить про те, що, наприклад, півхвильовий стрижень із п'єзокераміки ЦТБС-3 при резонансній частоті 500 Гц мав би довжину 3200 мм [4]. Наведені низькочастотні випромінювачі мають неприйнятно великі для виготовлення та експлуатації розміри і масу. Їх механічні коливальні системи, що орієнтовані на використання поздовжніх коливань, відносяться до класичних типів коливальних систем і не забезпечують можливість використання у низькому діапазоні частот. Для низькочастотного діапазону більш доцільним є використання коливальних систем зі згинними модами коливань на основному резонансі. Практична реалізація цієї ідеї дозволяє створити нові типи низькочастотних випромінювачів, які мають еліптичну форму випромінюючої поверхні.

При побудові активної ГАС першочергове значення набуває створення компактного низькочастотного випромінюючого модуля, при чому перевага надається таким випромінювачам, які забезпечують малий лобовий опір (актуально для безекіпажних надводних і підводних апаратів). Реалізація цієї вимоги здійснюється по декільком напрямках. Одним з них є застосування направлених (або кругових) потужних еліптичних перетворювачів абочного та поздовжньо-згинного типів [5]. Другий напрямок включає в себе застосування кругових потужних водозаповнених циліндричних перетворювачів, розміщуючи їх корпусі судна (апарата) таким чином, щоби їх поздовжні осі співпадали з напрямком діаметральної площини, тим самим суттєво знижуючи переріз по міделю випромінюючого модуля. Третій напрямок створюють низькочастотні біморфні пластинчаті перетворювачі. Маючи малий поперечний і малий хвильовий розмір, вони можуть мати створені на низькі частоти (до 30-50 Гц). Відносно мала випромінююча потужність може бути збільшена шляхом набору таких перетворювачів у вигляді лінійної антенної решітки з гнучкими зв'язками між її елементами.

Метою роботи є визначення акустичних полів, які створюються еліптичними випромінювачами.

Викладення основного матеріалу дослідження. Визначимо звукове поле випромінювача, фізична модель якого наведена на рис. 1 а. Поздовжньо-згинний випромінювач складається із 2 частин – п'єзокерамічного стрижня 1 та металеві еліптичної оболонки 2.

Таким чином в якості розрахункової моделі поздовжньо-згинного випромінювача приймемо нескінчений еліптичний циліндр з заданим розподілом коливальної швидкості вздовж його направляючої та випромінюючої поверхні. При цьому поздовжня вісь випромінювача розміщена вздовж осьової координати z , а велика і мала вісі оболонки співпадають з осями, що відповідають кутовим координатам $\eta = 0$ і $\eta = \frac{\pi}{2}$. Тоді дві ідентичні арки з радіусами r_0 і кутами розкриву θ_0 утворюють контур еліпсу μ_0 . Залежності, які характеризують зв'язок між координатами еліптичного циліндра та параметрами, що визначають геометрію поздовжньо-згинного випромінювача, визначаються виразами:

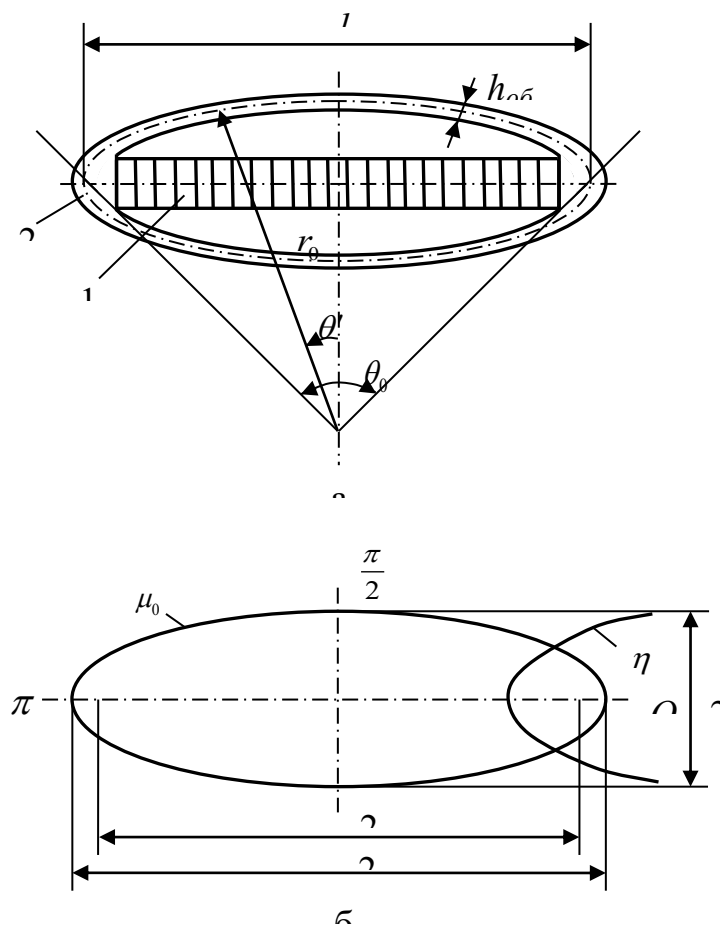


Рисунок 1 – Поперечний переріз коливальної системи поздовжньо-згинного випромінювача (а) та його представлення в системі координат еліптичного циліндра (б)
($2d$ – міжфокусна відстань)

Розрахункова модель, що адекватна фізичній моделі еліптичного перетворювача (рис. 1 а), зображена на рис. 1 б. Вона представлена в системі координат еліптичного циліндра, де $2d$ – міжфокусна відстань; $2a$ і $2b$ – велика і мала вісі еліптичного циліндра; μ і η – радіальна та кутлова координати еліптичної системи координат.

$$\eta = \arcsin \left\{ \left[1 - \left(\frac{\operatorname{tg} \theta' / 2}{th \mu_0} \right)^2 \right] / \left[1 + \left(\frac{\operatorname{tg} \theta' / 2}{th \mu_0} \right)^2 \right] \right\}; \quad (1)$$

$$\theta' = 2 \operatorname{arc} \operatorname{tg} \left(\frac{\sin \eta - 1}{\cos \eta} th \mu_0 \right); \quad (2)$$

$$\mu_0 = \operatorname{Arth} \left(\operatorname{tg} \frac{\theta_0}{4} \right). \quad (3)$$

Для визначення акустичного поля поздовжньо-згинного випромінювача потрібно знайти розв'язок хвильового рівняння Гельмгольца в системі координат еліптичного циліндра:

$$\Delta \Phi + r^2 \Phi = 0, \quad (4)$$

де Δ – оператор Лапласа, Φ – потенціал коливальної швидкості.

Для визначення граничних умов будемо виходити із рівності об'ємних швидкостей $\dot{U}(\theta')$ на поверхні поздовжньо-згинного випромінювача і розрахункової моделі – відповідного еліптичного циліндра з радіальною координатою μ_0 .

$$\dot{U}(\theta') dl_{\text{ц}} = \dot{U}(\eta) dl_e \quad \text{при} \quad \begin{cases} -\frac{\theta_0}{2} < \theta' < \frac{\theta_0}{2}; \\ 0 \leq \eta \leq \pi, \end{cases}$$

де $\dot{U}(\theta') = \dot{U}_0 f(\theta')$; $\dot{U}(\eta) = \dot{U}_0 f(\eta)$; $dl_{\text{ц}} = r_0 d\theta'$; $dl_e = h \mu_0 d\eta$; $h \mu_0$ – коефіцієнт Ламе h для поверхні $h \mu_0$; $\theta' = -\frac{\theta_0}{2}$; $\theta' = 0$; $\theta' = 0$ і $\theta' = \frac{\theta_0}{2}$ – точки верхньої арки (рис. 1), що суміщаються з точками $\eta = 0$, $r = \frac{\pi}{2}$, $r = \pi$ на поверхні еліпса.

В системі координат еліптичного циліндра рівняння Гельмгольца (4) запишеться у вигляді:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \eta^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \mu^2} + k^2 h^2 \Phi = 0. \quad (5)$$

Для визначення акустичного поля поздовжньо-згинного випромінювача рівняння (5) потрібно розв'язати з урахуванням граничної умови на поверхні $\mu = \mu_0$ еліптичного циліндра та умови випромінювання на безкінечності:

$$\dot{U}(\eta) = -\operatorname{grad} \Phi = -\frac{\partial \Phi}{h \partial \mu} \quad \text{при} \quad 0 \leq \eta \leq \pi \quad (6)$$

Оскільки в системі координат еліптичного циліндра можливий розподіл змінних в рівнянні Гельмгольца, розв'язок рівняння (5) набуває вигляду:

$$\Phi(\eta, \mu) = \Phi_1(\eta) \Phi_2(\mu). \quad (7)$$

Після підстановки виразу (7) в рівняння (5) і наступного розділу змінних отримаємо:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \Phi_1}{\eta^2} - [(kd)^2 \cos^2 \eta - c] \Phi_1 &= 0; \\ \frac{d^2 \Phi_2}{d\mu^2} + [(kd)^2 ch^2 \mu - c] \Phi_2 &= 0, \end{aligned} \quad (8)$$

де c – стала розділення.

Із фізичних міркувань зрозуміло, що коливання випромінювача симетричні відносно осей еліпсу. Тому при записі розв'язків рівнянь (8) використаємо парні періодичні (з періодом π)

кутові функції Мат'є першого роду $Sl_{2n}(kd, \eta)$ та відповідні їм радіальні функції Мат'є третього роду $Hl_{2n}^{(1)}(kd, \mu)$:

$$\Phi = \sum_{n=0}^{\infty} A_{2n} Sl_{2n}(kd, \eta) Hl_{2n}^{(1)}(kd, \mu), \quad (9)$$

де A_{2n} – комплексні коефіцієнти, що залежить від граничних умов.

Функція $Hl_{2n}^{(1)}(kd, \mu)$ характеризує хвилю, що розходиться від випромінювача і задовольняє вимоги випромінювання на нескінченості при великих значеннях аргументу.

Для визначення коефіцієнтів A_{2n} підставимо вираз (9) в граничну умову (6), розкладемо коливальну швидкість $\dot{U}(\eta)$ в ряд по кутовим функціям Мат'є $Sl_{2n}(kd, \eta)$, помножимо обидві частини нового розкладання на функцію $Sl_k(kd, \eta)$ та проінтегруємо по змінній η в межах від 0 до 2π . Тоді на основі властивості ортогональності функцій Мат'є

$$\int_0^{2\pi} Sl_{2n}(kd, \eta) Sl_k(kd, \eta) d\eta = 2\pi$$

отримаємо:

$$A_{2n} = - \frac{\int_0^{2\pi} \dot{U}(\eta) Sl_{2n}(kd, \eta) h \mu_0 d\eta}{Ml_{2n}^l(kd) \frac{dHl_{2n}^{(1)}(kd, \mu)}{d\mu} / \mu_0}. \quad (10)$$

де $Ml_{2n}^l(kd) = \int_0^{2\pi} [Sl_{2n}(kd, \eta)]^2 d\eta$ – нормуюча функція.

Використаємо отримані аналітичні співвідношення для визначення направлених властивостей поздовжньо-згинного випромінювача в поперечній площині. Зауважимо, що в поздовжній площині його направленість визначається як направленість протяжної лінійної антени.

Для визначення акустичного тиску в дальньому полі поздовжньо-згинного випромінювача скористаємось асимптотичним наближенням для радіальної функції Мат'є $Hl_{2n}^{(1)}(kd, \mu)$ при $\mu \rightarrow 0$ [10]:

$$Hl_{2n}^{(1)}(kd, \mu) / \mu \rightarrow 0 \approx \frac{(-1)^n}{\sqrt{kdch\mu}} e^{j(kdch\mu - \frac{\pi}{4})}.$$

Оскільки при $\mu \rightarrow 0$ еліптичний циліндр перетворюється в круговий і $dch\mu \rightarrow r$, то останній вираз набуває вигляду:

$$Hl_{2n}^{(1)}(kd, \mu) / \mu \rightarrow 0 \approx \frac{\sqrt{2}(-1)^n e^{jkr}}{(1-j)\sqrt{kr}}. \quad (11)$$

З урахуванням виразу (11) звуковий тиск в дальньому полі $p = -j\omega\rho_v \Phi$ становить:

$$p(\eta) = -\omega\rho_v \frac{\sqrt{2}e^{jkr}}{(1-j)\sqrt{kr}} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n A_{2n} Sl_{2n}(kd, \eta),$$

а характеристика направленості $R(\eta)$ поздовжньо-згинного випромінювача в поперечній площині визначається виразом:

$$R(\eta) = \frac{|p(\eta)|}{|p(\eta=0)|} = \frac{\left| \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n A_{2n} Sl_{2n}(kd, \eta) \right|}{\left| \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n A_{2n} \right|}. \quad (12)$$

Розрахунки згідно з виразом (12) були виконані при різних значеннях хвильового розміру ka з переходом до параметру kd з використанням виразів:

$$\frac{l}{2} = r_0; \quad \sin \frac{\theta_0}{2} = dch\mu_0; \quad ka = kdch\mu_0.$$

Аналіз схеми побудови (рис. 1) поздовжньо-згинного випромінювача свідчить про те, що він має дві особливості. Перша полягає в тому, що в поперечному перерізі поздовжньо-згинний випромінювач має відносно малі розміри, завдяки чому вони є малими порівняно з довжиною робочої хвилі випромінювача. Друга особливість пов'язана з тим, що коливання випромінюючої поверхні випромінювача є неоднорідними. Оскільки коливання еліптичної оболонки є згинними, це обумовлює появу на окремих її ділянках, які прилягають до великої осі еліпсу, протифазних коливань порівняно з іншими ділянками оболонки. Фізично наведені особливості дозволяють прогнозувати наступне. Малі хвильові розміри поперекового перерізу поздовжньо-згинного випромінювача є умовою ненаправленості або слабкої направленості його в площині поперекового перерізу. Наявність на випромінюючій поверхні поздовжньо-згинного випромінювача ділянок з протифазними коливаннями свідчить про те, що в площині поперечного перерізу в направлених властивостях перетворювача повинні з'явитись певні провали, кількісні значення яких визначатимуться параметрами коливальної системи випромінювача.

Наведене підтверджується результатами розрахунків, представленими на рис. 2.

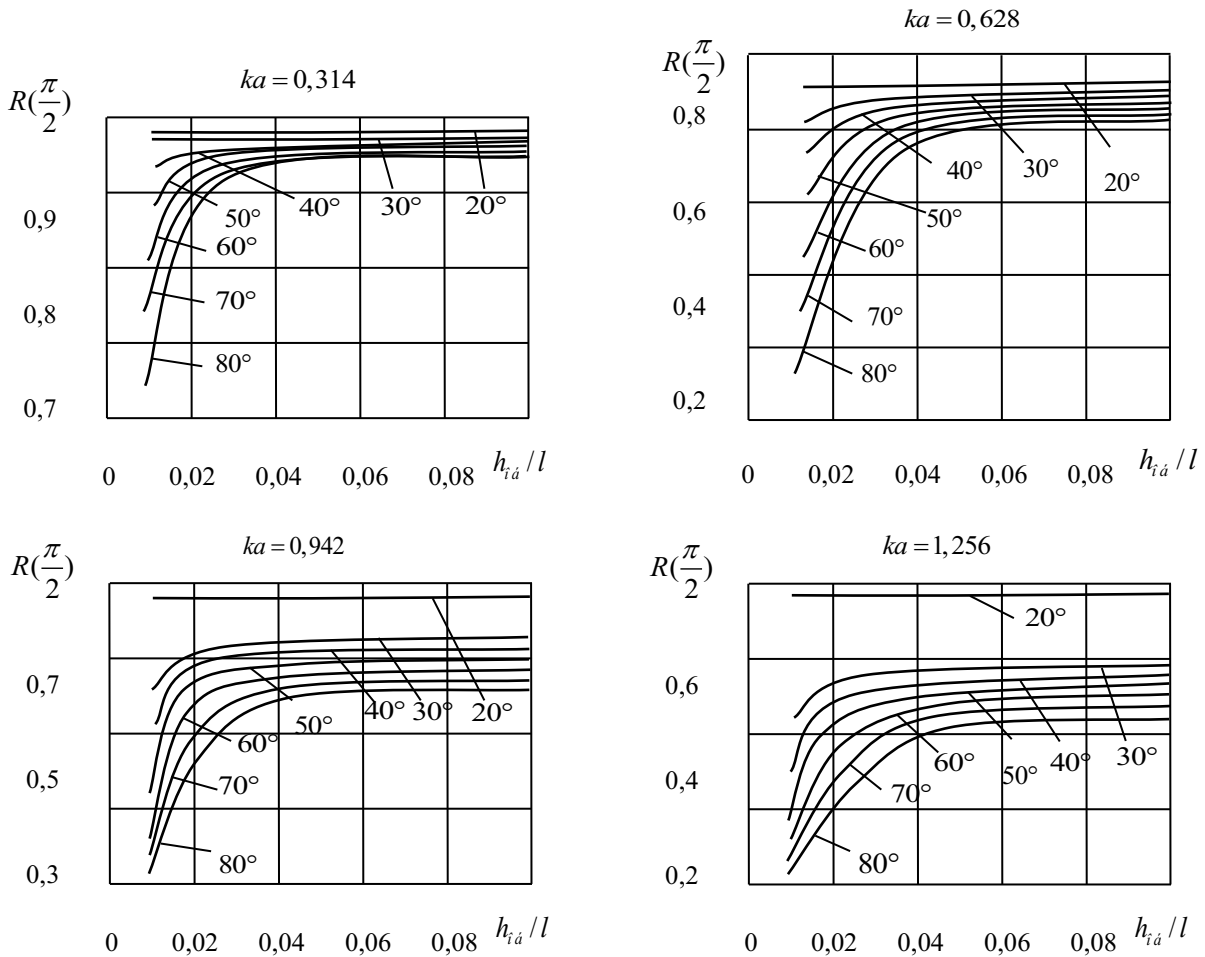


Рисунок 2 – Залежності нерівномірності характеристики направленості в поперечній площині $R(\pi/2)$ від геометричних параметрів коливальної системи при фіксованих значеннях співвідношення механічних параметрів і хвильового розміру поздовжньо-згинного випромінювача

Форми розподілу коливань випромінюючої оболонки визначаються:

- жорстким закріпленням еліптичної оболонки на торцях п'єзокерамічного стрижня;
- діапазоном кутів розкриття θ_0 , що реалізуються відносною товщиною оболонки $h_{об}/l$.

Розрахунки по формулі (12) виконані для різних значень хвильового розміру ka і різних кутів розкриття θ_0 . Їх аналіз показує, що в межах хвильових розмірів, які можливо практично реалізувати в поздовжньо-згинних випромінювачах, цим випромінювачам властива слабка направленість в площині кривизни оболонки. Характеристика направленості має форму овалу з максимумом акустичного тиску вздовж великої осі. Цей тиск монотонно спадає до мінімуму, направлено вздовж малої осі.

Зі збільшенням хвильового розміру та випуклості оболонки направленість стає більш вираженою. Так, при хвильовому розмірі $ka=0,942$ і куті розкриття оболонки $\theta_0=80^\circ$ нерівномірність характеристики направленості при відносній товщині оболонки $\frac{h_{об}}{l} \geq 0,05$ становить близько 4 дБ. Це наглядно демонструють криві рис. 2, які свідчать про провали в характеристиці направленості поздовжньо-згинного перетворювача вздовж малої осі.

Фізичною причиною появи провалів в характеристиці направленості поздовжньо-згинного випромінювача вздовж його малої осі при збільшенні його хвильових розмірів і малих значеннях відношення товщини оболонки $h_{об}$ до її довжини l в поперечному перерізі є значна різниця, близька до протилежної, хвильових розмірів, які проходять звукові хвилі, випромінені ділянками еліптичної оболонки, що лежать по обидві сторони від великої осі еліпсу, до точок, що прилягають до його малої осі. Звідси слідує і технічний шлях зменшення провалів в характеристиці направленості поздовжньо-згинного перетворювача. Він полягає в зменшенні зазначеної різниці в хвильових шляхах названих звукових хвиль. Досягається розміщенням жорстких акустичних екранів, наприклад, у вигляді металевих пластин [4], біля бокових торців поздовжньо-згинного перетворювача.

Завершуючи розгляд направлених властивостей поздовжньо-згинних гідроакустичних перетворювачів, звернемо увагу ще на таку особливість їх застосування в корабельному озброєнні. В останні роки значне поширення знайшли корабельні активно-пасивні ГАС з гнучкими протяжними буксируваними антенами, оскільки це низькочастотні ГАС, то в режимі випромінювання звуку на резонансі робочої частоти вони потребують значних розмірів. В той же час існує вимога зменшення габаритів буксируваних пристроїв, в яких розміщуються випромінювачі, особливо розміри в горизонтальній площині. Такими особливостями володіють еліптичні перетворювачі. Саме з їх допомогою можливо суттєво зменшити лобовий опір буксируванню антен кораблем [2].

Висновки. Практична реалізація тенденції зниження робочих частот гідроакустичного озброєння потребує пошуку нових електромеханічних коливальних систем, які мали б менші габаритні розміри та масу, ніж існуючі кругові циліндричні та стрижньові системи. Звичайно в таких системах використовують згинні коливання.

Запропонована схема побудови еліптичного поздовжньо-згинного перетворювача. Наведена його фізична модель, яка складається із активного п'єзокерамічного елемента стрижньового типу, що здійснює поздовжні коливання, та металевої еліптичної оболонки, яка перетворює ці поздовжні коливання в згинні коливання оболонки.

Розроблена розрахункова модель поздовжньо-згинного випромінювача і на її основі в еліптичній системі координат з використанням кутових і радіальних функцій Мат'є розв'язане рівняння Гельмгольца відносно потенціалу швидкості акустичного поля.

На основі отриманих співвідношень для акустичного поля визначені направлені властивості поздовжньо-згинного випромінювача. Встановлена доцільність його використання в якості низькочастотного випромінювача в активно-пасивних ГАС з гнучкими протяжними буксируваними антенами.

ЛІТЕРАТУРА

1. А.В. Дерепя, А.Г. Лейко, Ю.Я. Меленко. Основы военно-технических исследований. Теория и приложения. Т.7. Комплексная система «гидроакустическое вооружение – надводный корабль». Проблемные аспекты системы «гидроакустическая станция – надводный корабль» с антеннами, размещенными в корпусе корабля, Киев : ИД Д. Бураго, 2014. – 426 с.
2. А.В. Дерепя, А.Г. Лейко, Ю.Я. Меленко Основы военно-технических исследований. Теория и приложения. Т.8. Комплексная система «гидроакустическое вооружение – надводный корабль». Проблемные аспекты системы «гидроакустическая станция – надводный корабль» с антеннами переменной глубины. Киев : ИД Д. Бураго, 2016. – 400 с.
3. Гринченко В. Т., Вовк И. В., Мацьпура В. Т. Основы акустики. Киев : Наук. думка, 2007. – 640с.
4. В.С. Дідковський, С.М. Порошин, О.Г. Лейко, А.О. Лейко, О.І. Дрозденко. Конструювання акустичних приладів і систем для мультимедійних акустичних технологій. Київ : НТУУ «КПІ», 2013. – 390 с.
5. В.С. Дідковський, О.Г. Лейко, В.Г. Савін. Електроакустичні пезокерамічні перетворювачі. Кіровоград : ІМЕКС-ЛТД., 2013. – 448 с.
6. Гринченко В. Т., Вовк И. В. Волновые задачи рассеяния звука на упругих оболочках. Київ : Наук. думка, 1986. – 240с.
7. Гринченко В. Т., Вовк И. В., Мацьпура В. Т. Волновые задачи акустики. Киев : Интерсервис, 2013. – 572с.
8. V. T. Grinchenko, I. V. Vovk, V. T. Matsypura. Acoustic Wave Problems. – Begell House, 2018. – 439 p.
9. Korzhyk O., Filipova N., Vlasuk A. AFC of a Cylindrical Electroelastic Receiving Multimode Converter. IEEE 36 Conference on ELNANO, 2016. P. 391-394.
10. Мак-Лахлан. Теория и приложения функций Матье. М. : ИЛ, 1953. – 475с.

REFERENCES

1. A.V. Derepa, A.G. Leyko, Yu.Ya. Melenko. Osnovy voenno-tehnicheskikh issledovaniy. Teoriya i prilozheniya. T.7. Kompleksnaya sistema «gidroakusticheskoe vooruzhenie – nadvodnyiy korabl». Problemnyie aspektyi sistemyi «gidroakusticheskaya stantsiya – nadvodnyiy korabl» s antennami, razmeschennyimi v korpuse korablya, Kiev : ID D. Burago, 2014. – 426 s.
2. A.V. Derepa, A.G. Leyko, Yu.Ya. Melenko Osnovy voenno-tehnicheskikh issledovaniy. Teoriya i prilozheniya. T.8. Kompleksnaya sistema «gidroakusticheskoe vooruzhenie – nadvodnyiy korabl». Problemnyie aspektyi sistemyi «gidroakusticheskaya stantsiya – nadvodnyiy korabl» s antennami peremennoy glubinyi. Kiev : ID D. Burago, 2016. – 400 s.
3. Grinchenko V. T., Vovk I. V., Matsyipura V. T. Osnovy akustiki. Kyiv: Nauk. dumka, 2007. – 640s.
4. V.S. Didkovskiy, S.M. Poroshin, O.G. Leyko, A.O. Leyko, O.I. Drozdenko. Konstruyuvannya akustichnih priladiv i sistem dlya multimediynih akustichnih tehnologiy. Kyiv : NTUU «KPI», 2013. – 390 s.
5. V.S. Didkovskiy, O.G. Leyko, V.G. Savin. Elektroakustichni pEzokeramichni peretvoryuvachi. Kirovograd : IMEKS-LTD., 2013. – 448 s.
6. Grinchenko V. T., Vovk I. V. Volnovyie zadachi rasseyaniya zvuka na uprugih obolochkah. Kyiv: Nauk. dumka, 1986. – 240s.
7. Grinchenko V. T., Vovk I. V., Matsyipura V. T. Volnovyie zadachi akustiki. Kiev : Interservis, 2013. – 572s.
8. V. T. Grinchenko, I. V. Vovk, V. T. Matsypura. Acoustic Wave Problems. – Begell House, 2018. – 439 p.
9. Korzhyk O., Filipova N., Vlasuk A. AFC of a Cylindrical Electroelastic Receiving Multimode Converter. IEEE 36 Conference on ELNANO, 2016. P. 391-394.
10. Mak-Lahlan. Teoriya i prilozheniya funktsiy Mate. M. : IL, 1973. – 475s.