

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

ГУСАК ЗАХАР ТАРАСОВИЧ



УДК 534-141, 534.23

**ВИПРОМІНЮВАННЯ ГІДРОАКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ
ЦИЛІНДРИЧНИМИ П'ЄЗОКЕРАМІЧНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ З
ЕКРАНАМИ**

Спеціальність 05.09.08 – прикладна акустика та звукотехніка

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2017

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України на кафедрі акустики та акустелектроніки.

- Науковий керівник – доктор технічних наук, професор
Лейко Олександр Григорович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського» (м. Київ),
професор кафедри акустики та аустоелектроніки
- Офіційні опоненти – доктор технічних наук, професор
Мислович Михайло Володимирович,
Інститут електродинаміки
Національної академії наук України (м. Київ),
завідувач відділом теоретичної електротехніки
- кандидат технічних наук, доцент
Мелешко Микола Андрійович,
Національний авіаційний університет (м. Київ),
професор кафедри комп'ютерних мультимедійних
технологій

Захист відбудеться «21» березня 2017 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.002.19 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою 03056, м. Київ-56, просп. Перемоги, 37, корпус 12, аудиторія 412.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ-56, просп. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «17» лютого 2017 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



В.Б. Швайченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Екрановані гідроакустичні циліндричні п'єзокерамічні випромінювачі знайшли широке застосування в практичній гідроакустиці в якості як самостійних гідроакустичних антен, так і окремих елементів багатоелементних антенних решіток. Їх особливістю є поєднання в собі двох функцій – функції перетворення електричної енергії спочатку в механічну, а потім в акустичну, і функції формування акустичного поля в оточуючому середовищі. Оскільки в розрахунковому плані врахування цієї особливості було пов'язано з використанням складних розрахункових моделей і математичних методів, які довгий час були недостатньо розвинутими, розрахунки випромінювачів здійснювались з незалежним урахуванням кожної з цих функцій. Зв'язок між ними здійснювався через задання на випромінюючій поверхні нормальної складової коливальної швидкості. Відносно перетворення енергії такий підхід був розвинений в роботах Б.С. Аронова, Г.М. Свердліна, Л.С. Старова, О.І. Віноградова та ін. Розвитку підходів до визначення акустичних полів екранованих випромінювачів присвятили свої дослідження В.Т. Грінченко, І.В. Вовк, О.В. Коржик, О.Г. Лейко, В.Т. Маципура, В.Г. Савін та ін.

Але такій класичній постановці задачі випромінювання звуку притаманний суттєвий недолік, який полягає в тому, що задання значень коливальної швидкості принципово виключає можливість врахування зміни цієї коливальної швидкості за рахунок реакції оточуючого середовища. Реальні випромінювачі звуку характеризуються скінченими значеннями свого внутрішнього механічного імпедансу, тому коливальні швидкості їх поверхонь суттєво залежать як від внутрішнього імпедансу, так і від реакції оточуючого середовища, як зовнішнього, так і внутрішнього. Наведені обставини є причиною того, що рівні всіх фізичних полів, створюваних реальними випромінювачами, можуть суттєво відрізнятися від розрахованих з використанням ідеалізованих схем.

В останні десятиліття з метою усунення вказаних розбіжностей значні зусилля були направлені на розробку методів розв'язку так званих «наскрізних» задач, згідно з якими для заданого рівня електричної напруги на електричному вході п'єзокерамічного випромінювача можливо розрахувати рівні всіх фізичних полів, які приймають участь у перетворенні електричної енергії в акустичну і формуванні останньої в оточуючих середовищах. Вони базуються на строгих методах розв'язку задач зв'язаних полів в багатозв'язаних областях. Їх розробці значну увагу приділили В.Т. Грінченко, О.М. Гузь, А.Є. Бабаєв, І.В. Вовк, В.Д. Кубенко, О.В. Коржик, О.Г. Лейко, В.Т. Маципура, О.М. Петріщев., А.Ф. Улітко, О.М. Шульга, Б. Аронов, D.D. Ebenezer та ін. В той же час конкретним питанням, пов'язаним з розробкою методів розрахунків циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів та систем на їх основі з урахуванням багатопланових особливостей їх конструктивного виконання, практично приділялось мало уваги. Виключення становлять циліндричні перетворювачі, розміщені в узгоджувальних шарах, розглянуті в роботах

О.В. Коржика. Тому розробка підходів до визначення фізичних полів екранованих циліндричних випромінювачів з урахуванням особливостей їх конструктивного виконання є актуальною і значущою задачею завдяки широкому застосуванню їх в практичній гідроакустиці.

Зв'язок роботи з науковими планами, програмами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі акустики та акустoeлектроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Виконані в дисертації дослідження проводились в рамках: держбюджетної прикладної науково-дослідної роботи «Розробка ширококутового акустичного ехоспектрометра та нової ефективної програми універсального аудіологічного скринінгу новонароджених» (№ державної реєстрації 0116U003795) та ініціативної науково-дослідної роботи «Сучасні завдання гідроелектропружності» (№ державної реєстрації 0113U008184).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розробка теоретичних засад проектування екранованих циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів з урахуванням взаємодії електричних, механічних та акустичних полів в них та практична реалізація цих засад.

Для досягнення поставленої мети необхідне вирішення таких завдань:

1. Розробка розрахункових моделей екранованих циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів з урахуванням особливостей виконання їх конструкцій.
2. Розвиток на основі строгого методу зв'язаних полів в багатозв'язаних областях ефективних підходів до визначення фізичних полів екранованих п'єзокерамічних випромінювачів з конкретними геометричними, фізичними та хвильовими властивостями елементів їх конструкцій та розробка на їх основі аналітичних співвідношень для визначення цих полів.
3. Виконання на основі одержаних розв'язків систематизованих досліджень властивостей механічних, акустичних та електричних полів екранованих випромінювачів і встановлення закономірностей їх змін в залежності від характеристик конструкцій.
4. Експериментальне підтвердження можливості і достовірності опису запропонованими розрахунковими моделями структури та особливостей досліджуваних полів.
5. Фізичне осмислення одержаних результатів та розробка на його основі конкретних рекомендацій відносно проектування екранованих циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів.

Об'єкт дослідження – процеси взаємного перетворення електричної, механічної та акустичної енергій в оточуючих середовищах при випромінюванні звуку екранованими п'єзокерамічними циліндричними випромінювачами, формування розподілу акустичної енергії в оточуючих середовищах.

Предмет дослідження – кругові циліндричні п'єзокерамічні випромінювачі з акустично м'яким екраном у вигляді незамкнутого кільцевого шару.

Методи дослідження. В роботі використані методи постановки та розв'язку задач стаціонарної гідроелектропружності та методи математичної фізики. До них відносяться метод зв'язаних полів в багатозв'язаних областях, метод розділення змінних, метод часткових областей, методи розв'язку нескінченних систем лінійних алгебраїчних рівнянь.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше виконано наскрізні постановки та строгими методами визначені аналітичні співвідношення для основних фізичних полів, які приймають участь у випромінюванні звуку екранованими циліндричними п'єзокерамічними випромінювачами силової та компенсованої конструкцій з окружною та радіальною поляризаціями.
2. Для екранованих циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів вперше виконані систематизовані дослідження властивостей електричних, механічних та акустичних полів та зв'язків між ними та вплив на них геометричних, фізичних та хвильових характеристик елементів конструкцій випромінювачів.
3. Врахування зв'язаності фізичних полів дозволило вперше встановити в екранованому циліндричному п'єзокерамічному випромінювачі:
 - появу у складі механічних коливань крім нульової моди, на якій у випромінювач при вибраному способі електричного навантаження «закачується» електрична енергія, наступних мод коливань, порівняних по амплітуді з нульовою, і ефективному перерозподілі енергії між ними;
 - збагачення і розширення спектра частот акустичного поля випромінювача без суттєвого зменшення їх енергетичної ефективності;
 - перехід при певних умовах випромінювачів із режиму поглинання електричної енергії від збуджуючого електричного пристрою в режим її генерації завдяки поглинанню енергії із акустичного поля в оточуючому середовищі.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

- в отриманні можливостей: виконувати розрахунки кількісних значень параметрів механічних, акустичних та електричних полів екранованих циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів в залежності від параметрів та характеристик конкретних елементів виконання їх конструкцій: типу конструкції (силової чи компенсованої) та фізичних властивостей середовищ, що заповнюють їх внутрішні об'єми; діаметру та товщини п'єзокерамічної оболонки, складу утворюючої її п'єзокераміки та характеру її поляризації; конфігурації та розмірів акустичного екрану випромінювачів; визначати з єдиних методичних позицій кількісні параметри екранованих циліндричних випромінювачів в однакових умовах, але з різним типом і параметрами виконання

- конструкцій, співставляти їх між собою і вибрати при проектуванні найбільш раціональний варіант побудови; розраховувати електричні елементи в схемах заміщення п'єзокерамічних випромінювачів при проектних роботах по узгодженню електронних генераторів з випромінювачами в випромінюючих трактах гідроакустичної апаратури;
- в запропонованні підходів і визначенні умов, при яких екранований випромінювач може мати зменшені в кілька разів відносно основного резонансу його п'єзокерамічної оболонки нижчі резонансні частоти без суттєвого погіршення, а в ряді випадків навіть підвищення його енергетичної ефективності;
 - у виявленні фізичних ефектів та умов їх виникнення, які в значній мірі негативно можуть вплинути на енергетичну ефективність екранованих циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів та суттєво ускладнити узгодження випромінювачів з електронними генераторами.

Результати дисертаційної роботи впроваджено в Державному підприємстві «Київський науково-дослідний інститут гідроприладів» при виконанні ряду дослідно-конструкторських робіт, зокрема по контракту №15DMAС/YZD589UA від 28.08.2015 р. з КНР та ДКР «Зірниця-58250», що підтверджується відповідним актом впровадження. Отримані результати використовуються у навчальному процесі НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» при підготовці технічних спеціалістів з акустики, зокрема по дисципліні «Електроакустичні перетворювачі».

Особистий внесок здобувача. У наукових працях, виконаних у співавторстві, здобувачу належать постановка та розв'язок задач, проведення чисельних досліджень, систематизований аналіз результатів та їх фізичне трактування. В патентах [7-9] здобувач здійснив розробку формули винаходу та виконав патентні дослідження.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертації обговорювались на:

- V науково-технічній конференції «Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки», м. Київ, 2014 р;
- акустичному симпозиумі «КОНСОНАНС – 2015», м. Київ, 2015 р;
- IV міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки 2016», м. Київ, 2016 р.

Публікації. Основний зміст дисертаційної роботи відображено у 13 наукових працях, у тому числі у 7 статтях у наукових фахових виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз даних (дві з них в Scopus та п'ять в Index Copernicus), 3 патентах України та 3 тезах доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура та об'єм дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 270 сторінок, у тому

числі 120 сторінок основного тексту, 146 рисунків та список використаних джерел із 128 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі дослідження, визначено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, наведено дані щодо їх апробацій.

У **першому розділі** визначені конструктивні особливості гідроакустичних циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів з екраном, які потрібно враховувати при визначенні фізичних полів випромінювачів, і їх відображення в розрахункових моделях. Наведено розв'язок задачі визначення фізичних полів гідроакустичних випромінювачів силової та компенсованої конструкцій з акустично м'яким екраном при використанні в конструкції п'єзокераміки як з окружною, так і радіальною поляризацією.

В загальному випадку циліндричні п'єзокерамічні випромінювачі складаються з активного елемента, в ролі якого виступає п'єзокерамічна циліндрична оболонка, та ряду пасивних елементів, які виконують окремі функції (герметизація, армування, екранування та ін.). Активний елемент являється п'єзокерамічним циліндром і може бути реалізованим співвісним набором суцільних кілець з використанням поперечного п'єзоефекту або сегментованих кілець, елементи яких представляють собою призми із поздовжнім п'єзоефектом. У конструктивному виконанні такі випромінювачі можуть бути силової та компенсованої конструкцій. В залежності від типу обраної конструкції внутрішня порожнина випромінювача може бути вакуумованою або заповненою електроізоляційним газом при нормальному атмосферному тиску (силова конструкція), або заповненою електроізоляційною рідиною для компенсації гідростатичного тиску, створюваного робочим середовищем (компенсована конструкція). В якості пасивного елемента, що використовується для формування направлених властивостей циліндричних випромінювачів, застосовують різного типу екрани. В дисертаційній роботі розглядаються екрани, виконані у вигляді незамкненого кільцевого шару, що прилягає і покриває частину поверхні циліндричного перетворювача. Виходячи з наведеного, до конструктивних елементів, з яких складається гідроакустичний циліндричний п'єзокерамічний випромінювач і які впливають на формування його фізичних полів, відносимо: матеріал п'єзокераміки, тип поляризації та характер її організації, розміри активного елемента, тип конструкційного виконання (силова або компенсована конструкція), тип внутрішнього середовища; в частині акустичного екрану: тип матеріалу, з якого виконано екран, розміри та кут розкриву екрану.

Приведена фізична модель говорить про те, що при її збудженні електричною напругою в ній відбуваються декілька процесів. Цілком зрозуміло, що до цих процесів відносяться: перетворення енергій з електричної в механічну та з механічної в акустичну. Процес перетворення енергії з механічної в акустичну супроводжується тим, що випромінювач формує певне

акустичне поле навколо себе. В процесі формування акустичного поля в оточуючому середовищі, для його опису, необхідно застосовувати хвильове рівняння, яке пов'язане з поширенням коливань. Процес електромеханічного перетворення енергії в випромінювачі можна описати рівняннями стану п'єзокераміки та диференційними рівняннями електропружних коливань циліндричних тіл. Таким чином, загальний процес роботи антени повинен описуватися диференційними рівняннями електропружних коливань циліндричної оболонки, рівняннями стану п'єзокераміки та хвильовими рівняннями розповсюдження коливань в оточуючих середовищах.

В основу математичних моделей конструкцій циліндричних випромінювачів з екраном покладені схеми, що зображені на рис. 1. Активний елемент 1 – п'єзокерамічний циліндр товщиною h , середнім радіусом r_0 та нескінченною висотою може бути сегментованим (рис. 1, а) або суцільним (рис. 1, б). Акустичний екран 2 в свою чергу представляє собою незамкнутий кільцевий шар з зовнішнім радіусом r_3 та кутом розкриття $2\varphi_0$. Матеріал, з якого виконано екран, приймаємо ідеально акустично м'яким. Внутрішня порожнина випромінювача може бути вакуумованою або заповненою певним акустичним середовищем з густиною ρ_1 та швидкістю звуку c_1 . Робоче середовище – вода із густиною ρ_2 та швидкістю звуку c_2 . Для збудження п'єзокераміки до її контактів підводиться різниця потенціалів, яка змінюється за гармонійним законом $\psi = \psi_0 e^{-i\omega t}$.

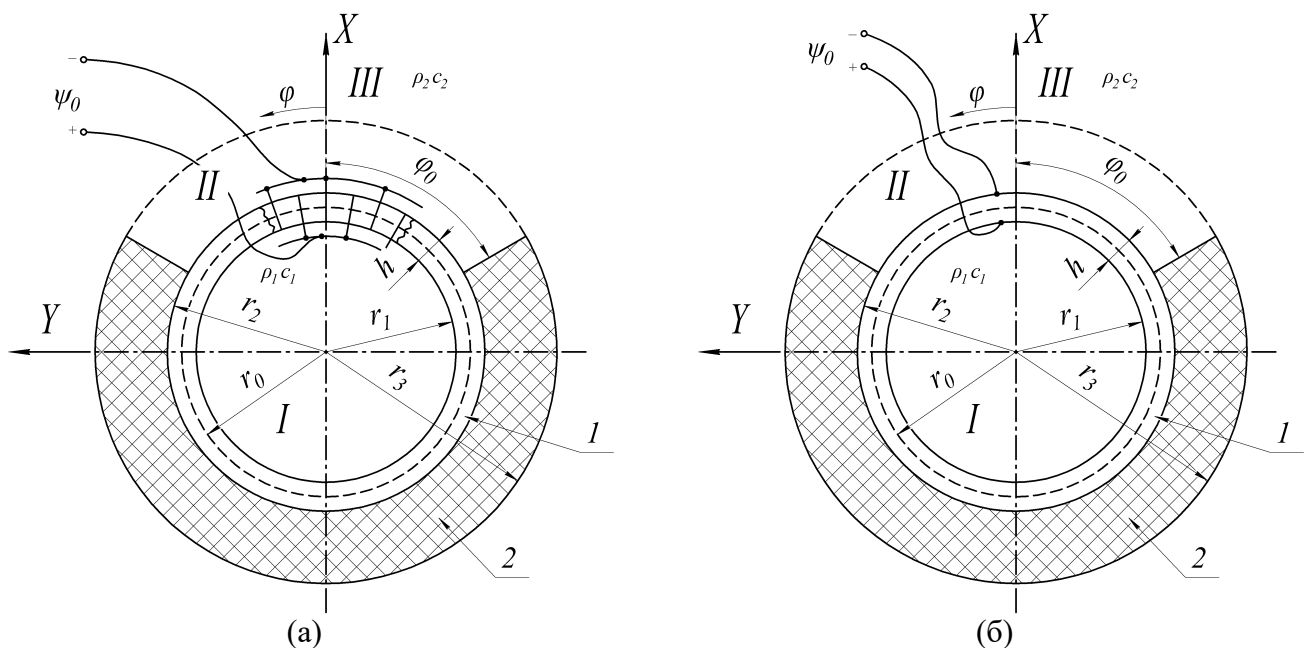


Рис. 1. Поперечний переріз екранованого випромінювача з сегментованим (а) активним елементом та суцільним (б) активним елементом

З врахуванням прийнятих допущень поле випромінювання описаного випромінювача може бути визначено через спільне рішення:

- хвильового рівняння Гельмгольца, що описує рух пружних середовищ всередині та ззовні випромінювача

$$\Delta\Phi + k_i^2\Phi = 0 \quad (1)$$

де Φ – потенціал коливальної швидкості, Δ – оператор Лапласа в циліндричній системі координат, k_i – хвильове число ($i=1,2$ – відповідно внутрішнє та зовнішнє середовища);

- диференційних рівнянь електропружних коливань циліндричної оболонки в вакуумі в циліндричних координатах:

$$\begin{cases} (1 + \beta_l) \frac{\partial^2 u}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial w}{\partial \varphi} - \beta_l \frac{\partial^3 w}{\partial \varphi^3} = \alpha_l \gamma \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}; \\ -\frac{\partial u}{\partial \varphi} + \beta_l \left(\frac{\partial^3 u}{\partial \varphi^3} - \frac{\partial^4 w}{\partial \varphi^4} \right) - w + \frac{e_{3l}}{C_{ll}^E} r_0 E + \frac{\alpha_k}{h} q_r = \alpha_l \gamma \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \end{cases} \quad (2)$$

де u , w – тангенціальна та радіальна складові вектору зміщень точок

серединної поверхні оболонки, φ – кутова координата, $\beta_l = \frac{h^2}{12r_0^2} \left(1 + \frac{e_{3l}^2}{C_{ll}^E \varepsilon_{33}^S} \right)$,

$\alpha_l = \frac{r_0^2}{C_{ll}^E}$, E_l – напруженість електричного поля в матеріалі оболонки, C_{ll}^E –

модулі пружності при нульовій електричній напруженості, e_{3l} – п'єзоконстанта, $l=1, 3$ – відповідно для радіальної та окружної поляризації, ε_{33}^S – діелектричні проникності при нульовій деформації, q_r – зовнішнє акустичне навантаження;

- рівнянь вимушеної електростатики, що відповідають електричним умовам задачі:

$$\vec{E} = -\text{grad}\psi, \text{div}\vec{D} = 0, \quad (3)$$

де \vec{E} та \vec{D} – вектори відповідно напруженості та індукції електричного поля.

Відповідно до методу «зв'язаних полів» усю область існування акустичного поля можна розділити на окремі області (рис. 1): I область – внутрішня область випромінювача ($|\varphi| \leq \pi, 0 \leq r \leq r_1$); II область – частина робочої області, яка замкнена між стінками екрану ($|\varphi| \leq \varphi_0, r_2 \leq r \leq r_3$) і яка контактує з робочою поверхнею випромінювача; III область – робоча область середовища з параметрами $\rho_2 c_2$ ($|\varphi| \leq \pi, r \geq r_3$), яка оточує випромінювач. Відповідний вибір граничних умов на межах цих областей формує зв'язок параметрів цих областей на цих межах і доповнює загальну систему рівнянь, що описують роботу екранованого випромінювача. Так граничні умови задачі мають наступний вигляд:

- на внутрішніх стінках екрану: $\Phi = 0, |\varphi| = \varphi_0, r_2 \leq r \leq r_3$;
- на зовнішній поверхні екрану: $\Phi = 0, \varphi_0 \leq |\varphi| \leq \pi, r = r_3$;
- рівність швидкостей коливань частинок середовища і швидкостей нормальних зміщень поверхні оболонки:

$$v = -\frac{\partial \Phi_I}{\partial r} = \frac{\partial w}{\partial t}, \quad |\varphi| \leq \pi, \quad r = r_1; \quad (4)$$

$$v = -\frac{\partial \Phi_{II}}{\partial r} = \frac{\partial w}{\partial t}, \quad |\varphi| \leq \varphi_0, \quad r = r_2; \quad (5)$$

- на поверхні оболонки випромінювача виконується умова рівності нормальних складових тензора напруг акустичному тиску, взятому із протилежним знаком:

$$q_r = -(P_{II} - P_I), \quad |\varphi| \leq \varphi_0, \quad r = r_2,$$

де $P_{II} = \rho_2 \frac{\partial \Phi_{II}}{\partial t}$; $P_I = \rho_1 \frac{\partial \Phi_I}{\partial t}$ – радіальні навантаження динамічного тиску;

$$\Phi_{III} = \begin{cases} \Phi_{II}, & |\varphi| \leq \varphi_0, \quad r = r_3; \\ 0, & \varphi_0 \leq |\varphi| \leq \pi, \quad r = r_3; \end{cases} \quad (6)$$

$$\frac{\partial \Phi_{III}}{\partial r} = \frac{\partial \Phi_{II}}{\partial r}; \quad |\varphi| \leq \varphi_0, \quad r = r_3; \quad (7)$$

- електричні умови зводяться до визначення напруженості та індукції електричного поля в матеріалі оболонки: у випадку сегментованого

циліндра $E_\varphi = -\frac{\psi_0 N}{2\pi r_0}$, $E_r = 0$, $E_z = 0$, $D_\varphi = \varepsilon_{33}^S E_\varphi + e_{31}(\varepsilon_{rr} + \varepsilon_{zz}) + e_{33} \varepsilon_{\varphi\varphi}$,

$D_r = 0$, $D_z = 0$, де N – кількість сегментів (призм) кільця; у випадку

суцільного циліндра – $E_r = -\frac{\psi_0}{h}$, $E_\varphi = 0$, $E_z = 0$,

$D_r = \varepsilon_{33}^S E_r + e_{31}(\varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{zz}) + e_{33} \varepsilon_{rr}$, $D_\varphi = 0$, $D_z = 0$, де E_r , E_φ , E_z – складові напруженості електричного поля, а D_r , D_φ , D_z – складові його індукції,

$\varepsilon_r = \frac{\partial w}{\partial r}$, $\varepsilon_\varphi = \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \varphi} + \frac{w}{r}$, $\varepsilon_z = \frac{\partial v}{\partial z}$ – компоненти механічних деформацій.

Потенціал швидкості, створюваний випромінювачем в кожній з вказаних областей, можливо представити у вигляді:

- в області I:

$$\Phi_I = \sum_{m=0}^{\infty} E_m J_m(kr) \cos(m\varphi); \quad (8)$$

- в області II:

$$\Phi_{II} = \sum_{q=0}^{\infty} \left[A_q J_{m_q}(kr) + B_q N_{m_q}(kr) \right] \cos(m_q \varphi); \quad (9)$$

- в області III:

$$\Phi_{III} = \sum_{s=0}^{\infty} F_s H_s^{(1)}(kr) \cos(s\varphi), \quad (10)$$

де $J_n(kr)$, $N_n(kr)$, $H_s^{(1)}(kr)$ – функції Бесселя, Неймана та Ханкеля першого роду відповідно; E_m , A_q , B_q , F_s – невідомі комплексні коефіцієнти.

Шукані величини складових u і w зміщень представимо рядами по власним формам коливань оболонки у вакуумі:

$$u = \sum_{n=1}^{\infty} u_n \sin(n\varphi), \quad w = \sum_{n=0}^{\infty} w_n \cos(n\varphi). \quad (11)$$

Після ряду перетворень та застосування властивостей повноти та ортогональності систем кутових функцій на відповідних інтервалах загальна система рівнянь, що описує роботу циліндричного випромінювача з екраном, набуває вигляду нескінченної системи лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} w_n \left(R_n + \frac{\alpha \omega \rho_1 c_1}{h} \frac{J_n(k_1 r_1)}{J_n'(k_1 r_1)} \right) N_n - i \omega \frac{\alpha}{h} \rho_2 \sum_{q=0}^{\infty} \left[\frac{\widetilde{A}_q}{J_{m_q}(k_2 r_3)} \frac{J_{m_q}(k_2 r_2)}{J_{m_q}(k_2 r_3)} + \right. \\ \left. + \widetilde{B}_q \frac{N_{m_q}(k_2 r_2)}{N_{m_q}(k_2 r_3)} \right] N_{nq} = - \frac{e_{33}}{C_{33}^E} \frac{N \psi_0}{2\pi} b_n; \quad n = 0, 1, 2, 3 \dots \\ \left[\frac{\widetilde{A}_q}{J_{m_q}(k_2 r_3)} \frac{J_{m_q}'(k_2 r_2)}{J_{m_q}(k_2 r_3)} + \widetilde{B}_q \frac{N_{m_q}'(k_2 r_2)}{N_{m_q}(k_2 r_3)} \right] N_q - i c_2 \sum_{n=0}^{\infty} w_n N_{nq} = 0; \quad q = 0, 1, 2, 3 \dots \\ \frac{\widetilde{F}_s}{H_s^{(1)}(k_2 r_3)} \frac{H_s^{(1)}(k_2 r_3)}{H_s^{(1)'}(k_2 r_3)} N_s - \sum_{q=0}^{\infty} \left[\widetilde{A}_q + \widetilde{B}_q \right] N_{sq} = 0; \quad s = 0, 1, 2, 3 \dots \\ \left[\frac{\widetilde{A}_q}{J_{m_q}(k_2 r_3)} \frac{J_{m_q}'(k_2 r_3)}{J_{m_q}(k_2 r_3)} + \widetilde{B}_q \frac{N_{m_q}'(k_2 r_3)}{N_{m_q}(k_2 r_3)} \right] N_q - \sum_{s=0}^{\infty} \widetilde{F}_s N_{sq} = 0; \quad q = 0, 1, 2, 3 \dots \end{array} \right. \quad (12)$$

де $R_n = \frac{\alpha^2 \gamma^2 \omega^4 - \alpha \gamma \omega^2 (1 + \beta n^2)(n^2 + 1) + \beta n^2 (n^2 - 1)^2}{(\alpha \gamma \omega^2 - (1 + \beta) n^2)}$, а $J_n'(kr)$, $N_n'(kr)$,

$H_n^{(1)'}(kr)$ – відповідно похідні функцій Бесселя, Неймана і Ханкеля по координаті r ; N_n , N_q , N_s , N_{nq} , N_{sq} , b_n – коефіцієнти, пов'язані із ортогональністю кутових функцій; $\widetilde{A}_q = A_q J_{m_q}(k_2 r_3)$, $\widetilde{B}_q = B_q N_{m_q}(k_2 r_3)$, $\widetilde{F}_s = F_s H_s^{(1)'}(k_2 r_3)$ – заміна невідомих A_q , B_q , F_s .

Дані системи рівнянь можуть бути вирішені методом редукції або методом послідовних наближень. Їх розв'язок є розв'язком задачі визначення фізичних полів екранованого випромінювача із окружною або радіальною поляризаціями. Кількість невідомих w_n , \widetilde{A}_q , \widetilde{B}_q , \widetilde{F}_s визначається з умови забезпечення мінімальної похибки при побудові полів в областях на їх межах.

Наступні три розділи присвячені дослідженню властивостей фізичних полів та закономірностей їх поведінки в залежності від конструктивних особливостей випромінювачів з екранами. Усі розрахунки виконувались для наступних числових значень параметрів та характеристик елементів конструкцій випромінювачів з екраном: для дослідження приймалися наступні склади п'єзокерамічних оболонок – ЦТБС-3, ЦТС-19, ТБК-3; середні радіуси оболонок та їх товщини змінювались відповідно в діапазонах $r_0 = 0,068 \div 0,12$ м та $h = 0,008 \div 0,012$ м; окружна поляризація оболонок забезпечувалась жорстким з'єднанням $N = 48$ паралельно включених призм, що складають оболонку; електрична напруга, якою збуджувались випромінювачі з екраном, становила $\psi_0 = 200$ В; внутрішні порожнини п'єзокерамічних оболонок випромінювачів вакуумувались ($\rho_1 c_1 = 0$), заповнюватись повітрям при нормальному атмосферному тиску ($\rho_1 c_1 = 419,1$ кг/м²с) або рідинами з різними густиною та швидкістю звуку ($\rho_1 c_1 = 1,5 \cdot 10^6$ кг/м²с; $1,2 \cdot 10^6$ кг/м²с; $0,75 \cdot 10^6$ кг/м²с); акустично м'який екран у вигляді незамкнутого в секторі $2\varphi_0$ кільцевого шару товщиною $r_3 - r_2$ змінював свою конфігурацію так, що φ_0 приймалось рівними $\varphi_0 = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$; товщина шару змінювалась від $r_3 - r_2 = 0,005$ м до $0,05$ м. Випромінювач з екраном знаходився у воді з $\rho_2 c_2 = 1,5 \cdot 10^6$ кг/м²с.

Другий розділ присвячено дослідженню властивостей механічних полів. В якості параметрів, що досліджувались, приймалися амплітудні й фазові залежності від частоти нормальної складової коливальної швидкості в точці, що відповідає центру вільної від екрану поверхні, а також кутове розподілення по поверхні амплітуд та фаз коливальної швидкості. Розрахунки виконувались згідно з виразами (11) – (13).

Аналіз частотних залежностей амплітуд коливальних швидкостей, створюваних в центрі вільної від екрану поверхні випромінювачів із складом п'єзокераміки ЦТБС-3 та різним заповненням внутрішньої порожнини (рис. 2), свідчить про те, що основна особливість цих частотних залежностей полягає в появі ряду нових додаткових вузькосмугових резонансних піків.

Аналіз фазових характеристик коливальних швидкостей випромінювача показує багатократне перетинання ними вісі абсцис. Частоти, на яких це відбувається, являються власними частотами системи «п'єзокерамічна оболонка – акустично м'який незамкнутий кільцевий шар кінцевої товщини – зовнішнє середовище». Таким чином розглянуте конструктивне виконання екранованих випромінювачів супроводжується суттєвою зміною механічних полів екранованих випромінювачів порівняно з неекранованими.

Фізичними причинами такої поведінки випромінювачів є радіальна симетричність електричного навантаження і порушення радіальної симетрії радіаційного навантаження кругової циліндричної оболонки на робоче середовище шляхом введення в склад випромінювача м'якого екрану у вигляді

незамкненого кільцевого шару кінцевої товщини. У зв'язку з цим в системі з порушеною радіальною симетрією при вибраному симетричному способі електричного навантаження з'являються наступні моди коливань, порівняні по амплітуді із нульовою модою. Завдяки цьому відбувається ефективний перерозподіл енергії, що «закачується» в екранований випромінювач на нульовій моді, між наступними формами коливань. Про це свідчать частотні залежності окремих мод коливальної швидкості, що зображені на рис. 3. Як можна побачити, кожен з додаткових резонансів коливальної швидкості формується окремою модою коливань.

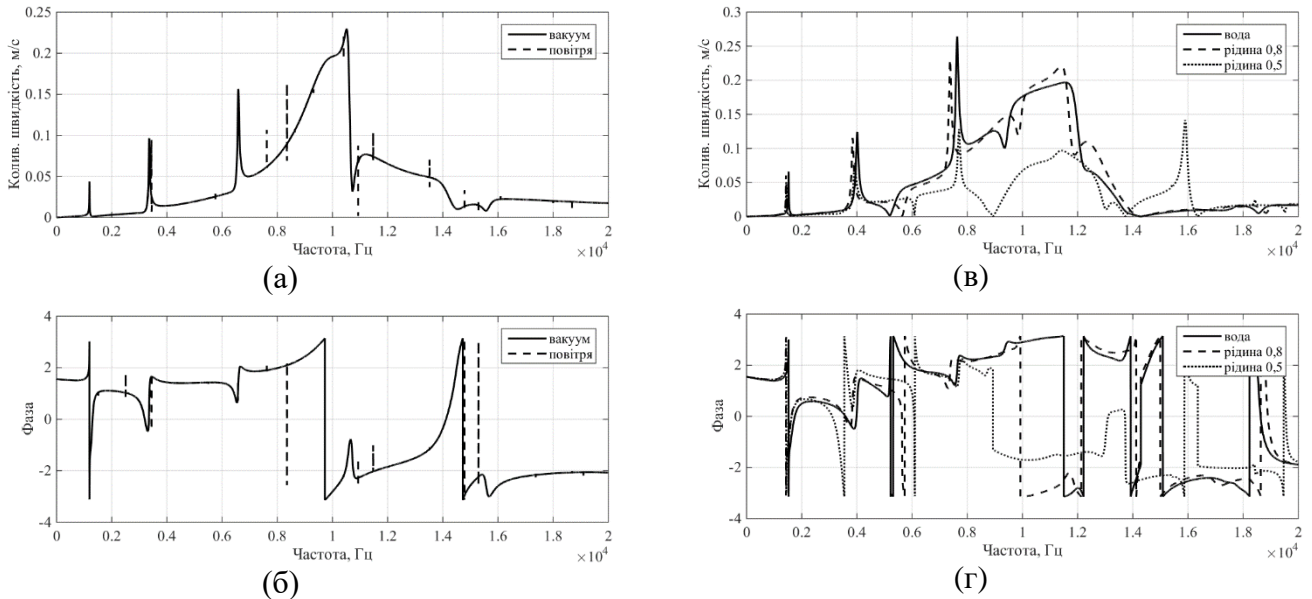


Рис. 2. Частотні залежності амплітуд (а, в) та фаз (б, г) радіальних коливальних швидкостей центра вільної від екрану поверхні випромінювачів силової (а, б) та компенсованої (в, г) конструкцій.

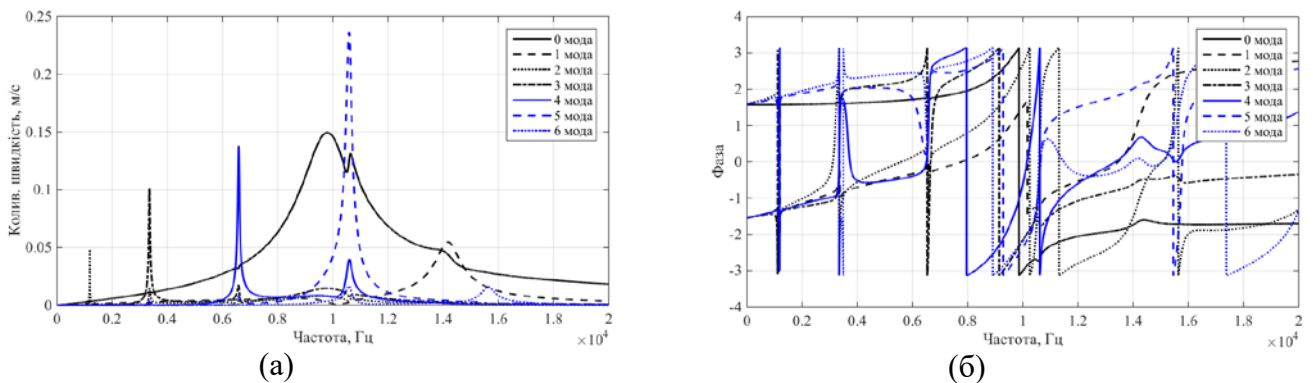


Рис. 3. Частотні залежності амплітуд (а) та фаз (б) радіальних швидкостей мод коливань центра вільної від екрану поверхні вакуумованого випромінювача з екраном

В залежності від типу обраної конструкції випромінювача та середовища, що заповнює його внутрішню порожнину, можна спостерігати наступні закономірності:

- появу додаткових вузькосмугових резонансних коливань у вакуумованому (силова конструкція) випромінювачі, що обумовлено лише порушенням симетрії зовнішнього акустичного навантаження;
- появу великої кількості нових, крім додаткових, надвузькосмугових резонансних коливань у заповнених повітрям випромінювачів (силова конструкція), що обумовлено їх внутрішнім пружним простором;
- збереження додаткових вузькосмугових резонансних коливань та зміна їх частот та смуг у екранованих випромінювачів компенсованої конструкції;
- частоти додаткових резонансних коливань в низькочастотній і резонансній областях збільшуються в залежності від рівня збільшення відносного хвильового опору $\rho_1 c_1 / \rho_2 c_2$;
- перехід від силової конструкції випромінювача з екраном до компенсованої супроводжується суттєвою втратою енергетики нульовою модою і «перекачкою» її енергії в перші п'ять мод коливань;
- кількість додаткових вузькосмугових резонансів коливань п'єзокерамічної оболонки не залежить від характеристик середовищ, що її заповнюють.

При аналізі частотних залежностей амплітуд коливальної швидкості випромінювачів з екранами різної конфігурації можна виділити наступне:

- при зменшенні кута розкриття екрана φ_0 суттєво збільшується амплітуда коливальної швидкості в області основного резонансу оболонки, в той же час у низькочастотній області амплітуда коливальної швидкості мало залежить від кута розкриття екрана φ_0 ;
- власні частоти додаткових вузькосмугових резонансних коливань зменшуються із збільшенням кута розкриття екрана φ_0 ;
- збільшення товщини екрану призводить до збільшення амплітуд додаткових вузькосмугових резонансних коливань, особливо в області низьких частот.

Зміна складу п'єзокераміки оболонки екранованого випромінювача не змінює характеру електричної симетричності та радіальної несиметричності його конструкції. Це обумовлює перерозподіл енергії, яка «закачується» в випромінювач на нульовій моді коливань, між новими генерованими формами коливань. Разом із цим зміна складу п'єзокераміки з відповідними змінами їх електрофізичних констант обумовлює, по-перше, зміну резонансної частоти та характеру частотної залежності амплітуди коливальної швидкості самої п'єзокерамічної оболонки випромінювача на нульовій моді, по-друге, зміну значень частот та амплітуд додаткових вузькосмугових резонансних коливань системи «зовнішнє середовище – чаша, що утворена екраном, – п'єзокерамічна оболонка – внутрішнє середовище». Зміна характеру поляризації п'єзокерамічної оболонки екранованого випромінювача без зміни симетричності електричного навантаження і конфігурації випромінювача не змінює кількісного складу мод коливань, проте співвідношення між амплітудами радіальних швидкостей мод суттєво змінюється.

Вплив геометричних розмірів активного елемента конструкції випромінювача не змінює характеру електричного та радіаційного навантажень

екранованого випромінювача. Він призводить тільки до змін числових значень частот і амплітуд додаткових вузькосмугових резонансів коливальної швидкості.

Третій розділ присвячено дослідженню властивостей акустичних полів. Для дослідження полів, що формуються п'єзокерамічним циліндричним випромінювачем з екраном в ближньому полі, приймалися амплітудні та фазові значення звукового тиску на неекранованій поверхні конструкцій випромінювача. Для дальнього поля було прийнято характеристику направленості випромінювача в горизонтальній площині.

З урахуванням виду потенціалів (8)-(10) вирази для тиску набувають вигляду:

$$P_I = -i\omega\rho_1 \sum_{m=0}^{\infty} E_m J_m(k_1 r) \cos(m\varphi), \quad 0 < r \leq r_1, \quad |\varphi| \leq \pi; \quad (14)$$

$$P_{II} = -i\omega\rho_2 \sum_{q=0}^{\infty} \left(A_q J_{m_q}(k_2 r) + B_q N_{m_q}(k_2 r) \right) \cos(m_q \varphi), \quad r_2 \leq r \leq r_3, \quad |\varphi| \leq \varphi_0; \quad (15)$$

$$P_{III} = -i\omega\rho_2 \sum_{s=0}^{\infty} F_s H_s^{(1)}(k_2 r) \cos(s\varphi), \quad r \geq r_3, \quad |\varphi| \leq \pi; \quad (16)$$

Характеристика направленості визначалася за наступною формулою:

$$R(\varphi) = \frac{|P_{III}(\varphi)|}{|P_{III}(\varphi_0)|_{\max}}, \quad r = \text{const}, \quad (17)$$

Частотні залежності амплітуд і фаз тиску екранованих випромінювачів, що представлені на рис. 4, свідчать про наявність в амплітудних спектрах частот додаткових викидів акустичного тиску по всьому діапазону частот. Ці викиди обумовлені змінами коливань механічного поля, що були встановлені вище, причому частоти цих викидів тиску співпадають із частотами додаткових вузькосмугових резонансних коливань випромінювача. В залежності від конструкції та характеру внутрішнього середовища загальна поведінка акустичних полів при введенні до складу випромінювача екрану характеризується збільшенням акустичного тиску в резонансній області п'єзокерамічної оболонки.

Кутове розподілення акустичного тиску (рис. 5) свідчить про те, що при наближенні до стінок екрану значення тиску на неекранованій поверхні прямує до нуля. Окрім основного максимуму в головному напрямі $\varphi = 0^\circ$ з'являються додаткові максимуми тиску, співрозмірні із основним. Найбільше це виражається на частотах додаткових викидів (рис. 5 б).

Наявність екрану в конструкції випромінювача призводить до формування направлено випромінювання енергії. На низьких частотах ця направленість слабо виражена. Із збільшенням частоти направлені властивості стають більш значними. При цьому направлені властивості екранованих випромінювачів на частотах додаткових резонансних викидів (рис. 7) суттєво відрізняються від направлених властивостей на інших частотах (рис. 6).

Зміна внутрішнього середовища мало впливає на поведінку діаграм направленості випромінювачів. Змінюються лише значення частот додаткових викидів.

Зміна конфігурації екрану має різний вплив на частотні та кутові характеристики випромінювачів. В частотному спектрі вплив аналогічний впливу на механічні поля. З іншої сторони має місце достатньо сильний вплив в кутовому спектрі. При малих кутах екранування $\varphi_0 = \pm 30^\circ$ на низьких частотах спостерігається випромінювання акустичної енергії у протилежному до головного напрямку. Із збільшенням кута розкриття до значення $\varphi_0 = \pm 150^\circ$ на низьких частотах діаграми направленості мають ненаправлений вигляд і лише в області резонансу проявляються направлені властивості випромінювачів з таким екраном.

Товщина екрану знову ж таки впливає лише на значення амплітуд додаткових резонансних викидів акустичного тиску, причому чим більша товщина, тим більша амплітуда тиску.

Дослідження акустичних полів при зміні складу активного елементу показали, що в низькочастотній та високочастотній областях від зміни складу п'єзокераміки характер поведінки акустичного тиску змінюється певним чином. За рахунок різних параметрів складів п'єзокерамічного активного елементу частотні залежності амплітуд тиску екранованих випромінювачів змінюються, що теж обумовлено змінами коливань в механічному полі. Відповідно до цього змінилися значення частот і амплітуд додаткових викидів тиску.

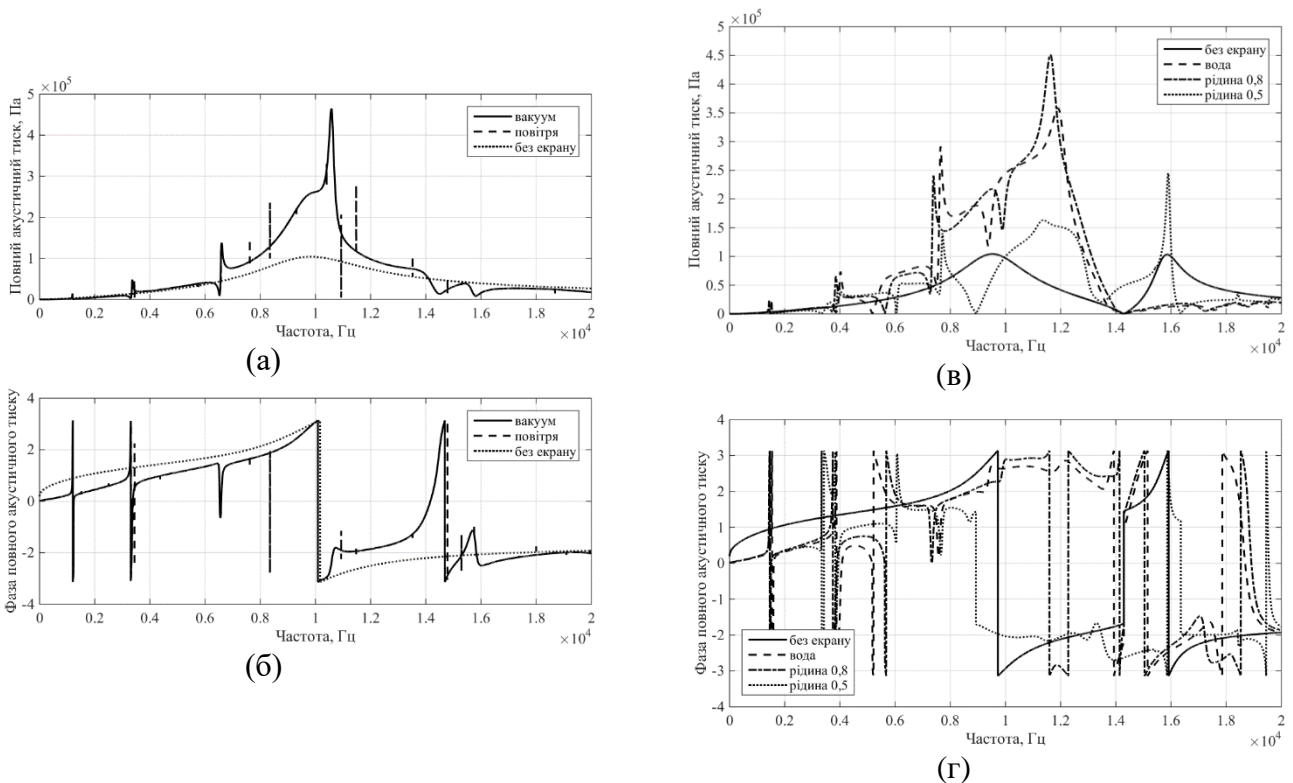
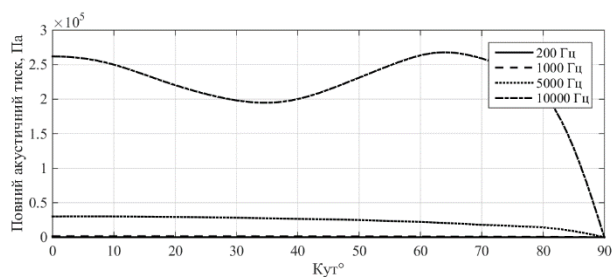
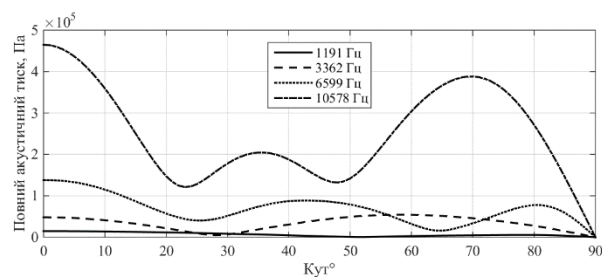


Рис. 4. Частотні залежності амплітуд (а, в) і фаз (б, г) звукового тиску в центрі зовнішньої вільної від екрану поверхні випромінювачів з екраном силової (а, б) та компенсованої (в, г) конструкцій та без екрану.



(а)



(б)

Рис. 5. Кутові залежності амплітуд акустичного тиску на поверхні вакуумованого випромінювача з екраном $\varphi_0 = 90^\circ$ на частотах поза додаткових резонансів (а) та на резонансах (б).

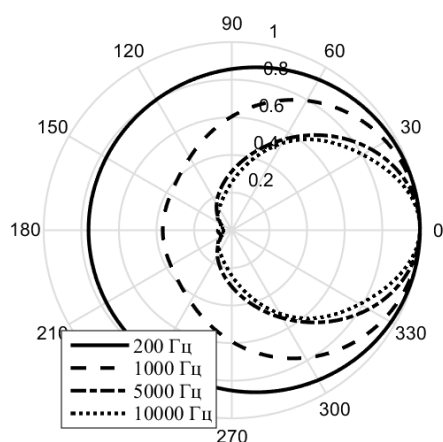


Рис. 6. Діаграми направленості вакуумованого випромінювача з екраном на різних частотах.

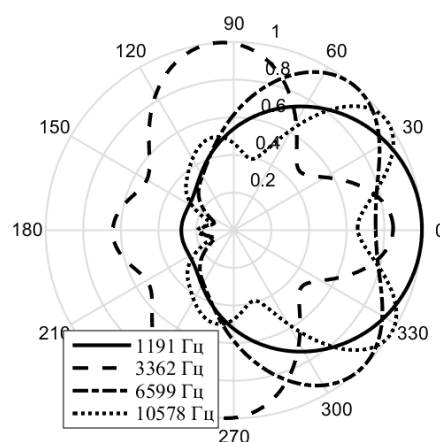


Рис. 7. Діаграми направленості вакуумованого випромінювача на частотах додаткових викидів.

Діаграми направленості при зміні складу п'єзокераміки на частотах додаткових викидів і поза ними не змінюють свого характеру.

При зміні поляризації випромінювачів з окружної на радіальну відбувається ряд змін. По-перше, зміна типу поляризації обумовила зменшення амплітуд в акустичних полях випромінювачів із радіальною поляризацією. По-друге, при однаковій амплітуді електричного збудження значення частот додаткових викидів мають менші величини, а частота резонансу п'єзокерамічної оболонки має більше значення порівняно з оболонкою із окружною поляризацією.

Кутове розподілення звукового тиску від зміни типу поляризації майже не залежить. Деяких відмінностей набули діаграми направленості на частотах додаткових викидів порівняно із діаграмами направленості випромінювачів із окружною поляризацією.

Зміна розмірів п'єзокерамічної оболонки призводить до вже відомих змін у частотній області акустичного тиску. Амплітуда акустичного тиску із збільшенням середнього радіусу зменшується і це пов'язано із тим, що при

незмінній підведеній збуджуючій напрузі збільшення радіусу призводить до зменшення напруженості електричного поля в матеріалі призми. Зміна товщини оболонки призводить до збільшення амплітуди звукового тиску. Одночасно із цим значення резонансної частоти випромінювача зменшується, оскільки збільшується маса активного елементу. Таким чином, акустичні поля направлених випромінювачів характеризуються розширенням та збагаченням спектра власних резонансних частот поля та появою в ньому суттєвих просторових залежностей.

Для експериментальних досліджень акустичних полів випромінювача із екраном було обрано макет перетворювача (рис. 8), що складається з ряду п'єзокерамічних кілець 1 та акустично м'якого екрану 2. Вимірювання проводились на території ДП «КНДІ гідроприладів» у заглушеному вимірювальному басейні у відповідності до вимог, регламентованих ОСТ5.8361-86. Результати вимірювань (рис. 9), усереднених за 10-ма вимірами, забезпечують похибку вимірювань не більше 0,07 при довірчій ймовірності 0,97. Співставлення результатів вимірювань із розрахунковими даними дозволяє зробити висновок про їх практичне співпадіння. Це свідчить про те, що представлена математична модель екранованого п'єзокерамічного випромінювача може бути використана для розрахунку циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів, розміщених в незамкненому кільцевому екрані з акустично м'якого матеріалу.

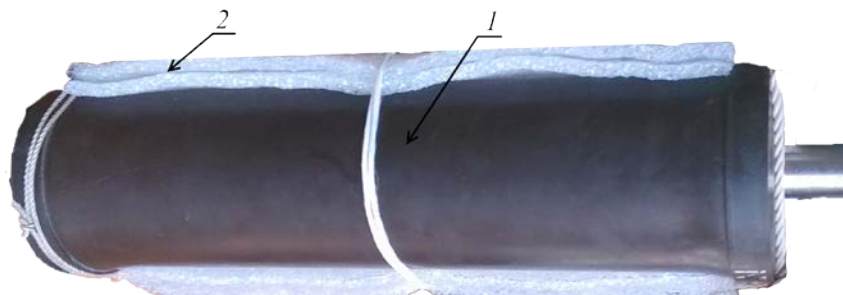


Рис. 8. Макет випромінювача.

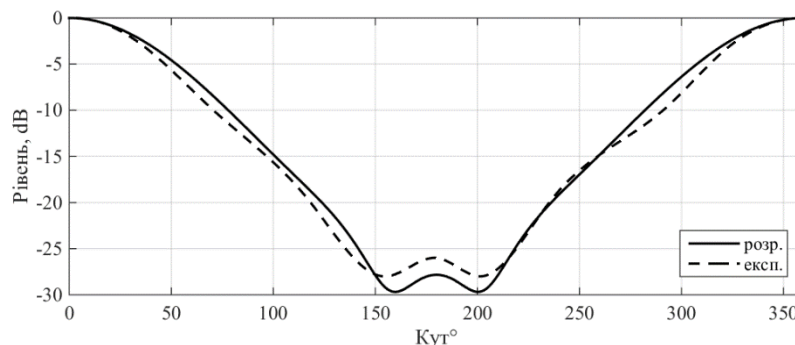


Рис. 9. Співставлення розрахункових даних акустичних полів із результатами вимірювань, усереднених за десятьма вимірами.

Четвертий розділ присвячено аналізу електричних полів. Виходячи із схем заміщення випромінювача в трактах випромінювання сигналів, які використовуються при проектуванні цих трактів, в якості досліджуваних характеристик електричного поля були прийняті наступні: повний електричний

струм, його активна і реактивна складові, які подаються від генератора на випромінювач при його збудженні; повний вхідний електричний опір випромінювача та його активна і реактивна складові.

Аналітичні вирази, згідно з якими виконувались числові розрахунки частотних залежностей наведених характеристик, були одержані виходячи з електричних граничних умов та співвідношень (11) у вигляді:

– для випромінювачів з окружною поляризацією:

$$I = -i\omega S_{el} \left\{ -\varepsilon_{33}^S \frac{\psi_0 N^2}{2\pi r_0} + \frac{e_{33}}{r_0} \sum_{j=1}^N \left[\sum_{n=1}^{\infty} n u_n \cos\left(n \frac{2\pi j}{N}\right) + \sum_{n=0}^{\infty} w_n \cos\left(n \frac{2\pi j}{N}\right) \right] \right\},$$

– для випромінювачів з радіальною поляризацією:

$$I = -i\omega \int_0^{2\pi} \left[-\varepsilon_{33}^S \frac{\psi_0}{h} + \frac{e_{31}}{r_0} \left(\sum_{n=1}^{\infty} n u_n \cos(n\varphi) + \sum_{n=0}^{\infty} w_n \cos(n\varphi) \right) \right] r_0 d\varphi.$$

Вхідний електричний опір Z_{el} екранованого випромінювача визначався за законом Ома: $Z_{el} = \frac{\psi_0}{I}$.

Із наведених виразів витікає, що повний струм в ланцюзі збудження випромінювача має дві складові – ємнісну і динамічну.

Встановлено, що в досліджуваному діапазоні частот зміни повного струму, який створює генератор в зовнішньому ланцюзі екранованого випромінювача, визначаються закономірностями поведінки ємнісного та динамічного струмів сумісно в низькочастотній області, тільки динамічного струму – в резонансній області і тільки ємнісного струму – у високочастотній області (рис. 10).

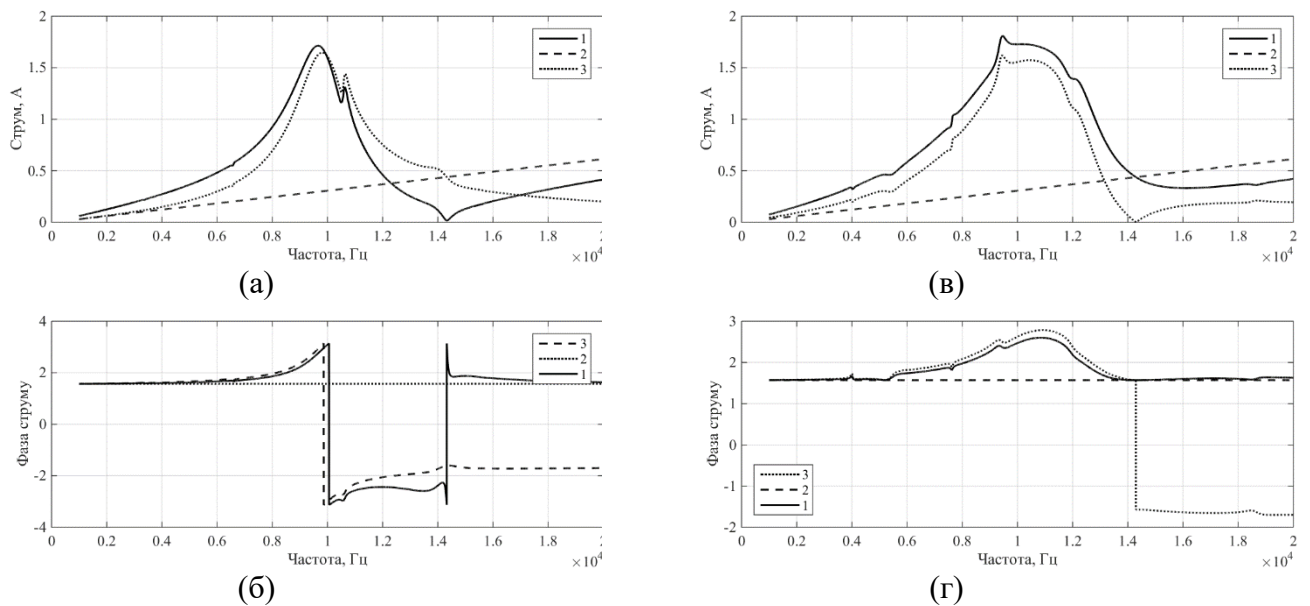


Рис. 10. Частотні залежності амплітуд (а, в) та фаз (б, г) повного (1), ємнісного (2) та динамічного (3) електричних струмів вакуумованого (а, б) та заповненого водою (в, г) випромінювача з екраном.

Аналіз частотних залежностей амплітуд і фаз повного струму компенсованих випромінювачів свідчить про те, що ефективність вимушених коливань випромінювача, обумовлена повним струмом в його зовнішньому ланцюгу, суттєво залежить від співвідношення хвильових опорів пружних середовищ у внутрішній його порожнині ($\rho_1 c_1$) і ззовні ($\rho_2 c_2$).

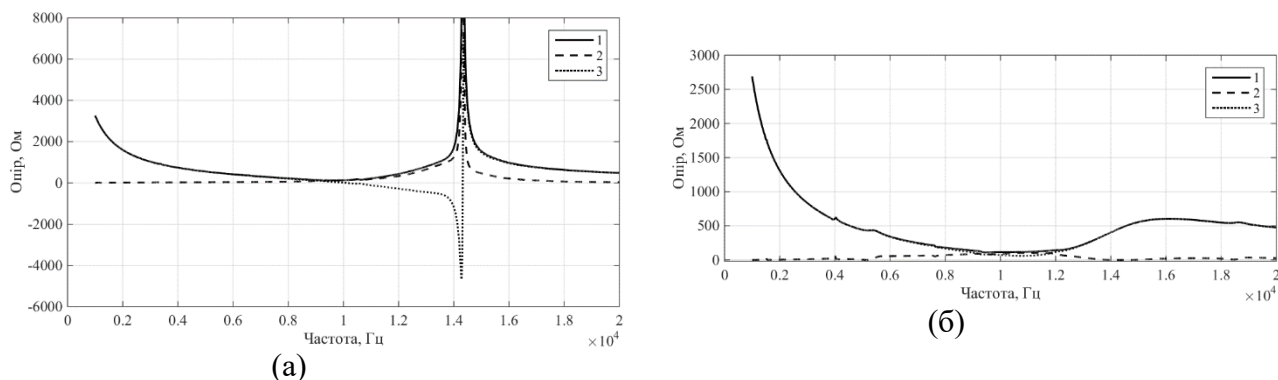


Рис. 11. Частотні залежності повного (1), активного (2) і реактивного (3) вхідних електричних опорів вакуумованого (а) та заповненого водою (б) випромінювача з екраном.

Аналіз активної частини вхідного електричного опору показує, що в області частот до частоти основного механічного резонансу екранованого випромінювача він має низькі значення. Після цієї частоти активний опір різко (на кілька порядків) зростає, формуючи резонансну область, після чого знову суттєво зменшується. Реактивна складова вхідного електричного опору екранованого випромінювача характеризує реактивну потужність, яка відбирається випромінювачем від генератора при випромінюванні звуку в середовище. Практично у всьому частотному діапазоні вона має ємнісний характер за виключенням невеликої ділянки в районі частоти електромеханічного резонансу, де реактивна складова вхідного опору змінює свій характер на індуктивний.

Вхідний електричний опір в низькочастотній і резонансній областях не залежить від конфігурації екрану, причому в резонансній області визначається лише активною складовою. У високочастотній області проявляється резонанс, що відповідає електромеханічному резонансу. В цій області проявляється залежність опору від параметрів екрану і при збільшенні неекранованої частини випромінювача опір зменшується. При подальшому зростанні частоти ця залежність зникає і опір поступово падає.

Аналіз впливу розмірів екрану на параметри електричного поля екранованого випромінювача силової конструкції показує, що зміна товщини екрану на порядок практично не впливає на поведінку електричного струму в низькочастотній та високочастотній областях і демонструє малий вплив на амплітуду і фазу струму в резонансній області. Зміни ж вхідного електричного опору при цьому не проявляються у всьому частотному діапазоні.

Суттєвих змін вхідний опір, особливо його активна складова, набуває при зміні типу поляризації активного елемента. Так, в частотній залежності спостерігаються частоти та діапазони частот, де активний опір приймає нульові та від'ємні значення. Ця особливість пояснюється порушенням радіальної

симетрії радіаційного навантаження випромінювача з екраном та перерозподілом «закачуваної» на нульовій моді електричної енергії між наступними модами механічних коливань. Збуджені на цих частотах окремі моди коливань формують дві групи, в одну з яких входить нульова мода. Ці групи мають значення фаз близькі до протилежних. Коли моди коливань групи, в якій відсутня нульова мода, набувають більших амплітуд ніж група з нульовою модою, випромінювач переходить із режиму випромінювання акустичної енергії на прийом її з акустичного середовища.

Аналіз частотних залежностей повного струму та його складових при зміні складу п'єзокераміки екранованого випромінювача свідчить про те, що, як і очікувалось, така заміна призведе до повної зміни всіх кількісних характеристик електричного поля. Але при цьому встановлені раніше закономірності поведінки цих полів в залежності від типу конструкції випромінювача, конфігурації та розмірів екранів зберігаються.

Зміна середнього радіусу п'єзокерамічної циліндричної оболонки призводить перш за все до зміни резонансної частоти струму. Амплітуда струму має складну залежність від розмірів оболонки, оскільки при збільшенні радіусу r_0 збільшується кількість активного матеріалу в оболонці випромінювача, що обумовлює збільшення амплітуди на частоті механічного резонансу. З іншого боку при збільшенні величини r_0 та незмінній кількості призм в п'єзокерамічній оболонці збільшується товщина призм, що при незмінній збуджуючій електричній напрузі ψ_0 зменшує величину напруженості електричного поля в п'єзокерамічних призмах. Наслідком цього є зменшення амплітуди електричного струму.

Зміна величини середнього радіуса r_0 оболонки екранованого випромінювача таким же чином впливає і на вхідний електричний опір його силової конструкції. Максимальному струму відповідає мінімальне значення повного та активного опорів, величини яких збільшуються при зменшенні величини кута φ_0 . Максимальні значення повний та активний опори набувають в областях частот, які прилягають до частот електромеханічних резонансів екранованих випромінювачів. Останні визначаються значеннями середніх радіусів r_0 і не залежать від кута екранування випромінювача.

ВИСНОВКИ

Основні результати, отримані в ході виконання досліджень в рамках дисертаційної роботи, полягають в наступному.

1. Запропоновані нові моделі в постановках задач стаціонарної гідроелектропружності щодо випромінювання гідроакустичних сигналів екранованим циліндричним випромінювачем, які дозволяють системно врахувати вплив особливостей виконання конструкції на фізичні поля випромінювача.
2. Строгим методом зв'язаних полів в багатозв'язних областях виконано розв'язок наскрізних задач випромінювання гідроакустичних сигналів

екранованим циліндричним п'єзокерамічним випромінювачем з конкретними геометричними, фізичними та хвильовими властивостями елементів їх конструкцій, в якому враховані взаємодія електричних, механічних та акустичних полів в процесі перетворення енергії, взаємне розташування екрана та п'єзокерамічної оболонки в випромінювачі і реакція зовнішнього і внутрішнього середовищ на формування фізичних полів випромінювачів. Одержані аналітичні співвідношення для опису цих полів.

3. Вперше виконані системні дослідження властивостей електричних, механічних та акустичних полів та зв'язок між ними, встановлені якісні і кількісні закономірності впливу на поля геометричних, фізичних та хвильових характеристик елементів конструкцій екранованих випромінювачів. До цих елементів віднесені: тип виконання конструкції (силова, компенсована) та характеристики середовища у внутрішньому об'ємі; розміри, склад п'єзокераміки і тип поляризації п'єзокерамічної оболонки; конфігурація та розміри акустичного екрану.

4. Врахування ефектів зв'язаності полів дозволило вперше встановити та дослідити ряд нових фізичних властивостей екранованих циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів, а саме:

- суттєві зміни механічних полів екранованих випромінювачів порівняно із неекранованими. Вони полягають в появі наступних за нульовою мод коливань, амплітуди яких порівняні з нульовою, і ефективному перерозподілі електричної енергії, яка «закачується» в п'єзокерамічну оболонку випромінювача на нульовій моді, між наступними модами коливань. Причинами цього є радіальна симетрія електричного навантаження випромінювача при вибраному способі його електричного збудження і втрата радіальної симетрії радіаційного акустичного навантаження випромінювача завдяки введенню до його складу акустичного екрана у вигляді незамкнутого кільцевого шару;
- розширення і збагачення спектра власних резонансних частот акустичного поля екранованого випромінювача. При цьому в області низьких частот з'являються власні резонанси, частоти яких в 3-5 раз менші від частоти резонанса нульової моди п'єзокерамічної оболонки, а амплітуди акустичного поля сумірні або більші її амплітуди. Причиною їх появи є виникнення мод коливань механічного поля екранованого випромінювача, наступних за нульовою;
- керування електричним струмом у зовнішньому ланцюгу екранованого випромінювача закономірностями поведінки ємнісної та динамічної складових повного струму в низькочастотній області, тільки динамічного струму в області основного резонанса і тільки ємнісного струму у високочастотній області та зміну вхідних активних електричних опорів екранованих випромінювачів при певних умовах. Ці умови виникають в тих діапазонах частот, де повне акустичне поле суттєво перевищує його складову, обумовлену нульовою модою коливань, завдяки чому частина повного акустичного поля поглинається екранованим випромінювачем і знову ж таки на нульовій моді коливань повертається в електричне поле.

5. Експериментально підтверджені дані, отримані розрахунковим шляхом, що є свідченням адекватності зроблених припущень при заміні фізичної моделі на розрахункову та виконанні розрахунків.
6. Розроблені наукові засади по проектуванню циліндричних п'єзокерамічних екранованих випромінювачів впроваджені в практику проектування таких перетворювачів, що підтверджується актом впровадження.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Гусак З. Т. Физические поля гидроакустической антенны, состоящей из уголкового рупора и пьезокерамического излучателя с окружной поляризацией / З. Т. Гусак, А. Г. Лейко // Электроника и связь. – 2014. – Т.19. №1 – С. 102-108. *Особистий внесок здобувача полягає в постановці задачі (Index Copernicus)*
2. Гусак З. Т. Поле излучения уголковой рупорной антенны с пьезокерамическим преобразователем с радиальной поляризацией / З. Т. Гусак, А. Г. Лейко // Электроника и связь. – 2014. – Т.19. №2 – С. 75-81. *Особистий внесок здобувача полягає в постановці задачі (Index Copernicus)*
3. Гусак З. Т. О частотных характеристиках электрических полей цилиндрической пьезокерамической антенны с экраном в виде незамкнутого кольцевого слоя / З. Т. Гусак, А. Г. Лейко // Журнал нанота електронної фізики. – 2016. – Т.8. №1, 01029 – с. 1-6. *Особистий внесок здобувача полягає в проведенні розрахунків параметрів електричних полів антени та їх аналізі (SCOPUS)*
4. Гусак З. Т. Частотные свойства электрических полей цилиндрической гидроакустической антенны с плоским экраном в диаметральной плоскости / З. Т. Гусак, А. Г. Лейко // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2016. – Т.59. №6 – С. 38-46. *Особистий внесок здобувача полягає в проведенні розрахунків електричних полів антен та їх аналізі (SCOPUS)*
5. Лейко А. Г. Акустические свойства цилиндрической пьезокерамической гидроакустической антенны с плоским экраном в диаметральной плоскости / А. Г. Лейко, З. Т. Гусак, И. В. Кандрачук, М. А. Мельниченко // Электроника и связь. – 2015. – Т.20. №2 – С. 71-78. *Особистий внесок здобувача полягає в проведенні розрахунків акустичних полів антени (Index Copernicus)*
6. Лейко А. Г. Механические поля цилиндрической гидроакустической антенны с плоским экраном в диаметральной плоскости / А. Г. Лейко, З. Т. Гусак // Электроника и связь. – 2016. – Т.21. №1 – С. 87-93. *Особистий внесок здобувача полягає в проведенні розрахунків параметрів механічних полів антени (Index Copernicus)*
7. Лейко А. Г. Свойства механических полей экранированных гидроакустических излучателей силовой конструкции в зависимости от параметров экрана / А. Г. Лейко, З. Т. Гусак, И. В. Кандрачук // Электроника и связь. – 2016. – Т.20. №3 – С. 27-35. *Особистий внесок*

здобувача полягає в проведенні розрахунків параметрів механічних полів антени (Index Copernicus)

8. Патент України на корисну модель №100428 МПК (2006) G01S 7/52. Активно-пасивна система «Гідроакустична станція – надводний корабель» / Д. А. Дерепка, О. Г. Лейко, І. М. Фалєєв, О. І. Старовойт, О. І. Нижник, З. Т. Гусак. – № 201500944 ; заявл. 06.02.2015 ; опубл. 27.07.2015, бюл. № 14. *Особистий внесок здобувача полягає проведення патентних досліджень та розробці опису винаходу*
9. Патент України на корисну модель №99634 МПК (2006) G01S 7/52. Направлений циліндричний гідроакустичний перетворювач / Д. А. Дерепка, О. Г. Лейко, А. О. Куцак, А. М. Кацан, О. С. Ісаєнко, О. М. Коньок, О. О. Кочарян, В. В. Джаназян, О. І. Старовойт, О. І. Нижник, З. Т. Гусак. – № 201500697 ; заявл. 28.01.2015 ; опубл. 10.06.2015, бюл. № 11. *Особистий внесок здобувача полягає проведення патентних досліджень та розробці опису винаходу*
10. Патент України на корисну модель №99064 МПК (2006) G01S 7/52. Циліндричний гідроакустичний перетворювач / Д. А. Дерепка, О. Г. Лейко, А. В. Косяковський, О. О. Расстригін, С. М. Розгонаєв, І. В. Аверічев, Ю. Я. Меленко, О. І. Старовойт, О. І. Нижник, З. Т. Гусак. – № 201500253 ; заявл. 14.01.2015 ; опубл. 12.05.2015, бюл. № 9. *Особистий внесок здобувача полягає проведення патентних досліджень та розробці опису винаходу*
11. Гусак З. Т. К вопросу о расчете параметров рупорных антенн для активных гидроакустических станций / З. Т. Гусак // V Науково-технічна конференція «Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки» – 2014. *Особистий внесок здобувача полягає в постановці задачі розрахунку параметрів рупорних антен*
12. Гусак З. Т. Свойства механических полей экранированных гидроакустических излучателей компенсированной конструкции в зависимости от параметров экрана / З. Т. Гусак // Сб. тр. акуст. симпоз. КОНСОНАНС-2015. – 2015. – С. 72-77. *Особистий внесок здобувача полягає в проведенні математичних розрахунків параметрів механічних полів та їх аналіз*
13. Гусак З. Т. Про формування направленості в системі «гідроакустична станція – надводний корабель» з антенами змінної глибини / З. Т. Гусак // IV Науково-технічна конференція «Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки» – 2016 – С. 324-325. *Особистий внесок здобувача полягає в проведенні математичних розрахунків параметрів направленості антен змінної глибини*

АНОТАЦІЇ

Гусак З.Т. Випромінювання гідроакустичних сигналів циліндричними п'єзокерамічними перетворювачами з екранами. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.08 – прикладна акустика та звукотехніка. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України, Київ, 2016.

Дисертація присвячена розробці теоретичних засад проектування екранованих циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів силової та компенсованої конструкцій з урахуванням взаємодії електричних, механічних та акустичних полів в них та практичній реалізації цих засад.

В дисертаційній роботі створено теоретичні засади розрахунку та визначено вплив елементів конструкцій циліндричних випромінювачів з екранами у вигляді незамкненого кільцевого шару на формовані випромінювачем фізичні поля. Поставлена та розв'язана строго наскрізна задача випромінювання звуку циліндричним випромінювачем з екраном з урахуванням впливу на формовані в них фізичні поля основними конструкційними особливостями побудови екранованих випромінювачів. В результаті чисельних досліджень визначено характери впливу цих особливостей побудови випромінювачів.

На основі виконаних систематизованих досліджень розроблені практичні рекомендації по втіленню створених наукових засад в практику виконання циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів. Отримані теоретичні результати експериментально підтверджено відповідними вимірюваннями просторових характеристик випромінювача з екраном.

Ключові слова: акустичний екран, радіальна та окружна поляризація, силова та компенсована конструкції, фізичні поля, циліндричний п'єзокерамічний випромінювач.

Гусак З.Т. Излучение гидроакустических сигналов цилиндрическими пьезокерамическими преобразователями с экранами. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.08 – прикладная акустика и звукотехника. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» Министерства образования и науки Украины, Киев, 2016.

Диссертация посвящена разработке теоретических основ проектирования экранированных цилиндрических пьезокерамических излучателей силовой и компенсированной конструкций с учетом взаимодействия электрических, механических и акустических полей в них и практической реализации этих основ.

В диссертационной работе созданы теоретические основы расчета и определено влияние элементов конструкции цилиндрических излучателей с

экраном в виде незамкнутого кольцевого слоя на формируемые в излучателе физические поля.

Выполнены постановка и решение задачи излучения звука цилиндрическим пьезокерамическим излучателем с активным элементом в виде цельного цилиндра и в виде сегментированного цилиндра. Решение задачи излучения обеспечено разработкой аналитических соотношений и определением с их помощью закономерностей влияния параметров использованного состава пьезокерамики, типа использованной поляризации, геометрических параметров активного элемента, типа конструкции (силовая/компенсированная), конфигурации экрана на формирование основных физических полей излучателей.

Для цилиндрических излучателей с экраном выполнено численные исследования влияния их параметров конструкций на амплитудно-частотные и угловые характеристики механических полей, амплитудно-частотные и пространственные характеристики акустических полей и амплитудно-частотные характеристики электрических полей излучателей.

Установлено, что внесение экрана в конструкцию цилиндрического излучателя нарушает его радиальную симметрию радиационной нагрузки, что приводит при однородном возбуждении активного элемента к образованию помимо основной нулевой моды его колебаний ряда последующих мод. Каждая из нового ряда мод вносит свой вклад в амплитудно-частотные характеристики физических полей, тем самым обогащая её дополнительными резонансами по всей частотной полосе. Данные особенности проявляются и в акустических полях в виде появления ряда составляющих акустического давления, формирующих дополнительные выбросы в амплитудно-частотной характеристике давления на тех же частотах.

Установлено, что при симметричном электрическом включении излучателей как с радиальной, так и с окружной поляризациями внесение экрана в конструкцию излучателя не приводит к образованию новых составляющих тока. Однако входное электрическое сопротивление, в частности его активная составляющая, приобретает существенные особенности, связанные с несимметричной нагрузкой излучателя на рабочую среду.

Определено, что указанные особенности в амплитудно-частотных характеристиках механических и акустических полей зависят от параметров состава пьезокерамики, геометрических размеров активного элемента и конфигурации экрана, а также от параметров рабочей среды и среды, что заполняет внутреннюю полость излучателя.

В ходе численных экспериментов показано, что наличие экрана приводит к увеличению уровня излучаемой акустической энергии, причем увеличение тем существенней чем больше экран покрывает поверхность излучателя.

Были рассчитаны и построены диаграммы направленности излучателей с экранами и было показано, что на частотах вносимых экранами особенностей характеристика направленности приобретает ряд изменений, в некоторых случаях направление излучения меняется на 180° .

Ключевые слова: акустический экран, радиальная и окружная поляризация, силовая и компенсированная конструкции, физические поля, цилиндрический пьезокерамический излучатель.

Gusak Z.T. Radiation sonar signals of cylindrical piezoceramic transducers with baffles. – Manuscript.

The dissertation for a candidate of technical science degree in the specialty 05.09.08 – Applied Acoustics and Audio Engineering. – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, 2016.

The thesis is devoted to the development of theoretical design bases cylindrical piezoceramic baffled transducers with power and compensated designs considering the interaction of electrical, mechanical and acoustic fields in them and practical realization of this bases.

In dissertation the theoretical calculation methods were obtained and were determined the influence of construction elements of cylindrical piezoceramic transducers with baffles on physical fields, which are formed within transducers. The baffle is not closed annular layer. The “cross-cutting” problem of sound wave transmitting by baffled cylindrical transducer with consideration of influence on physical fields main design features of baffled transducers was set and solved. As a result of big count of researches the behaviors of the influences of features of transducer design were determined.

On the basis of the systematic researches the practical recommendations on the implementation of established scientific principles in practical implementation cylindrical piezoceramic radiators were developed.

The theoretical results were experimentally confirmed by measurements and comparison of beam patterns of transducer with baffle.

Key words: acoustic baffle, cylindrical piezoceramic transducer, radial and tangential polarization, physical fields, power and compensated design.