Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Коржик Максим Олексійович

УДК 534.1

ДИСЕРТАЦІЯ
ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОПРУЖНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ В РЕЖИМАХ ВИПРОМІНЮВАННЯ ТА ПРИЙОМУ

171 Електроніка
17 Електроніка та телекомунікації

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____/Коржик М.О.

Науковий керівник Найда Сергій Анатолійович, доктор технічних наук, професор

Київ – 2023

АНОТАЦІЯ

Коржик М.О. Дослідження характеристик електропружних перетворювачів в режимах випромінювання та прийому. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 171 «Електроніка». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, Київ, 2023.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню особливостей взаємодії акустичних, механічних та електричних полів на прикладі сферичного електропружного перетворювача в режимах випромінювання та прийому.

До виконання роботи були залучені комплексні відомості і наукові результати з суміжних областей вищої математики, фізики, та технічної акустики.

У вступі до рукопису обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету дисертації, визначено перелік проблем, задач, вказано наукову новизну та практичне значення результатів теоретичного і практичного змісту.

При цьому в дисертації вперше отримано такі наукові результати:

1. Виконано широкий огляд актуальних результатів історичних та сучасних напрямків досліджень в області гідроелектропружності та вказано сучасні та перспективні шляхи розвитку методів математичної фізики, що застосовуються для описання коливальних процесів п’єзокерамічних тіл в ідеальному акустичному середовищі.
2. За допомогою методу часткових областей та методу Фур`є визначені, розраховані та показані особливості взаємодії основних характеристик п’єзокерамічного сферичного перетворювача з повністю електродованими поверхнями.
3. Вперше в наскрізному вигляді доопрацьована сама постановка задачі випромінювання звукових хвиль сферичним джерелом нульового порядку, а також визначено, сформульовано та розв’язано задачу прийому, для якої

встановлено факт багатомодовості вказаних фізичних полів та їх просторові розподілення.

4. Вперше в наскрізній постановці аналітично розвинуті математичні та фізичні передумови виникнення ефектів демпфування коливань перетворювача за рахунок введення в його конструкцію наповнювачів рідинного або газоподібного типу.
5. Вперше показано можливість збільшення частотного діапазону роботи порожнинних електроакустичних перетворювачів (за прикладом п'єзокерамічного сферичного перетворювача).
6. Виконані вимірювання дозволили кількісно встановити значення параметрів характеристики направленості, надати рекомендації щодо раціонального використання позитивних та виключення негативних особливостей і просторових характеристик обраного сферичного перетворювача.
7. Вперше встановлено та аналітично подано ефект впливу акусто-механічної системи на електричне поле. Він проявляється в зміненні режиму протікання струму у зовнішньому колі за рахунок втрати узгодження опорів перетворювача і внутрішнього опора генератора.
8. Визначено шлях і надані рекомендації щодо можливості розширення смуги частот перетворювача за рахунок привнесених рідинних та газоподібних заповнювачів внутрішньої порожнини перетворювача.

Актуальність роботи полягає в подальшому розвитку наскрізних постановок задач прийому і випромінювання звукових хвиль з врахуванням взаємного перетворення акустичної, механічної та електричної енергії при розміщенні перетворювача в ідеальному середовищі.

При цьому визначено частотні залежності основних характеристик акусто-електричного перетворювача, оцінено нерівномірність характеристик направленості сферичного перетворювача та визначені обставини за яких виникає демпфування коливального процесу та розширення робочого частотного діапазону.

Основний зміст дисертаційної роботи викладено в п`яти розділах та одному Додатку.

Мета роботи полягає у розвитку методології розрахункових правил та прийомів розв'язання задач хвильової акустики із залучення відомостей з теорії пружності та п'єзоелектрики, що базуються на питаннях динаміки сферичного перетворювача як об'єкта з ускладненими фізичними властивостями. При цьому перетворювач розміщено у вільному полі ідеально пружного середовища. Зовнішнім навантаженням перетворювача є збитковий тиск, а внутрішня область перетворювача вакуумована або заповнена певним рідинним чи газоподібним заповнючами.

Досягнення вказаної мети є можливим за умови опанування наступних наукових напрямків, а саме:

1. Вивчення питань хвильової акустики з елементами теорії випромінювання та розсіювання звуку;

2. З`ясування механіки напружено-деформованого стану для п'єзокерамічних елементів як об'єктів з ускладненими властивостями;

3. Використання спрощених рівнянь Максвела та вимушеної електростатики;

4. Застосування сучасних методів розв`язку задач математичної фізики.

Отже, сукупність наведених наукових напрямків, результатів і відповідних новітніх постановок задач випромінення та прийому звуку надає можливість вважати запропоновану роботу актуальною і такою, що має перспективу розвитку.

В першому розділі розглянуто сучасний стан проблем хвильової акустики та фізичних положень гідроелектропружності при їх застосуванні в задачах наскрізного типу для електроакустичних перетворювачів. При постановці задач приймання та випромінювання звукових хвиль враховані ефекти взаємовпливу і взаємодії основних полів, що беруть участь в процесах взаємного перетворення акустичної енергії на електричну (або електричної на акустичну).

Розвиток задач електропружності розглянуто в історичному екскурсі від здобутків Кюрі і до сучасних шкіл механіки, гідромеханіки та акустики. Висвітлено труднощі в питаннях нарощування різноманітності типорозмірів та форм

п’єзоелементів. Окремий шлях для розрахунків наскрізних характеристик перетворювачів представляють задачі електродування і комутації електродів на поверхнях п’єзоелементів певного типу. При цьому було визначено суто акустичний напрямок розвитку, який є перспективним. В якості коливальної системи перетворювача в основному обиралися циліндр нескінченної довжини або сфера (з горлом (або без горла)), з нанесеними на їхні поверхні пружними шарами та наповнювачами.

Другий розділ присвячений розв`язанню наскрізної задачі випромінювання звуку сферичним електропружним перетворювачем, як джерелом нульового порядку. На прикладі сферичного перетворювача у вільному полі проведено постановку задачі, визначені основні вихідні співвідношення, обрано та використано граничні умови і умови спряження каналів. Сумісне розв’язання рівнянь для акустичного, механічного та електричного поля приведено до алгебраїчної системи рівнянь з якої здійснюється пошук невідомих коефіцієнтів розкладень полів. Виконано розрахунки амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) коефіцієнта передачі, імпедансу перетворювача та тиску, що створюється в робочому середовищі. Встановлено походження локальних максимумів і мінімумів АЧХ. Надано висновки і рекомендації.

В третьому розділі виконано постановку, розв`язок, та аналіз отриманих результатів. Розглянуто задачу прийому сферичним п’єзокерамічним перетворювачем, який заповнений ідеальними середовищами рідинного та газоподібного складу. Розглядаються ефекти демпфування сферичної коливальної системи. При цьому виникає можливість розширення робочої смуги частот, що не суперечить втраті ефективності зі збільшенням добротності коливальної системи. В розділі була обчислена чутливість перетворювача у вигляді АЧХ, яку можна вважати чутливістю по полю. Надано висновки і рекомендації.

Четвертий розділ присвячено підготовці, проведенню та отриманню результатів вимірювань АЧХ. При цьому детально описано процес підготовки до проведення вимірювань АЧХ перетворювача, вибір перетворювача, його розміщення, вибір методу вимірювань та збирання схеми проведення вимірювань.

Вказано на ймовірносні аспекти обробки отриманих результатів. Встановлено, що результати вимірювані в частині дослідження АЧХ внутрішнього опору та коефіцієнта передачі – відповідають отриманим теоретично, що підкреслює достовірність та працездатність зроблених постановок.

Окремо, в п’ятому розділі розглянуто просторові особливості сформованого акустичного поля сферичного прийомника. Розглянута модова структура коливання системи та відповідні характеристики направленості (ХН) для нижніх мод. При цьому визначено ситуацію можливого впливу типу електродування на результати вимірювань чутливості сфери в обраному діапазоні частот. Надано висновки та рекомендації.

Ключові слова: акустичне поле, механічний, електричний, електропружність, перетворювач, амплітудно – частотна характеристика, характеристика направленості, імпеданс, гідроакустичний перетворювач

SUMMARY

Korzhik M.O. Research of characteristics of a hydroacoustic transducer in a hydroelectric spring setting. – Qualification of scientific work on the right of manuscript.

Thesis for the degree of Philosophy Doctor, in specialty 171 “Electronics”. – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2023.

The dissertation work is dedicated to the study of the peculiarities of the interaction of acoustic, mechanical and electrical irrigation on the butt of a spherical electric spring converting machine in the modes of vibrating and receiving.

Before the end of the work, there were obtained comprehensive information and scientific results from the general areas of higher mathematics, physics, and acoustics.

At the beginning of the manuscript, the relevance of the work was grounded, the meta of the dissertation was formulated, the problems of tasks were identified, the scientific novelty and the practical significance of the results of the theoretical and practical research were indicated.

With whom, in the dissertation, the following scientific results were taken into account:

1. A wide view of the current results in historical and current trends in the field of hydroelectroelectric conductivity and it is indicated that current and promising directions are developed for the development of methods in mathematical physics, which should be studied for the description of the chimney processes of p'zoceramic bodies in the medium acoustic.

2. For the help of the method of partial areas and the method of Fourier design, development and indication of the particularity of the interaction of the main characteristics of the piezoceramic spherical transmuter with the surface of the electroplated surfaces

3. Formerly, in a sharp look, the very formulation of the problem of viprominating sound waves with a spherical tube of zero order was supplemented, and it was also assigned, formulated and assigned a task to the receiver, for which the fact of rich

modality of the indicated physical fields and their expanses of distribution was established.

4. Previously, in the present formulation, analytically developed mathematical and physical rethinking of the vindication of the damping effects of coliving is reworked for the introduction and construction of a similar design to a native or gas-like type.

5. The possibility of increasing the frequency range of the operation of empty electro-acoustic transducers (behind the butt of a p-ceramic spherical transducer) is shown above.

6. The victors of the experiment allowed to set a specific value of the parameters of the directivity characteristic, to give recommendations on the rational selection of positive and the exclusion of negative features and spacious characteristics of the reversed spherical turner.

7. First, the effect of the acoustic-mechanical system on the electric field was installed analytically. Vin manifests itself in a change in the mode of piercing the strum at the outside when it is necessary to use the support of the alternator and the internal support of the generator.

8. Ways and recommendations were given on the possibility of expanding the swarm of frequencies of the conversion for the fluctuations of the introduction of regular and gas-like fillings in the internal empty of the conversion.

The practical significance of the robotic field is in the distant development of the skriznih setting of tasks for the reception and modification of sound waves with the mutual transformation of acoustic, mechanical and electrical energy when placed in an ideal medium.

In this case, the frequency dependence of the main characteristics of the acoustic-electric transducer was assigned, the unevenness of the directivity characteristics of the spherical transducer was assessed, and the setting of the environment for any reasons for the damping of the kolival process and the expansion of the operating frequency range.

The main sum of the dissertation work was presented in five divisions and one Addendum.

The meta work is based on the development of the methodology of calculation rules and the adoption of the development of the problems of waves acoustics from the study of data from the theory of springiness and piezoelectricity, which are based on the power of the dynamics of a spherical transformation as an object with aggravated physical authorities. At the same time, the revolver is placed near the free field of an ideally springy middle, the outer edge of the revolver is a tight vice, and the inner area of the retort is evacuated or filled with the same ordinary gas-like backs. The reach of the commanded mark is possible for the minds of the advancing scientific directives, but for itself:

1. Study of issues of wave acoustics with elements of the theory of radiation and scattering of sound;

2. Elucidation of the mechanics of the stress-strain state for piezoceramic elements as objects with complicated properties;

3. Use of Maxwell's simplified equations and forced electrostatics;

4. Application of modern methods of solving mathematical physics problems.

So, the totality of the given scientific directions, results and the relevant latest statements of the problems of sound emission and reception makes it possible to consider the proposed work as relevant and promising.

In the first chapter, the current state of the problems of wave acoustics and physical conditions of hydroelectroelasticity in their application in through-type problems for electroacoustic transducers is considered. When setting the problems of reception and emission of sound waves, the effects of mutual influence and interaction of the main fields involved in the processes of mutual transformation of acoustic energy into electrical energy (or electrical energy into acoustic energy) are taken into account.

Structurally, Chapter 1 consists of two subsections:

1. The development of problems of electroelasticity, which is presented in a historical excursion from Curie's achievements to the modern schools of mechanics, hydromechanics and acoustics, highlights the difficulties in increasing the variety of sizes and shapes of piezoelements.

2. A separate path for calculating the end-to-end characteristics of transducers is represented by the problems of electrodeposition and commutation of electrodes on the

surfaces of piezoelectric elements of a certain type. At the same time, a purely acoustic direction of development was determined, which is promising. At the same time, a cylinder of infinite life and a sphere (with a throat (or without a throat)) were mainly chosen as the main oscillating system of the transducer. In addition, the results of the development of problems of the specified class were devoted to the situation of its application on their surfaces of elastic layers and fillers.

The second chapter is devoted to the solution of the through problem of sound radiation by a spherical electroelastic transducer as a source of zero order. On the example of a spherical converter in a free field, in the second section, the problem is formulated, the main output ratios are determined, the boundary conditions and channel conjugation conditions are selected and used. The combined solution of the equations for the acoustic, mechanical, and electric fields is reduced to an algebraic system of equations from which the unknown coefficients of the field expansions are searched. The frequency response of the transmission coefficient, the impedance of the converter and the pressure created in the working environment were calculated. The origin of local frequency response maxima and minima was established. Conclusions and recommendations are provided.

The third chapter presents the statement, solution, and analysis of the obtained results are performed. The problem of reception by a spherical piezoceramic transducer, which is filled with ideal media of liquid and gaseous composition, is considered. The effects of damping of a spherical oscillating system are considered. At the same time, it becomes possible to expand the working frequency band, which does not contradict the loss of efficiency with an increase in the Q-factor of the oscillating system. In the section, the sensitivity of the converter was calculated in the form of frequency response, which can be considered the field sensitivity. Conclusions and recommendations are provided.

The fourth chapter is devoted to the preparation, conducting and obtaining the results of frequency response measurements. At the same time, the process of preparation for measuring the frequency response of the transducer, the selection of the transducer, its placement, the selection of the measurement method, and the assembly of the measurement scheme are described in detail. Probable aspects of processing the obtained results are indicated. It was established that the results measured in the part of the study

of the frequency response of the internal resistance and the transmission coefficient correspond to those obtained theoretically, which emphasizes the reliability and workability of the productions made.

The fifth chapter shows the spatial features of the formed acoustic field of a spherical receiver are considered. The modal structure of the system oscillation and the corresponding XH for the lower modes are considered. At the same time, the situation of the possible influence of the type of electrodeposition on the results of measurements of the sensitivity of the sphere in the selected frequency range is determined. Conclusions and recommendations are provided.

Key words: acoustic field, mechanical, electrical, electroelasticity, transducer, amplitude-frequency characteristic, directivity characteristic, impedance, hydroacoustic transducer.

Список публікацій здобувача:

1. Коржик, М.О., Курдюк, С.В., Коржик, О.В. (2018). Імпедансні характеристики плоско-паралельного акустичного хвилеводу з комбінуванням межами при порушенні його двохчастотним сигналом. *Мікросистеми, Електроніка та Акустика*, *23*(3), 65–74. https://doi.org/10.20535/2523-4455.2018.23.3.135928

2. Коржик, М.О., Курдюк, С.В., Коржик, О.В. (2018). Імпедансні характеристики пласко-паралельного акустичного хвилеводу з акустично м`якими границями при збудженні його двохчастотним сигналом. *Мікросистеми, Електроніка та Акустика*, *23*(4), 65–73. https://doi.org/10.20535/2523-4455.2018.23.4.137528

3. N.Y. Filipova, O.V. Korzhik, A.S. Chayka, S.A. Naida, M.O. Korzhik, A.S. Naida. Dynamics of Receiving Electroelastic Spherical Shell with a Filler // J. *Nano-Electron. Phys.* , pp. 1-7, V.12, №4, 2020. https://doi.org/10.21272/jnep.12(4).04034

4. Korzhyk, O., Naida, S., Kurdiuk, S., Nizhynska, V., Korzhyk, M., & Naida, A. Use of the pass-through method to solve sound radiation problems of a spherical electro-elastic source of zero order. *EUREKA: Physics and Engineering*, (5), 133-146. (2021). DOI: 10.21303/2461-4262.2021.001292

5. Sergey Naida, Oleksii Korzhyk, Ivan Lastivka, Olha Pavlenko, Tetiana Zheliaskova, Maxim Korzhyk, Anton Naida, Nikita Naida, Oleksander Chaika. Mode-Matching Method Applied to Solving Sound Reception Problem Using Helmholtz Resonator. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, Vol. 14, № 1, 01035(7) (2022). https://doi.org/10.21272/jnep.14(1).01035

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ 2
SUMMARY 7
ВСТУП 15
РОЗДІЛ 1 21
ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО СУЧАСНИЙ СТАН ЗАДАЧ ГІДРОЕЛЕКТРОПРУЖНОСТІ ТА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ В ХВИЛЬОВІЙ АКУСТИЦІ 21
1.1. Розвиток задач електропружності (основні положення) 21
1.2. Метод часткових областей в задачах гідроелектропружності 26
Висновки до розділу 1 30
РОЗДІЛ 2 31
ПОСТАНОВКА ТА РОЗВ`ЯЗАННЯ НАСКРІЗНОЇ ЗАДАЧІ ВИПРОМІНЮВАННЯ ЗВУКУ СФЕРИЧНИМ ЕЛЕКТРОПРУЖНИМ ДЖЕРЕЛОМ НУЛЬОВОГО ПОРЯДКУ 31
2.1. Постановка задачі випромінювання звукових хвиль п’єзокерамічною сферою 32
2.2. Розв’язання наскрізної задачі випромінювання 36
2.2.1. Визначення АЧХ коефіцієнта передачі та електричного імпедансу п’єзокерамічного сферичного прийомника 36
2.2.2. Визначення ЧХ акустичного тиску 41
2.3. Результати розрахунків 42
Висновки до розділу 2 45
РОЗДІЛ 3 46
ПОСТАНОВКА ТА РОЗВ`ЯЗАННЯ НАСКРІЗНОЇ ЗАДАЧІ ПРИЙОМУ ЗВУКУ СФЕРИЧНИМ ЕЛЕКТРОПРУЖНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ. 46
3.1. Постановка задачі прийому звуку сферичним перетворювачем 47
3.1.1. Загальні положення про прийом звуку 47
3.1.2. Граничні умови та умови спряження. 49
3.2. Розв`язок наскрізної задачі прийому електропружною сферою 52
3.3. Результати розрахунків 57

3.3.1. Залежність напруги на навантаження від частоти для вакуумованого перетворювача 57
3.3.2. АЧХ перетворювача із заповненням гелієм 58
3.3.3. АЧХ перетворювача із заповненням рідиною 59
Висновки до розділу 3 63
РОЗДІЛ 4 65
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ. 65
4.1. Вимірювання АЧХ пульсуючої сфери 67
4.1.1. Підготовка перетворювача для вимірювань 67
4.1.2. Граничні умови та умови спряження. 68
4.1.3. Визначення основних відомостей про метод вимірювань АЧХ. 68
4.1.4. Оцінка похибки результатів вимірювань 70
4.2. Вимірювання чутливості прийомника сферичного типу 72
4.2.1. Вимірювання чутливості електропружного перетворювача 72
4.3. Просторові характеристики п’єзокерамічного перетворювача 74
Висновки до розділу 4 76
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 78
Список літератури. 79
ДОДАТОК А. Список опублікованих праць за темою дисертації. 86

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Сучасний стан розвитку хвильових задач в областях механіки і лінійної акустики характеризується виникненням та розвитком новітніх постановок і методів розв’язання рівнянь, що враховують взаємодію акустичних, електричних та механічних полів в режимах випромінювання і прийому звуку. Вказана ситуація відповідає так званому “наскрізному підходу” (або “наскрізній задачі”), результати розв`язку якої отримано по вхідним заданим значенням акустичного тиску (прийом), або електричної напруги (випромінювання).

Для електроакустичних характеристик як для перетворюючих систем з ускладненими фізичними властивостями, такі підходи були започатковані як окремий клас задач п`єзоелектрики на основі положень фізичної акустики Мезона [1] і розроблявся науковими школами академіків НАНУ В. Грінченка та А. Улітко. Гідроакустичний аспект ”наскрізної” проблеми досліджувався на кафедрі акустичних та мультимедійних електронних систем Національного технічного університету “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” і представлено в роботах О. Петріщева, В. Савіна, О. Лейка, О. Коржика та інших.

До важливих здобутків засновників в першу чергу слід віднести монографію [2], в якій обґрунтовано використання таких постановок в теоретичних і прикладних питаннях створення акустичних засобів звукового та ультразвукового діапазонів. Зручність і фізичність згаданих постановок, як можливостей поглибленого дослідження просторово-енергетичних характеристик електроакустичних п’єзокерамічних перетворювачів, призводить до поширення започаткованих підходів наскрізної задачі (наприклад матеріали з джерела [3]) на широкий обсяг задач формування акустичних, механічних та електричних полів у вільних та обмежених просторах.

Подальший розвиток теоретичних та практичних аспектів розробки і використання електропружних систем, які працюють в умовах статичного і динамічного деформування, був спрямований на задачі хвильової акустики, теорії і практики розробки гідроакустичних перетворювачів та антен [4, 5, 6, 7, 8, 9].

Роботи науковців-послідовників (відповідно до завдань прикладної акустики) розширили коло фізичних положень наскрізних стаціонарних та нестаціонарних постановок, доповнюючи їх гіпотезами Кірхгофа – Лява та збагаченням деталізації моделей технологічними елементами. До них віднесемо акустичні екрани [11], пружні шари герметизації з замкненими та незамкненими контурами [12], пристрої формування направленості, а також рідинні, пружні і тверді наповнювачі та [13].

Окремо слід відмітити фундаментальні положення роботи [2], яка започатковує процес врахування, розв'язання, систематизації та впорядкування електропружних моделей електроакустичних перетворювачів певних канонічних форм.

Привабливою можливістю методології наскрізного підходу є також врахування і наочне прогнозування просторових властивостей перетворювачів шляхом використання окремих мод коливань, або їх комбінацій. Це пов'язано з врахуванням особливостей напружено-деформівного стану конструкції перетворювачів, типів електродування, способів електричної комутації електродів, а також умов спряження силового та кінематичного типів.

Так склалося, що до останнього часу більше уваги приділялося циліндричним багатомодовим перетворювачам та їх системам [8, 9, 10]. Сфери, стержньові та згинні перетворювачі досліджено дещо в менших обсягах. При цьому окремий інтерес викликають імпедансні характеристики (акустичні та електричні) електропружних елементів та їх частотні залежності, способи визначення і реалізація в коливальному процесі власних форм циліндричних та сферичних перетворювачів, а також особливості електродування та використання електричних граничних умов. Частково ці питання розглянуто в роботах [2, 4, 12, 13, 14, 15, 16].

Розширення меж застосування наскрізних постановок [14, 17, 18, 19, 20, 21] має призводити до більш коректного врахування умов роботи електропружних перетворювачів. Проте, при цьому ситуація вимагає більш ґрунтовного розуміння взаємовпливу акустичних, механічних та електричних чинників. Отже, завдяки цьому фізичні аспекти наскрізних постановок можуть вдало використовуватися

при створенні моделей прийомних та випромінюючих гідроакустичних перетворювачів та антенних систем на їх основі.

Відповідно, в роботі має бути розглянуті основні просторово енергетичні характеристики перетворювачів як фізичних об’єктів з ускладненими фізичними властивостями.

Отже, результати роботи мають бути отримані з врахуванням:

- взаємодії електричних та акустичних полів перетворювача;
- типу електродування;
- динаміки імпедансних характеристик в діапазоні робочих частот;
- модового складу та способів активації коливань поверхні перетворювача.

Всі вищевказані напрямки та роботи вимагають подальшої розробки, вдосконалення та систематизації.

Таким чином, запропонований “наскрізний” підхід розглядається актуальним та сучасним, адже дозволяє збільшити можливості моделювання умов роботи акустичних перетворювачів в контексті хвильових задач акустики зі заміною граничних умов по акусто–механічним полям умовами спряження та електричними граничними умовами.

Мета роботи полягає в розробці методології розв’язання наскрізних задач випромінювання і прийому звуку, що базуються на використанні сферичного перетворювача як об’єкта з ускладненими фізичними властивостями. При цьому перетворювач розміщено у вільному полі ідеально пружного середовища, зовнішнім навантаженням перетворювача є збитковий тиск, а внутрішню область перетворювача вакуумовано.

Досягнення заявленої мети потребує розв’язання наступних задач:

1. Розв`язання наскрізної задачі випромінювання звуку сферичним перетворювачем-випромінювачем у вільному полі;
2. Розв`язання наскрізної задачі прийому звуку сферичним перетворювачем-прийомником у вільному полі при використанні пружних наповнювачів;

3. Розрахунок основних характеристик акустичного та електричного полів для фіксованої частоти та в діапазоні частот (випромінювання);

4. Розрахунок основних характеристик акустичного та електричного полів для фіксованої частоти та в діапазоні частот (прийом);

5. Експериментальні дослідження.

Об`єктом досліджень є процеси трансформації акустичної і електричної енергії гідроакустичним перетворювачем, який працює в режимах прийому і випромінювання.

Предметом досліджень є електропружний гідроакустичний перетворювач.

Методами досліджень є класичні методи математичної фізики, метод частинних областей, метод Фур`є, а також властивість ортогональності сферичних хвильових функцій.

Достовірність результатів забезпечується обраними методами та збігом теоретичних результатів і результатів експериментальних досліджень, а **наукова новизна** одержаних в роботі результатів полягає в наступному:

1. Визначено базові та перспективні напрямки розвитку задач класу стаціонарної гідроелектропружності в частині :

- Зовнішнього навантаження перетворювача-випромінювача збитковим чинником – акустичним тиском у вигляді знакозмінної добавки;
- Заповнення внутрішньої області перетворювача – прийомника пружними заповнювачами;

2. Вперше розроблена методологія розв`язання наскрізних задач для сферичних перетворювачів з визначенням особливостей імпедансів акустоелектричного типу при роботі перетворювача у вільних та обмежених просторах;

3. Вперше розглянуто і отримано розвиток особливості взаємного перетворення акустичної і електричної енергії за умов двочастотного озвучування обмеженого робочого заповненого рідиною простору.

4. Вперше завдяки наскрізному методу розглянуто вплив пружного наповнювача на чутливість перетворювача по полю, що формується сферичним

перетворювачем.

5. Вперше запропоновано використання поданої методології для оцінки можливої сингулярності у векторному полі інтенсивності.

Практична значимість роботи полягає в можливості використання результатів:

- Для подальшого розвитку теоретичних і прикладних питань фізики мілких морів;
- В задачах створення і висвітленні особливостей формування акустичного поля при створенні нових модельних представлень в галузях підводної телеметрії та звукопідводного зв'язку;
- У впровадженні результатів досліджень в розрахункову практику синтезу акустичних антен і перетворювачів.

Особистий внесок здобувача. В роботах за темою дисертації теоретичного характеру здобувачу належить вибір та обгрунтування принципів постановки задач, досліджень і інтерпретація теоретичних результатів. В роботі експериментального характеру здобувачу належить постановка і проведення вимірювань характеристик сферичних електропружних перетворювачів, аналіз і інтерпретація результатів.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи були опубліковані у іноземних міжнародних наукових виданнях, доповідалися на наукових семінарах.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи представлені у **5** публікаціях наукових робіт, у тому числі **2** статті у наукових фахових виданнях України за спеціальністю 171 Електроніка, в т.ч. **2** статті у якій число співавторів (разом із здобувачем) більше двох осіб; **3** статті у періодичних наукових виданнях проіндексованих у базах WoS та/або Scopus, в т.ч. **3** статті у виданнях, віднесених до першого - третього квартилів (Q1-Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 63 найменувань і 1

додатку. Робота містить 28 рисунків. Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 86 сторінок.

РОЗДІЛ 1

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО СУЧАСНИЙ СТАН ЗАДАЧ ГІДРОЕЛЕКТРОПРУЖНОСТІ ТА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ В ХВИЛЬОВІЙ АКУСТИЦІ

Розглянемо шляхи утворення і розв`язання задач гідроелектропружності до останнього часу.

1.1. Розвиток задач електропружності (основні положення)

Лише в 60х - 70х роках XX століття на основі фундаментальних положень робіт братів Кюрі щодо властивостей п'єзокераміки про виникнення в ній поляризаційних зарядів та їх залежності від сили тиску, п'єзоматеріалам було приділено достатньо уваги. Було згадано ряд наукових праць В. Кедді [1] про використання електромеханічних аналогів для досліджень п`єзоматеріалів, а У. Мезоном в його роботах [2,3] було узагальнено та досліджено ефекти взаємодії механічних і електричних полів. Так, ситуації механічного стиснення-розтягнення вже було добре вивчено і впроваджено в моделі п`єзоелементів та розрахункові схеми, а самі вони отримали назву "Наближена Резонансна Теорія". При цьому вважалось, що при вказаних деформаціях відбувається зміщення електричних зарядів в об'ємі п'єзоелектрика і на електродах виникає різниця потенціалів (прямий п'єзоефект). Зворотним п'єзоефектом вважають виникнення відносної деформації перетворювача при прикладанні до нього електричного поля.

Поширення явища п`єзоефекту на область акустики виявилось вдалим рішенням, в результаті якого галузі електро- і гідроакустики отримали дієву теорію та широке поле для теоретичних і практичних досліджень, а також розвитку електроакустичних перетворювачів різноманітних типів. В зв'язку з цим в якості прикладів визначимо роботи – монографії Б.Аронова, М.Богородського, Г.Свердліна, С.Пугачова. Головними труднощами під час проведення розрахунків за матеріалами вказаних праць - є використання еквівалентних схем, побудованих за методом електромеханічних аналогій в широких частотних смугах, а також складність і невизначеність елементів схем відповідно до граничних умов для багатомодових перетворювачів. Таким чином, виникла необхідність поглибленого

аналітичного вивчення закономірностей статичного і динамічного деформування п’єзокерамічного перетворювача в режимах прийому та випромінювання. Позбутися вказаних труднощів стає можливим, якщо застосувати наскрізний метод. Результати розв`язків задач прийому та випромінювання мають надати достатньо детальне уявлення про кількісні характеристики та особливості виникнення ефектів зв`язаності в п`єзокерамічних об`єктах в умовах деформувань вказаного вище типу. Практично, важливою тут є необхідність доповнення гіпотез про переміщення деформованих п`єзоелементів адекватними їм гіпотезами для електричного поля.

Початок і подальший розвиток наскрізної методології рухаються за двома основними напрямками: стаціонарний та нестаціонарний.

Для стаціонарного режиму основним здобутком є результати праць шкіл електропружності ІМ АНУ, ІГМ АНУ, академіків АНУ В. Гузя, А. Улітко, В. Грінченко [8] та кафедри Акустики та Акустоелектроніки КПІ ім. І. Сікорського [9].

Монографії [8, 9] започатковують основні співвідношення лінійної теорії електропружності, базові задачі електропружності для елементів канонічних форм, використання оболонок і умов тонкостінності в задачах прийому та випромінювання, просторові аспекти проблеми перетворення основних фізичних полів.

По мірі розвитку базових положень у спрощеному плоскому випадку гідропружної задачі були розглянуті основні характеристики механічного поля, коли перетворювачем виступає замкнуте чи незамкнуте п’єзокерамічне кільце та визначені напрями дослідження з врахуванням багатомодовості і типу електродування перетворювача [9, 10].

Фактично, за положеннями джерела [8] для перетворювачів оберненого типу, визначає загальний розв`язок наступних рівнянь:

- рівнянь руху точок поверхні тонкої п`єзокерамічної оболонки (другий закон Н’ютона);
- рівнянь стану для п`єзокераміки;

- узагальненого закону Гука,;
- співвідношень Коші для деформацій і переміщень;
- рівняння Гельмгольца для акустичного поля;
- Розв`язок має виконуватися з використанням узагальнених граничних умов по акустичному, механічному та електричному полю, які зведені:
- до рівності коливальної швидкості матеріальних точок поверхні перетворювача швидкості зміщення по нормалі часток робочого середовища;
- відсутності вільних електричних зарядів в п`єзокерамічному матеріалі перетворювача.

Наповнення праці [8] крім використання окремих положень джерела [11] демонструє моделі і розв`язки задач наскрізного типу не тільки для одиночних перетворювачів, але й для їх систем. Таким чином, в кінці XX – на початку XXI століть було накопичено значний обсяг матеріалів з гідроелектропружності пружних об’єктів канонічних форм та сформовано значне теоретичне та практичне поле результатів, що було викладено в багатьох статтях, наприклад [12-22] для стаціонарних та нестаціонарних [23-27] режимів роботи. Подальше наближення модельних постановок до реальних умов робот перетворювачів відбувалось в частині приближення польових модельних уявлень до реалій. Це був рух введення в постановку не тільки таких складових як п’єзоелементи перетворювача, але й пристроїв технологічної ланки - екрани, пружні замкнені колові і незамкнуті колові шари, елементи каркасних конструкцій і групи елементів герметизації, електромонтажні засоби, способи комутації і формування просторової вибірковості, а також ділянки АЧХ і ФЧХ.

В зв’язку з цим окремо слід відмітити монографію О. Петрищева [28] як роботу, яку в майбутньому разом з [1, 2] вважатимуть фундаментальною в області гармонічних коливань п’єзоелементів в умовах вакууму. В роботі розглянуто базові питання коливань електропружних тонких дисків, біморфних елементів, тонких циліндрів і сфер з радіальною поляризацією.

Крім того, слід позначити ще один цікавий напрямок, який пов`язаний з видом, формою та орієнтацією електродів, нанесених на поверхню перетворювача, і модовим складом коливального процесу. Причому, взаємодії фізичних полів та питання навантаження і комутації електродів визначатимуть просторово-енергетичні характеристики акустичного поля тиску або електричних напруг на суматорі. До того ж, використання модових просторових (кутових) розподілень акустичних тисків і електричних напруг дозволяє отримання достатньо складних характеристик направленості (ХН) в тому числі і однонаправлених [29, 30]. Найбільш простими та широко розповсюдженими є п'єзокерамічні перетворювачі циліндричної та сферичної форми.

Отже, започаткований вказаними вище школами напрями стаціонарної гідроелектропружності набуває сталого розвитку і вдало вписується в питання технічної акустики. Проте, започаткований в ті ж самі часи напрямок нестаціонарних коливань п`єзоелементів канонічних типів на жаль поки не отримав достойного розвитку. Серед тих, хто започаткував цей напрям, відмітитимо роботи наступних науковців: В. Савін, І. Моргун та О. Бабаєв [25-27]. Відмітимо, що в силу складності інтегральних постановок і труднощів, що виникають при створенні силових і кінематичних умов задач, даний напрямок на даний момент розвивається доволі повільно.

Таким чином, вказаний період початку століття показує, що розвиток постановок наскрізних задач на той час йшов достатньо активно. При цьому в частині доопрацювання проблеми введення граничних умов по механічному, електричному та акустичному полю [33-35] пов`язані з проблемами електродування, комутації електродів та оцінки модової структури коливань перетворювачів циліндричного, стержньового та сферичного типів (наприклад роботи [36-38]).

Амплітудні і фазові характеристики модових складових коливань пружного об`єкту розглядались в статтях [17, 18, 40-47].

Зауважимо, що формування модової структури в частині АЧХ та ФЧХ іноді необхідно розглядати в широких частотних смугах, але початковим є монохромний

випадок, розвиток якого ще не завершено [46, 47], а також імпедансних характеристик [46, 47]. Це положення, викладене для двохчастотного сигналу (як показано в роботах [46-51] може бути успішно залучено для оцінки таких характеристик перетворювача як частотні залежності тиску, коливальної швидкості, імпедансу, густини потоку потужності, акустичної енергії та потужності, а також характеристики направленості (ХН).

Так склалося, що більшість вказаних вище постановок та методик розрахунків електроакустичних перетворювачів і їх систем в більшій степені присвячено циліндру і меншій степені сфері. Намагання покінчити з цією диспропорцією ми знаходимо в роботах [48-50, 51-53]. На початку XXI - го століття і до нашого часу, фокус дослідників був спрямований на створення постановок задач екранування – зовнішнього, внутрішнього для систем перетворювачів та поодиноких елементів. До них слід віднести роботи [54, 55].

Таким чином можна сказати, що підхід, який названий “наскрізним” за ряд минулих років набув уваги розробників акустичної апаратури та наразі достатньо швидко розвивається, що надає можливість виходу на рівень більшого розуміння порядку врахування особливостей роботи перетворювача в реальних умовах експлуатації за результатами матеріалів [54, 55].

Уточнюючи положення роботи та розрахунків характеристик електроакустичних перетворювачів слід чекати:

- ускладнення постановок модельних ситуацій випромінювання – прийому; поодинокими перетворювачами та їх систем у вільних та обмежених середовищах (в тому числі каналізуючих просторах хвилеводного типу);
- звукопрозорості шарів і заповнювачів;
- розрахунків акустичного тиску, коливальної швидкості, імпедансів, густини потоку потужності та інтенсивності;

Отже, започаткований вказаними вище школами напрям стаціонарної гідроелектропружності підлягає активній науково-технічній розробці в частині АЧХ модового складу і сумарної АЧХ, розподілення тисків та використання наповнювачів, екранів тощо. Але започаткований в ті ж самі часи напрямок

нестаціонарних коливань п`єзоелементів канонічних типів, на жаль, поки не отримав належного розвитку.

1.2. Метод часткових областей в задачах гідроелектропружності.

Методи хвильової акустики, як другої складової задач гідроелектропружності, залучаються з базових рівнянь математичної фізики, які знайшли широке застосування в акустиці. Серед них віділятимемо: метод Фур'є або метод розділення змінних [57], метод уявних джерел [58, 59], метод зон Френеля [60], метод зображень [61], метод часткових областей [56, 62, 63, 64], інтегральні методи (метод стаціонарної фази) [65].

Кожний зі згаданих методів вимагає залучення ряду граничних умов, використання яких призводить до певної складової свавілля в результатах [63, 66] і вимагає фізичних припущень, зроблених для задач акустики, механіки та електродинаміки.

Так, одними з важливих умов є необхідність спрощення системи шести основних рівнянь гідродинаміки [64, 68, 69] та зведення задачі про рух часток середовища до пошуку їх коливальної щвидкості та миттєвого прискорення. Нехтування переносним прискоренням, формально, і є операцією лінеаризаціїї. Отже, лінійні рівняння Ейлера, лінійні рівняння стану та лінійні рівняння неперервності - в сукупності розв`язків призводять нас до поняття потенціалу $\Phi(r,t)$, тиску $p(r,t)$ та коливальної швидкості $v(r,t)$ частки середовища. Ідеологічно, або тиск $p(r,t)$, або потенціал швидкості $\Phi(r,t)$, які пов'язані між собою відомими співвідношеннями:

$$p(r,t) = \rho_0 \frac{\partial \Phi(r,t)}{\partial t} \tag{1.1}$$

У випадку переходу до векторного поля коливальної швидкості $v(r,t)$ правило відповідає настуному виразу:

$$v(r,t) = -grad\ \Phi(r,t) \tag{1.2}$$

Диференціальні оператори для довільної ортогональної системи координат з відповідними множниками (коефіцієнтами Ламе) є параметрами переходу прямолінійних і криволінійних координат. Сумісний розв`язок шести

лінеаризованих рівнянь гідромеханіки, які [64, 66, 67, 69] включають вказані вище рівняння, приводить нас до рівняння Гельмгольца.

$$\Delta\Phi(r) = div\ grad\ \Phi(r) \rightarrow \Delta\Phi(r) + k^2\Phi(r) = 0 \quad , \qquad (1.3)$$

де $k = \omega / c$ - хвильове число

Розв'язання рівняння (1.3) проводиться для ситуацій роботи пружного тіла в ідеальних стиснених безкінечних середовищах. Крім того, можливим є розв`язання (1.3) для ситуації кусково-однорідних ділянок або частин [56, 65, 63].

Труднощі розв'язання виникають під час накладання на межі робочого середовища граничних умов: вони можуть бути обрані для класичних модельних поверхонь - акустично м`якого, акустично жорсткого та імпедансного типу [63-65]. Найбільш простим і прийнятним вважаємо однорідні умови для акустично жорстких та акустично м`яких поверхонь [65]. Проте, ситуація вимагає додаткових пояснень, тож конкретизуємо її. Моделюванню підлягатимуть задачі дифракціїї, характер взаємодії звукової хвилі з перешкодою, форма, тип падаючої хвилі, частотний діапазон, наповненість технічними рідинами, матеріал перешкоди, види шарів екранування та умови електродування.

Хоча й це і не дозволяє встановити повну достовірність процесу розсіювання та не дає можливості абсолютно коректного обрання граничних умов - у такому випадку слід використовувати умови спряження силового або кінематичного типу [64, 65]. Крім того, необхідно враховувати ту особливість, яка пов`язана з тим, що на вістрях чи крайніх точках ребер конструкцій перетворювачів чи інших елементів моделі коливальна швидкість дорівнює нескінченності [56, 64].

Проте, геометрія задачі при співпадінні будь-якої твірної розсіювача чи елементів випромінювача з координатними вісями в силу симетрії дає певний виграш в частині можливості отримання розв`язків наскрізних задач для канонічних форм випромінювачів чи прийомників (розсіювачів). Отже, початковою важливою задачею є вибір певних однорідних ділянок поверхонь часток пружного тіла з подальшим зшиванням областей, наближених формами до канонічних і умовами розсіяння до класичних однорідних.

Таким чином, після обрання певної кількості часткових областей і введення

граничних умов, а також (або) умов спряження, слід впевнитися, що для кожної частково-однорідної області, рівняння Гельмгольца має окремий частковий розв`язок у вигляді розкладень - рядів, що містять хвильові функції певного типу, що залежить від обраної геометрії задачі і задіяної системи координат. При цьому розв`язок задачі знаходиться шляхом використання традиційних методів математичної фізики (метод Фур`є), векторного аналізу та властивостей ортогональності тригонометричних та хвильових функцій [66, 67]. Невідомі коефіцієнти розкладень - полів відшукуються шляхом використання граничних умов та умов спряження. Для цього записуються функціональні рівняння для частин, поверхонь і областей пружного об’єкту, з визначенням границь кожної часткової області. Після підстановки в функціональні рівняння граничних умов з`являється можливість пошуку як невідомих коефіцієнтів розкладень полів, так і рядів, що записані для тисків, швидкостей, імпедансів.

Конкретизуємо ситуацію складання розв`язку хвильової задачі на елементарному прикладі.

Нехай задано нескінченний за довжиною циліндричний коловий п’єзокерамічний перетворювач, який охоплений суцільним безкінечним пружним шаром (рис. 1.1). Нехай вказаний циліндр має радіус має радіус r_0 і випромінює звук через замкнений коловий пружний шар товщиною $r_1 - r_0$ Хвильовий опір шару $\rho_1 c_1$. Зовнішнім навантаженням є рідина з хвильовим опором ρc.

Відповідно до умов застосування методу частинних областей, розділимо загальну область задачі на дві частинні області I та II так, щоб перша область I знаходилася в межах $r_0 \le r \le r_1$, а область II, відповідно, в межах $r_0 \le r \le r_1$. Тоді для часткових розв’язків рівняння Гельмгольца в термінах потенціалу швидкості Φ запишемо:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[A_n J_n(k_1 r) + B_n N_n(k_1 r) \right] e^{in\varphi} \\ \Phi_{11} &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[C_n H_n^{(1)}(kr) \right] e^{in\varphi} \end{aligned} , \qquad (1.4)$$

де $k_1 = \omega / c_1,\ k = \omega / c,\ \ n = 0,2,3,4...\ \ J_n(k_1 r), N_n(k_1 r),\ H_n^{(1)}$ - циліндричні функції Бесселя, Неймана та Ханкеля, A_n, B_n, C_n - невідомі коефіцієнти розкладень (1.3), які визначатимуться з системи функціональних рівнянь. Вказані коефіцієнти мають задовольняти умові спряження на $r = r_1$ і граничній умові $r = r_0$. Отже:

$$\Phi_I = \Phi_{II},\ r = r_1 \tag{1.5}$$

$$\frac{\partial \Phi_I}{\partial r} = \frac{\partial \Phi_{II}}{\partial r},\ r = r_1 \tag{1. 6}$$

$$-\frac{\partial \Phi_I}{\partial r} = v_0 f(\varphi), r = r_0 \tag{1.7}$$

де v_0 - це приведена амплітуда коливальної швидкості, $f(\varphi)$ - функція розподілення коливальної швидкості по поверхні випромінювача.

Після розкладення $f(\varphi)$ в ряд Фур`є та використання властивостей ортогональності, систему функціональних рівнянь (1.5)-(1.7) перетворюють на систему лінійних алгебраїчних рівнянь відносно невідомих коефіцієнтів розкладень (1.4) ρc

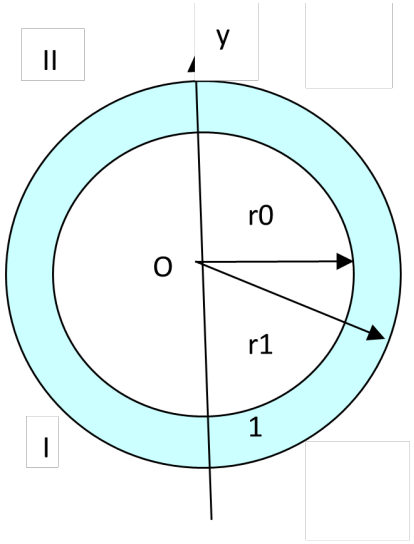


Рис. 1.1. Схема циліндричного перетворювача
з частковими областями I та II

По мірі ускладнення конструкції перетворювача кількість часткових областей, невідомих коефіцієнтів, систем координат, шарів і наповнювачів збільшуватиметься, а отже і кількість функціональних рівнянь збільшуватиметься. Таким чином, залучення методу часткових областей до задач випромінювання і прийому може послужити можливості розвитку і вдосконалення методології розв'язання задач гідроелектропружності для областей або об'єктів канонічних форм.

Висновки до розділу 1

Для визначення сучасного стану задач стаціонарної гідроелектропружності проведено актуальний і послідовний розгляд найбільш яскравих та вивчених аспектів задач наскрізного типу. Відтак, показано складові рівняння постановок вказаних наскрізних розв'язків в режимах прийому та випромінювання. В розділі визначено основні типи граничних умов та умов спряження характеристик основних фізичних полів, що беруть участь в процесах взаємоперетворення акустичних, механічних та електричних полів. При цьому поетапно показано напрямки розв`язку задач вказаного типу із застосуванням методу Фур`є та методу часткових областей при розв'язані задачі наскрізного типу для елементарних базових умов випромінювання та прийому (розсіюванню) звукових хвиль електроакустичним п'єзокерамічним перетворювачем.

Позначені основні чинники, що обумовили виникнення класу наскрізних задач стаціонарної і нестаціонарної гідроелектропружності.

Розглянуто метод часткових областей та введені підходи, що дозволяють позбутися недоліків використання класичних граничних умов при ускладненні геометрії електроакустичного перетворювача.

При цьому, для електроакустичного джерела нульового порядку, яке розміщено в ідеальній рідині, показана необхідність і зручність застосування методу наскрізної задачі напрямку "гідроелектропружність" в ситуаціях прийому та випромінювання звуку. При цьому електроакустичне джерело-випромінювач подано сферичною п'єзокерамічною тонкостінною оболонкою з повним електродуванням її поверхонь.

РОЗДІЛ 2

ПОСТАНОВКА ТА РОЗВ`ЯЗАННЯ НАСКРІЗНОЇ ЗАДАЧІ ПРИЙОМУ ЗВУКУ СФЕРИЧНИМ ЕЛЕКТРОПРУЖНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ В РЕЖИМІ ПРИЙОМУ

Проблема, що розглядається, базується на теоретичних засадах основних положень електропружності [8, 28] в частині залучення до розв'язання :

- рівнянь руху тонкої сферичної оболонки (другий закон Н'ютона) з використанням гіпотез Кірхгофа-Лява;
- умов по електричному полю щодо існування вільних електронів в колі зовнішнього електричного навантаження перетворювача;
- надання оператору Лапласа певного змісту в залежності від обраної системи координат.

Розв`язок має виконуватися з використанням узагальнених граничних умов по акустичному, механічному та електричному полю, що зведені:

- до рівності коливальної швидкості матеріальних точок поверхні перетворювача швидкості зміщення по нормалі часток робочого середовища;
- відсутності вільних електричних зарядів в п`єзокерамічному матеріалі перетворювача.

При цьому розв`язок задачі знаходиться шляхом використання традиційних методів математичної фізики (метод Фур`є), векторного аналізу та властивостей ортогональності тригонометричних та сферичних хвильових функцій. Положення цього розділу в частині постановки, розв`язку, розрахунків, аналізу теоретичних та експериментальних досліджень разом з висновками по розділу наведені в роботі [9].

Робота структурована відповідно до порядку розв`язання традиційних задач випромінювання, прийому та розсіюваяння звуку [4, 10, 12, 14, 31, 32].

2.1 Постановка задачі випромінювання звукових хвиль п`єзокерамічною сферою

Нехай в робочому середовищі, яке представлено ідеальною рідиною, розміщено сферичний електроакустичний перетворювач-випромінювач, поданий замкненою тонкою електропружною оболонкою з радіальною поляризацією (Рис. 2.1). В середовище введено сферичну O,r,φ,θ та прямокутну O,X,Y,Z системи координат, центри яких співпадають з фазовим та геометричним центрами сфери (точка *O*), радіус внутрішньої поверхні оболонки - R, зовнішньої - $R1$, товщина стінки оболонки $h_s = R1 - R$. Всередині оболонки – вакуум, ззовні – рідина з густиною ρ_0 та швидкістю звуку c_0. Внутрішня $(r = R)$ та зовнішня $r = R + h_s$ поверхні оболонки повністю електродовані.

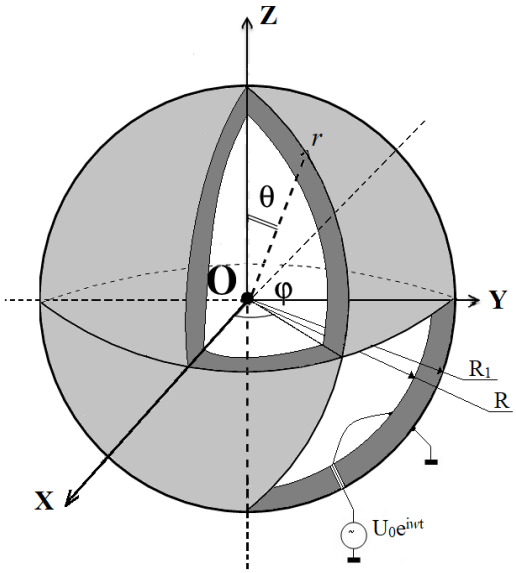


Рис. 2.1 Розрахункова схема сферичного перетворювача-випромінювання

В режимі випромінювання монохроматичного сигналу, при виконанні нерівності $h_s << R$ зазначені умови розміщення перетворювача і тип електродування поверхонь [46, 47, 49, 50, 70] дозволяють вважати, що:

- механічні напруження σ_{ij} і деформації ε_{ij}, i, j - одиничні орти, що незмінні по товщині стінки оболонки (тобто, по координаті *r*);
- радіальна компонента вектору напруженості електричного поля E_r в напрямку поляризації оболонки в проміжку h_s також є незмінною;

- збурення і формування механо – акустичних полів відповідає нульовій моді коливань сфери.

Внутрішні та зовнішні поверхні сферичного перетворювача підключені [49] до генератора фіксованої частоти і разом з ним та елементами електричного монтажу утворюють зовнішнє електричне коло збудження перетворювача. Елементи електричного монтажу внутрішнього електроду виведено назовні через спеціальний безкінечно малий технологічний отвір. Внутрішній електрод сфери – є потенціальним, зовнішній електрод – заземлено. Вважаємо, що електроди оболонки та елементи електричного монтажу за своїми технологічними властивостями жодним чином не впливають на роботу перетворювача – оболонки.

Після включення генератора і подачі на електроди різниці потенціалів $U = U_0 e^{-i\omega t}$ під впливом утвореного електричного поля напружено-деформівний стан оболонки змінюється. При цьому результуюче електричне поле, що виникає в об`ємі оболонки, складається як із зовнішнього (яке збуджується генератором) так і із внутрішнього електричного поля, яке викликане зміщеннями зі стану рівноваги іонів п`єзоматеріалу оболонки (прямий п`єзоефект).

Зв`язаність основних (електричних, механічних та акустичних) фізичних полів, що беруть участь в процесі перетворення електричної енергії на акустичну, та обставини постановки задачі в частині технологічних особливостей і типу електродування обумовлюють необхідність сумісного розв’язку наступних рівнянь та використання наступних співвідношень і умов [8, 28, 49] :

- рівнянь стану для п’єзокераміки;
- рівнянь руху матеріальних точок сферичної тонкої оболонки (або другий закон Н`ютона);

$$\frac{1}{R1}\left(\sigma_{\varphi\varphi} + \sigma_{\theta\theta}\right) + \rho_m \omega^2 u_r = 0 \quad , \tag{2.1}$$

де: $\sigma_{\varphi\varphi}$, $\sigma_{\theta\theta}$ - амплітудні значення механічних напружень стиснення-розтягнення вздовж вісей азимутальних (широтних) та полярних (меридіональних) кутів сферичної системи координат (ρ_m - густина п`єзокераміки; u_r - амплітудне значення гармонійно змінного радіального компонента центрально-симетричного

вектору зміщення матеріальних часток п`єзокераміки):

- узагальненого закона Гука, записаного для середовищ з ускладненими властивостями

$$\sigma_{rr} = c_{11}^{E}\varepsilon_{rr} + c_{12}^{E}\varepsilon_{nn} + c_{12}^{E}\varepsilon_{nn} - e_{11}E_r\,, \tag{2.2}$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = c_{12}^{E}\varepsilon_{rr} + c_{22}^{E}\varepsilon_{\varphi\varphi} + c_{12}^{E}\varepsilon_{\theta\theta} - e_{12}E_r\,, \tag{2.3}$$

$$\sigma_{\theta\theta} = c_{12}^{E}\varepsilon_{rr} + c_{12}^{E}\varepsilon_{\varphi\varphi} + c_{22}^{E}\varepsilon_{\theta\theta} - e_{12}E_r\,. \tag{2.4}$$

де $\varepsilon_{rr}, \varepsilon_{\varphi\varphi}, \varepsilon_{\theta\theta}$ амплітуди деформацій стиснення – розтягнення вздовж відповідних вісей сферичної системи координат; c_{11}^{E}, c_{12}^{E} - компоненти матриці модуля пружності; e_{11}, e_{12} - компоненти матриці п`єзомодулів.

- співвідношення Коші для деформацій виду $\varepsilon_{rr} = u_r / r$ та $\varepsilon_{\varphi\varphi} = \varepsilon_{\vartheta\vartheta} = u_r / r$ -

рівняння Гельмгольца для акустичного поля p_a, записаного в сферичних координатах $p_a(r,\varphi,\theta)$, виду

$$\Delta p_a(r,\varphi,\theta) + k^2 p_a(r,\varphi,\theta) = 0 \tag{2.5}$$

де $k = \frac{\omega}{c_0}$ - хвильове число, $\omega = 2\pi f$ - колова частота, рад, f - частота, Гц.

Відповідно до обраного типу електродування випромінювання відбувається ненаправлено. Отже, розв`язок рівняння (2.6) буде залежати лише від радіальної координати r:

$$p(r,\varphi,\theta,t) = p_a(r,t) = \frac{p_a(r)}{r} e^{-i(\omega i - kr)}\,, \tag{2.7}$$

а радіальна компонента вектора зміщення u_r пов’язана з тиском та нормальною складовою вектора коливальної швидкості точок поверхні сфери $v_r(r,t)$ наступною умовою :

$$v_r(r,t)\big|_{r=R1} = -\frac{1}{i\omega\rho_0}\left.\frac{\partial p_a(r,t)}{\partial r}\right|_{r=R1} = -i\omega u_r\big|_{r=R1} \tag{2.8}$$

При цьому сумісний розв`язок рівнянь (2.1)-(2.8) має відбуватися із

залученням акусто-механічних граничних умов, які сформульовані і застосовані як умови спряження силового типу:

$$\sigma_{ii}\big|_{r=R1} = p = \Delta p = p_{зв}\big|_{r=R1} - p_{вн}\big|_{r=R}, \text{ при } (r = R + h_s) \qquad (2.9)$$

Завершує перелік умова ортогональності тригонометричних та сферичних хвильових функцій та умова Зоммерфельда [72].

Відносно граничних умов по електричному полю зауважимо, що у відповідності [8, 28] вони визначають наступні ситуації:

- перша (як відмічено вище) стосується накладання умови відсутності в матеріалі оболонки вільних електронів $div\vec{D} = 0$ (D - вектор електричної індукції) ,
- друга - умови зв'язку напруженості електричного поля в об'ємі перетворювача з електричною напругою $E = -grad\Psi$, (Ψ - електричний потенціал , $\Delta\Psi$ - різниця потенціалів).
- третя умова ілюструє зв`язок електричного струму I в колі живлення з поверхневою густиною зарядів на електродованих поверхнях оболонки Q:

$$I = -i\omega Q. \qquad (2.10)$$

Таким чином, використовуючи результати постановки, зазначимо, що визначенню підлягають частотні залежності коефіцієнту передачі перетворювача (електрична напруга – акустичний тиск)) $K_п(\omega)$, а також частотні залежності тиску $p_a(\omega)$, та електричного імпедансу $Z_{ел}(\omega)$ Зауважимо, що всі наведені характеристики основних фізичних полів – електричного, механічного та акустичного – є функції частоти ω та відстані r. Ця залежність від колової частоти (для спрощення викладення) в проміжних результатах наведена лише для прикінцевих співвідношень, де перебіг значень ω дає амплітудно-частотну залежність того чи іншого чинника, відстань при цьому може бути фіксованою. Крім того, слід враховувати те, що при роботі випромінювача у смузі частот $\Delta\omega$ АЧХ $Z_{ел}(\Delta\omega)$ (у порівнянні з АЧХ $Z_{ел}(\omega)$ монохроматичного випадку) абсолютно спотворюється, що показано в роботах [46, 47].

2.2. Розв`язання наскрізної задачі випромінювання

Отже, зовнішнім навантаженням сферичної оболонки є рідина, а всередині оболонки вакуум. Таким чином, звукове поле у внутрішньому об`ємі сфери існувати не може і до уваги не береться. При цьому зовнішнє навантаження сфери зведено до різниці тисків Δp_a на її зовнішній та внутрішній поверхнях $\Delta p = p_{зв}\big|_{r=R1} - p_{вн}\big|_{r=R}$, один з яких ($p_{вн}\big|_{r=R}$) є нульовим в силу умови вакуумізації. Додамо, що в розглянутому випадку метод частинних областей не потрібний, бо в силу тонкостінності перетворювача та вакуумізації його внутрішньої порожнини, задача може бути розв'язана шляхом визначення як частинної – лише з однієї зовнішньої області перетворювача.

Застосуємо умову (2.7). Для амплітуди нормальної складової механічних напружень справедливою є силова умова спряження

$$: \sigma_{rr}\big|_{r=R1} = p\big|_{r=R1} = \frac{p_a}{r} e^{-i(\omega t - ikr)}\Big|_{r=R1},$$

де p_a - амплітуда тиску, та кінематична умова спряження

$$v_r\big|_{r=R1} = \frac{1}{i\omega\rho}\frac{\partial p_a}{\partial r}\Big|_{r=R1} = v_n\big|_{r=R1}, \qquad (2.8)$$

v_r, v_n - швидкості зміщення в радіальному напрямку коливальних рухів матеріальних точок поверхні оболонки та швидкість руху по нормалі часток середовища на границі $r = R1$, $r = R1$ відповідно.

2.2.1. Визначення АЧХ коефіцієнта передачі та електричного імпедансу п'єзокерамічного сферичного прийомника

Застосовуючи умову (2.8), після підстановки в рівняння (2.2), знайдемо амплітудне значення деформації ε_{rr} :

$$\varepsilon_{rr} = \frac{p_a}{c_{11}^E} - \frac{c_{12}^E}{c_{11}^E}(\varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{\theta\theta}) - \frac{e_{11}}{c_{11}^E} E_r \qquad (2.9)$$

Після ряду перетворень, пов'язаних з виключенням деформацій ε_{rr} із рівнянь (2.3), (2.4), для нормальних складових механічних напружень:

$$\sigma_{rr} = c_{11}^E \varepsilon_{rr} + c_{12}^E \varepsilon_{nn} + c_{12}^E \varepsilon_{nn} - e_{11} E_r , \tag{2.2}$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = c_{12}^E \varepsilon_{rr} + c_{22}^E \varepsilon_{\varphi\varphi} + c_{12}^E \varepsilon_{\theta\theta} - e_{12} E_r , \tag{2.3}$$

$$\sigma_{\theta\theta} = c_{12}^E \varepsilon_{rr} + c_{12}^E \varepsilon_{\varphi\varphi} + c_{22}^E \varepsilon_{\theta\theta} - e_{12} E_r . \tag{2.4}$$

де $\varepsilon_{rr}, \varepsilon_{\varphi\varphi}, \varepsilon_{\theta\theta}$ амплітуди деформацій стиснення – розтягнення вздовж відповідних вісей сферичної системи координат; c_{11}^E, c_{12}^E - компоненти матриці модуля пружності; e_{11}, e_{12} - компоненти матриці п`єзомодулів:

$$\varepsilon_{\varphi\varphi} = c_{11} p_a + c_{22} \varepsilon_{\varphi\varphi} + c_{12} \varepsilon_{\theta\theta} - e_{11}^* E_r , \tag{2.10}$$

$$\varepsilon_{\theta\theta} = c_{11} p_a + c_{12} \varepsilon_{\varphi\varphi} + c_{22} \varepsilon_{\theta\theta} - e_{12}^* E_r \tag{2.11}$$

де $c_{11} = \frac{c_{12}^E}{c_{11}^E}$, $c_{12} = c_{11}^E \left(1 - \frac{c_{12}^E}{c_{11}^E}\right)$ $c_{22} = \left(c_{22}^E - \frac{(c_{12}^E)^2}{c_{11}^E}\right)$, $e_{12}^* = \left(-e_{11} \frac{c_{12}^E}{c_{11}^E} + e_{12}^*\right)$ (2.12)

- матеріальні константи

Далі, враховуючи зв'язок між зміщеннями та деформаціями, який визначається співвідношеннями Коші [8, 28]:

$$\varepsilon_{\varphi\varphi} = \varepsilon_{\theta\theta} = u_r / R \tag{2.13}$$

вирази (2.10), (2.11) можна представити у вигляді

$$\varepsilon_{\varphi\varphi} = \varepsilon_{\theta\theta} = c_{11} p_a + Y \frac{u_r}{R} - e_{12}^* E_r \tag{2.14}$$

де $Y = \left(c_{12} + c_{22}\right)$ - ефективний модуль пружності.

Симетричне деформування сферичної оболонки, що виникає при збудженні її зовнішнім генератором призводить до того, що вектор електричної індукції D повністю визначається своєю радіальною компонентою D_r і у відповідності до [2, 6] для сфери записується так:

$$D_r = e_{11}\varepsilon_{rr} + e_{12}\left(\varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{\theta\theta}\right) + \chi_{11}^{\sigma} E_r, \tag{2.15}$$

де $\chi_{11}^{\sigma} = \chi_{11}^{\varepsilon} + \frac{(e_{11})^2}{c_{11}^{E}}$ - компоненти тензора діелектричної проникливості, встановлені при нульових (сталих) нормальних механічних напруженнях σ_{ii} і деформаціях $\varepsilon_{rr\leq}$. Після підстановки виразу (2.9) для деформацій ε_{rr} в вираз (2.13) та використовуючи вираз (2.14), змінюємо запис для компоненти вектора D_r

$$D_r = 2\frac{u_r}{R} e_{12}^{*} + e_1 p_a + \chi_{11}^{\sigma} E_r, \tag{2.16}$$

де $e_{12}^{*} = \left(e_{12} - e_{11}\frac{c_{12}^{E}}{c_{11}^{E}} \right)$, $\chi_{11}^{\sigma} = \left(\chi_{11}^{\varepsilon} + \frac{(e_{11})^2}{c_{11}^{E}} \right)$, $e_1 = \frac{e_{11}}{c_{11}^{E}}$ (2.17)

Застосуємо граничні умови по електричному полю відносно індукції $div\,\breve{D} = 0$ [28], яка визначає відсутність вільних носіїв електрики в п`єзоматеріалі і в сферичних кооординатах, складаємо рівність:

$$div\,\breve{D}_r = \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2 \breve{D}_r\right) = 0 \quad . \tag{2.18}$$

Для напруженості електричного поля в об’ємі кераміки і різниці потенціалів на електродах оболонки використовуємо другу умову [8]:

$$U = \int_{R}^{R1} E_r dr = \Delta\Psi, \quad \Psi(r)\big|_{r=R} = U_0,\ \Psi(r)\big|_{r=R1} = 0 \tag{2.19}$$

Щодо визначення струму, то зафіксуємо зв'язок електричних характеристик наступним чином:

$$Q = \int_{S} D_r dS, \quad I = i\omega Q \quad . \tag{2.20}$$

де Q поверхнева густина електричних зарядів на електроді з площею S.

Розв`язком диференційного рівняння [18] в стандартній формі буде:

$$\breve{D}_r = \frac{C_{02}}{R1^2}\bigg|_{r=R1} \tag{2.21}$$

де C_{02} - невідома константа, яку необхідно знайти.

Вираз (2.11) підставимо в (2.21), після чого отримаємо рівність:

$$D_r = 2\frac{u_r}{R}e_{12}^* + e_1 p_a + \chi_{11}^{\sigma} E_r = \frac{C_{02}}{R^2}, \tag{2.22}$$

звідки знаходимо напруженість електричного поля E_r

$$E_r = \frac{1}{\chi_{11}^{\sigma}}\left(\frac{C_{02}}{R^2} - 2e_{12}^*\frac{u_r}{R} - e_1 p_a\right) \tag{2.23}$$

Підставимо (2.23) в (2.13), (2.14) та для механічного поля поданого раніше механічними напруженнями, отримаємо:

$$\sigma_{\varphi\varphi} = \sigma_{\theta\theta} = Y^D\frac{u_r}{R} + Y_1^D p_a - \frac{e_{12}^* C_{02}}{\chi_{11}^{\sigma} R^2}, \tag{2.24}$$

де $Y^D = Y + 2\frac{(e_{12}^*)^2}{\chi_{11}^{\sigma}}$, $Y_1^D = c_{11} + e_1\frac{e_{12}^*}{\chi_{11}^{\sigma}}$ - ефективний модуль пружності, який визначено з врахуванням зв`язаності електричних та пружних (механо-акустичних) полів. Тепер, в свою чергу, використовуємо вираз (2.1), який відповідає закону Н'ютона. Підстановка в нього виразу (2.24) та проведення ряду перетворень дає для радіальної складової переміщень матеріальних точок оболонки u_r:

$$u_r = u_r(\omega) = \frac{\frac{2e_{12}^*}{Y^D\chi_{11}^{\sigma}}\frac{C_{02}}{R} - 2\frac{Y_1^D}{Y^D}p_a R}{\left[2 - (\gamma R)^2\right]}, \tag{2.25}$$

де $\gamma^2 = \rho_м\omega^2 / Y^D$ квадрат хвильового числа центрально-симетричних коливань замкненої сферичної електропружної оболонки.

Скористаємось групою граничних умов по електричному полю (2.19):

$$E_r = -\frac{\partial\Psi(r)}{\partial r} = -\frac{\Delta\Psi(r)}{\Delta r} = -\frac{\Psi_{зв} - \Psi_{вн}}{h_s} = -\frac{\Psi_{R1} - \Psi_R}{h_s}, \tag{2.26}$$

Тобто, в ліву частини рівності (2.23) поставимо умову (2.26) і отримаємо:

$$E_r = -\frac{\partial \Psi(r)}{\partial r} = \frac{1}{\chi_{11}^{\sigma}}\left(\frac{C_{02}}{R^2} - 2e_{12}^{*}\frac{u_r}{R} - e_1 p_a\right) \Rightarrow \frac{\partial \Psi(r)}{\partial r} = -\frac{1}{\chi_{11}^{\sigma}}\frac{C_{02}}{R^2} + 2e_{12}^{*}\frac{u_r}{\chi_{11}^{\sigma} R} + \frac{e_1}{\chi_{11}^{\sigma}} p_a, \qquad (2.27)$$

Далі в рівність (2.27) підставимо вираз для радіальної складової зміщення u_r (співвідношення (2.25)) і після введення коефіцієнта електро- механічного зв`язку $k_{емз} = e_{11}^{*}\sqrt{\frac{2}{Y^D \chi_{11}^{\sigma}}}$ та ряду алгебраїчних перетворень маємо:

$$\frac{\partial \Psi(r)}{\partial r} = -\frac{1}{\chi_{11}^{\sigma}}\frac{C_{02}}{R^2}\left\{\frac{\left\{\left(1+k_{емз}^2\right)\left[2-(\gamma R)^2\right]-2k_{емз}^2\right\}}{\left(1+k_{емз}^2\right)\left[2-(\gamma R)^2\right]}\right\} + \frac{p_a}{\chi_{11}^{\sigma}}\left\{\frac{\left\{\left(1+k_{емз}^2\right)\left[2-(\gamma R)^2\right]e_1 - e_2 2k_{емз}^2\right\}}{\left(1+k_{емз}^2\right)\left[2-(\gamma R)^2\right]}\right\} \qquad (2.28)$$

Використовуючи інтегральне представлення

$$U = \int_{R}^{R+h_s} E_r dr, \qquad (2.29)$$

проінтегруємо ліву і праву частини (2.28) по r в межах $r = R,\ r = R1$ і отримаємо для електричного потенціалу:

$$\Psi(r)\big|_{r=R1} = -\frac{r}{\chi_{11}^{\sigma}}\frac{C_{02}}{R^2}\left\{\frac{\left\{\left(1+k_{емз}^2\right)\left[2-(\gamma R)^2\right]-2k_{емз}^2\right\}}{\left(1+k_{емз}^2\right)\left[2-(\gamma R)^2\right]}\right\} + \frac{p_a r}{\chi_{11}^{\sigma}}\left\{\frac{\left\{\left(1+k_{емз}^2\right)\left[2-(\gamma R)^2\right]e_1 - e_2 2k_{емз}^2\right\}}{\left(1+k_{емз}^2\right)\left[2-(\gamma R)^2\right]}\right\}\Bigg|_{R}^{R1} + C_{01} =$$

$$= -\frac{h_s}{\chi_{11}^{\sigma}}\frac{C_{02}}{R^2}\left\{\frac{\left\{\left(1+k_{емз}^2\right)\left[2-(\gamma R)^2\right]-2k_{емз}^2\right\}}{\left(1+k_{емз}^2\right)\left[2-(\gamma R)^2\right]}\right\} + \frac{p_a h_s}{\chi_{11}^{\sigma}}\left\{\frac{\left\{\left(1+k_{емз}^2\right)\left[2-(\gamma R)^2\right]e_1 - e_2 2k_{емз}^2\right\}}{\left(1+k_{емз}^2\right)\left[2-(\gamma R)^2\right]}\right\} \qquad (2.30)$$

де $C_{03} = 0$.

Отримані результати визначення електричної напруги відповідають обраним при постановці задачі граничним умовам виду (2.19). Невідомий коефіцієнт $C_{02'}$ після перетворень можно записати як:

$$C_{02} = U_0 \frac{\chi_{11}^{\sigma}}{h_s} R^2 \left\{\frac{\left(1+k_{емз}^2\right)\left[2-(\gamma R)^2\right]}{\left\{\left(1+k_{емз}^2\right)\left[2-(\gamma R)^2\right]-2k_{емз}^2\right\}}\right\} - p_a R^2 \left\{\frac{\left\{\left(1+k_{емз}^2\right)\left[2-(\gamma R)^2\right]e_1 - e_2 2k_{емз}^2\right\}}{\left\{\left(1+k_{емз}^2\right)\left[2-(\gamma R)^2\right]-2k_{емз}^2\right\}}\right\} \qquad (2.31)$$

Отже, застосовуючі умови (2.25) та знайдений коєфіцієнт $C_{02'}$ (2.31), можно розрахувати амплітуди зміщень матеріальних точок поверхні сферичної оболонки. Крім цього, використання (2.31), (2.20) та закон Ома для ділянки кола

можно знайти значення електричного імпедансу перетворювача-оболонки $Z_{ел}$:

$$Z_{ел} = -\frac{U_0}{I} = -\frac{U_0}{i\omega 4\pi R^2}\frac{1}{D_z} = \frac{U_0}{i\omega 4\pi}\frac{\left\{\left(1+k_{емз}^2\right)\left[2-(\gamma R)^2\right]-2k_{емз}^2\right\}}{\frac{U_0\chi_{11}^{\sigma}}{h_s}R^2\left(1+k_{емз}^2\right)\left[2-(\gamma R)^2\right]-p_a R^2\left\{\left(1+k_{емз}^2\right)\left[2-(\gamma R)^2\right]e_1-2e_2k_{емз}^2\right\}} \tag{2.32}$$

або після введення електричної статичної ємності сферичної оболонки $C_0 = i\omega 4\pi R^2\chi_{11}^{\sigma}/h_s$, для опору запишемо:

$$Z_{ел} = -\frac{U_0}{i\omega C0}\frac{\left\{\left(1+k_{емз}^2\right)\left[2-(\gamma R)^2\right]-2k_{емз}^2\right\}}{U_0\left(1+k_{емз}^2\right)\left[2-(\gamma R)^2\right]-i\omega 4\pi p_a R^2\left\{\left(1+k_{емз}^2\right)\left[2-(\gamma R)^2\right]e_1-2e_2k_{емз}^2\right\}} \tag{2.33}$$

У випадку, коли зовнішнє середовище – вакуум, ситуація значно спрощується, бо акустичні хвилі в вакуумі не поширюються. При цьому $\sigma_{rr} = 0,\ p_a = 0$, а вираз для імпедансу (33) набуває виду:

$$Z_{ел} = -\frac{1}{i\omega C0}\frac{\left\{\left(1+k_{емз}^2\right)\left[2-(\gamma R)^2\right]-2k_{емз}^2\right\}}{\left(1+k_{емз}^2\right)\left[2-(\gamma R)^2\right]} = -\frac{1}{i\omega C0}L0(\omega) \tag{2.34}$$

$$L0(\omega) = \frac{\left\{\left(1+k_{емз}^2\right)\left[2-(\gamma R)^2\right]-2k_{емз}^2\right\}}{\left(1+k_{емз}^2\right)\left[2-(\gamma R)^2\right]} - \tag{2.35}$$

та має зміст частотно залежного коефіцієнта передачі перетворювача $K_п(\omega)$ по колу “генератор – робоче середовище”.

2.2.2. Визначення ЧХ акустичного тиску

Вище отримано ряд корисних співвідношень. До них віднесемо рівняння (2.25) для радіальної складової переміщень матеріальних часток оболонки u_r ; вираз для коефіцієнта $C_{02'}$ (формула (2.31)), кінематичну умову спряження з системи (8), властивості ортогональності сферичних і тригонометричних хвильових функцій та розв`язок хвильового рівняння (6) для випадку реалізації нульової моди коливань оболонки відомого виду рівняння Гельмгольца:

$$p_a\left(r\right) = \frac{p_0}{r}e^{ikr} \tag{2.36}$$

Застосуємо зв`язок коливальної швидкості зі зміщенням та акустичним

тиском виду

$$v(r) = -i\omega u_r = v_r(r) = \frac{1}{i\omega\rho}\frac{\partial p_0(r)}{\partial r} \quad , \tag{2.37}$$

та після підстановки в (2.25) виразів (2.31), (2.36), виконуючи кінематичні умови спряження (2.8) і рівність (2.37), після перетворень отримаємо амплітуду акустичного тиску $p_a(r)$ при $r = R1$, записану для області частот ω як:

$$p_0(\omega) = \frac{\omega^2 \rho U_0 L1(\omega) R1^2}{\left(1 + \omega^2 \rho\left(L2(\omega) + L3(\omega)\right)\right)}, \tag{2.38}$$

де $$L1(\omega) = \left(\frac{\chi_{11}^{\sigma} R1^2}{h_s}\right)\left(\frac{2e_{12}^*}{\chi_{11}^{\sigma} Y^D R1}\right)\left(\frac{F1(\omega)}{F3(\omega)}\right), \quad L2(\omega) = \left(R1^2\right)\left(\frac{2e_{12}^*}{\chi_{11}^{\sigma} Y^D R1}\right)\left(\frac{F2(\omega)}{F3(\omega)}\right) \tag{2.39}$$

$$L3(\omega) = \left(R1^2\right)\left(\frac{2Y_1^D R1}{Y^D}\right)\left(\frac{1}{F3(\omega)}\right),\ F1(\omega) = \frac{\left\{\left(1 + k_{емз}^2\right)\left[2 - (\gamma R1)^2\right] - 2k_{емз}^2\right\}}{\left(1 + k_{емз}^2\right)\left[2 - (\gamma R1)^2\right]},$$

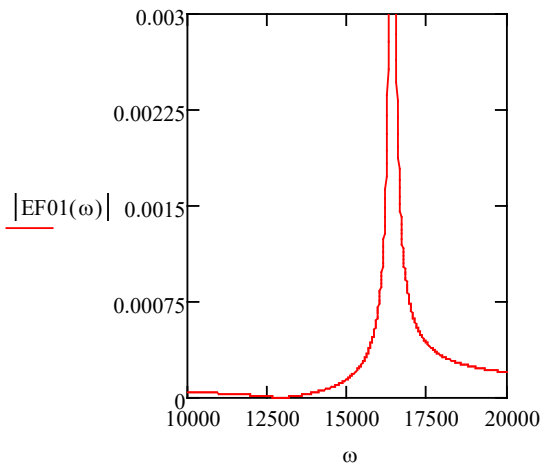
$$F2(\omega) = \frac{\left\{\left(1 + k_{емз}^2\right)\left[2 - (\gamma R1)^2\right] e_1 - 2e_2 k_{емз}^2\right\}}{\left(1 + k_{емз}^2\right)\left[2 - (\gamma R1)^2\right]},$$

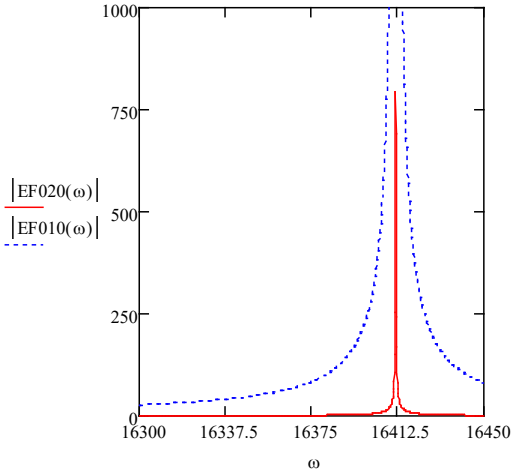
$$F3(\omega) = \left[2 - (\gamma R1)^2\right].$$

Визначення, власне, акустичного тиску $p_a(\omega)$ здійснюється шляхом використання виразу для амплітуди тиску (2.38), (2.39) в рівнянні для $p_0(\omega)$.

2.3 Результати розрахунків

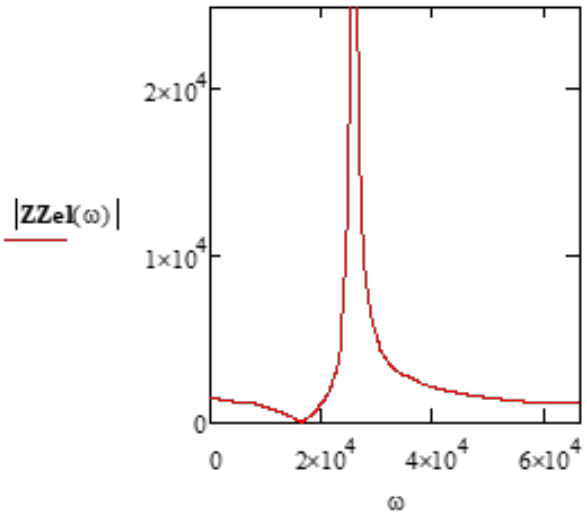
Розрахунки частотних залежностей коефіцієнту передачі $K_{нс}(\omega)$, імпедансу $Z_{ел}(\omega)$ та тиску , $p_a(\omega)$ проводилися для сферичної оболонки радіусом $R1 = 0.25$ м, яка виконана із п`єзоматеріалу ЦТС-19, має коефіцієнт електро-механічного зв'язку $k_{емз} = 0.5$ Розрахункові відстані для акустичних тисків становили 1 м і 5 м. Результати розрахунків наведено на Рис.2.3 – Рис. 2.5





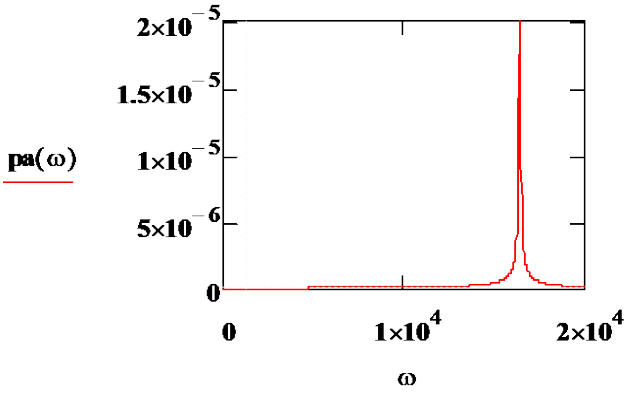
а) Робоче середовище – вакуум б) Робоче середовище -вода

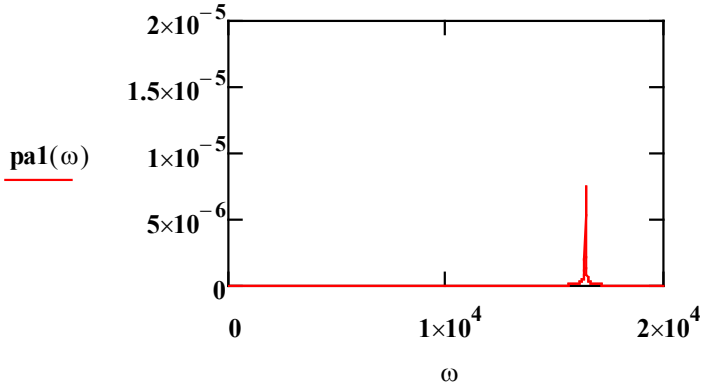
Рис. 2.3 АЧХ коефіцієнтів передачі $K_{нс}(\omega)$,



Робоче середовище – вода

Рис. 2.4 АЧХ електричного імпедансу $Z_{el}(\omega)$





а) Робоче середовище – вакуум б) Робоче середовище – вода

Рис. 2.5 АЧХ акустичного тиску $p_a(\omega)$: а) R1=*1 м;* *б)* R1= *10 м*

Так, на рис. 2.3 а) показано розрахований графік коефіцієнту $K_{нс}(\omega)$ який має два локальних екстремуми – локальний мінімум та локальний максимум. Локальний мінімум $K_{нс}(\omega)$, визначає ситуацію найбільших амплітуд зміщень радіальних складових рухів оболонки і є резонансом електромеханічної природи відповідної частоти ω_p, для якої має виконуватися рівність

$$2 - (\gamma R1)^2 - 2k_{емз}^2 = 2 - \left(\frac{\omega_p}{\omega_a}\right)^2 = 0 .$$

Де $\gamma^2 = \rho_0 \omega_p^2 / Y^D$, $k_{емз}^2 = \left[2 - \left(\frac{\omega_p}{\omega_a}\right)^2\right]\frac{1}{2}$ - відповідно, квадрат хвильового числа коливань оболонки і квадрат коефіцієнта електромеханічного зв'язку. Другий локальний екстремум визначає ситуацію найменших радіальних зміщень точок поверхні оболонки і є електромеханічним антирезонансом з частотою ω_a. Для нього виконується рівність $F3(\omega) = \left[2 - (\gamma R1)^2\right] = 0,$

Модулі пружності розраховуються за формулами

$$Y^D = \frac{\omega_a^2 \rho_0}{2} R1 \ , \ Y = Y^D \frac{1}{\left(1 + k_{емз}^2\right)} .$$

В нашій розрахунковій ситуації частота електромеханічного резонансу становить ≈ 10 кГц. Введення навантаження з боку робочого середовища (рис. 2.3 б) впливає на ЧХ для обраних розрахункових ситуацій лише в частині активного навантаження.

Щодо ЧХ акустичного тиску, то, очевидно, очікуваною є частотна залежність тиску $p_a(\omega)$, яка за формою відповідає характеристиці, наведеної на Рис. 2.4 - 2.5. Крім того залишається залежність акустичного тиску від відстані (див. Рис. 2.5). Самі графіки містять локальний максимум, який знаходиться на частоті резонансу нульової моди коливань ω_p. Розрахунки виконано для двох ситуацій – перша – стандартна, для якої тиск визначається на традиційній відстані 1 м, і другої – на відстані 5 м. При цьому, (рис 2.3 а,б) рівні локальних максимумів зменшуються на 20 дБ при збільшенні розрахункової відстані 5 – 6 разів (або $\approx$15-16 дБ), що цілком відповідає закону зворотних радіусів та підтверджено експериментально.

Висновки до розділу 2

На прикладі роботи сферичного електроакустичного джерела нульового порядку в ідеальній рідині показано застосування методу наскрізної задачі напрямку “гідроелектропружність” в ситуації випромінювання звуку. При цьому електроакустичне джерело-випромінювач подано сферичною п’єзокерамічною тонкостінною оболонкою з повним електродуванням її поверхонь.

В частині навантаження перетворювача з боку робочого середовища показана можливість, власне, розв`язку задачі випромінювання з врахування ефектів зв`язаності основних фізичних полів, які характеризуються пружними силами механо-акустичної природи та силами Кулона (електричними силами).

Розраховано та зроблено аналіз основних частотних залежностей комплексних характеристик випромінювача: $K_{нс}(\omega)$, $Z_{ел}(\omega)$, $p_a(\omega)$. Показано можливості розв`язку в частині визначення матеріальних констант п`єзоматеріалу оболонки фіксованих геометричних розмірів та частотних залежностей основних електроакустичних характеристик джерела.

Визначено, що даний підхід є перспективним і має бути поширений на задачі випромінення-прийому звуку в рамках хвильової акустики безмежних і обмежених просторів.

РОЗДІЛ 3

ПОСТАНОВКА ТА РОЗВ`ЯЗАННЯ НАСКРІЗНОЇ ЗАДАЧІ ПРИЙОМУ ЗВУКУ СФЕРИЧНИМ ЕЛЕКТРОПРУЖНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ

Продовженням постановок електропружних завдань щодо режиму випромінювання, очевидно, має бути ситуація для прийому звуку. При цьому, якщо випромінювання вимагає привнесення в конструкцію перетворювача засобів армування з метою надання більшої механічної міцності, то для прийомників такої необхідності немає. Проектування гідроакустичних перетворювачів дуже часто передбачає використання компенсованих конструкцій, що володіють стійкістю до дії гідростатичного тиску та спроможності працювати в широкому діапазоні частот. Одним із можливих напрямків конструювання, що одночасно реалізують такі властивості, є заповнення внутрішньої порожнини перетворювача акустичними середовищами у вигляді рідин, газів а також конструктивних елементів, як зовнішнього так і внутрішнього виконання певних геометричних форм і складу [70, 71, 72, 73, 74].

Як відмічено вище, перевагою такого підходу є збільшення діапазону робочих частот та глибин. Це надає можливість регулювання частотних залежностей основних характеристик акустичних, механічних та електричних полів, які беруть участь у процесі перетворення акустичного поля на механічне, а потім - на електричне. Однак, при цьому можливе зниження ефективності роботи перетворювача щодо можливого зменшення чутливості, збільшення розмірів і вартості перетворювача, а також ускладнення технології складання і самої конструкції. Опис очікуваних ефектів зміни чутливості зручно та перспективно описувати, ґрунтуючись на методології розглянутих вище наскрізних задач, що власне і передбачають уявлення процесу прийому від тиску в акустичному полі – до електричної напруги на навантаженні електродів перетворювача спільним рішенням рівнянь, для акустичних, механічних та електричних полів (наприклад, роботи [8, 11-13, 24, 28].

Запропонована ситуація присвячена врахуванню властивостей

п’єзокерамічних електроакустичних перетворювачів, а отже відноситься до класу завдань стаціонарної гідроелектропружності. У роботі розглянуто результати чисельних досліджень розв'язання наскрізного завдання про прийом звукових хвиль сферичним п'єзокерамічним перетворювачем з електродованими поверхнями, а сам матеріал дисертації є продовженням робіт [8, 9, 28]. Представлені матеріали містять інформацію про основні співвідношення та вирішення наскрізного завдання прийому звукових хвиль [9], результати розрахунків та аналіз частотних характеристик електричної напруги на навантаженні сферичного перетворювача, конструкція якого передбачає або вакуумування внутрішньої області, або заповнення її ідеальними середовищами.

3.1 Постановка задачі прийому звукових хвиль сферичним перетворювачем

Нехай в ідеальній рідині з густиною ρ і швидкістю звуку c (рис. 3.1) розміщено приймальний п`єзокерамічний перетворювач з повністю електродованими зовнішньою та внутрішньою поверхнями.

3.1.1. Загальні положення про прийом звуку

Перетворювач подано у якості сферичної тонкостінної оболонкою (радіусом R_0 и товщиною стінки h_0), яка виконана з п’єзокераміки, що виконана із п’єзоматеріалу з густиною ρ_M та швидкістю звуку c_m. Оболонка радіально поляризована (Рис. 3.1).

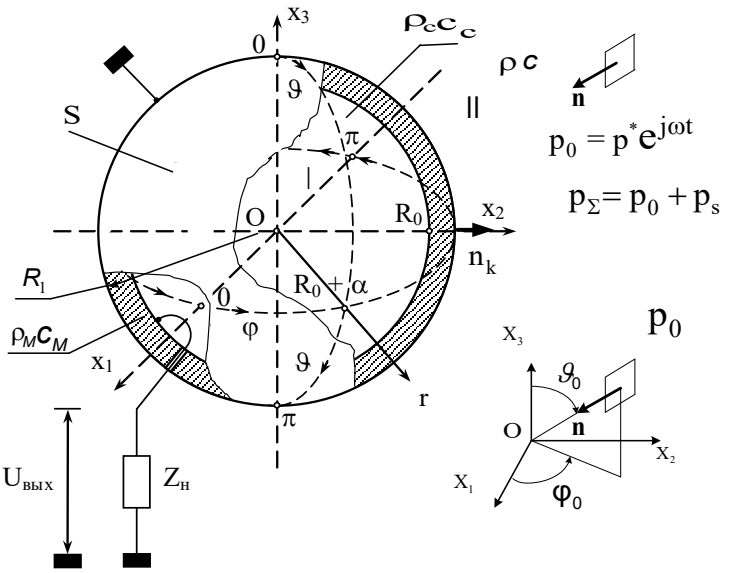


Рис. 3.1 Сферичний п’єзокерамічний перетворювач

В задачі використовується :

- загальна прямокутна система координат O, X_1, X_2, X_3, яка розташована таким чином, що вісі OX_1, OX_2 лежать в одній площині широтного перетину перетворювача, а вісь OX_3 - в площині його меридіонального перетину;
- сферична систему координат O, r, φ, ϑ, центр якої співпадає з центром координат прямокутної системи.

На зовнішню і внутрішню поверхні перетворювача нанесено суцільні електроди, які повністю їх покривають. Електроди підключені до довільного електричного опору Z_n. Товщини електродів вважаємо малими та такими, що не впливають на механічні характеристики перетворювача і не вимагають залучення додаткових умов по механічному та електричному полю. Електрична напруга U_n ($U_{\text{вих}}$), що виникає на навантаженні Z_n , і є шуканою величиною.

На сферичний перетворювач з безкінечності в напрямку вектора n (який в свою чергу позиціонований кутами ϑ_0, φ_0), падає плоска звукова хвиля p_0 амплітудою p_0^*:

$$p_0 = p_0^* \cdot e^{j\omega t} \quad , \qquad j = -i \tag{3.1}$$

в результаті чого утворюється розсіяне зовнішнє $p_s(r,\varphi,\theta)$ та проникле внутрішнє поле $p_I(r,\varphi,\theta)$

Математично (аналогічно до РОЗДІЛУ 2, п. 2.1, п. 2.2) робота вказаної коливальної системи описується відповідно до джерел [1, 8, 9, 28], а саме:

- рівнянь стану для п'єзокераміки [9, 28] які лінійно пов`язують між собою компоненти механічних напружень σ, деформації ε, електричну напруженість E та індукцію D;
- рівнянь руху тонкої оболонки із залученням співвідношень Коші, що пов`язують компоненти тензору деформацій ε та вектору переміщення u;
- рівнянь вимушеної електростатики [9, 28].

Сумісне розв'язання вказаних рівнянь дозволяє визначити характеристики перетворювача з врахуванням взаємозв'язку трьох полів: електричного, механічного та акустичного. Розв'язок здійснюється за допомогою методу часткових областей [56, 63, 64] із залученням методу Фур`є та властивостей

ортогональності приєднаних функцій Лежандра та тригонометричних функцій на інтервалах $\vartheta\epsilon[0;\pi]$, $\varphi\epsilon[0;2\pi]$.

Основні положення методу розв'язанння задачі описані в Розділі 2 відповідають методам Фур`є та методу часткових областей з визначенням в просторі існування звукового поля канонічних областей так, щоби у кожній такій утвореній області поле задовольняло рівнянню Гельмгольца

$$\Delta p + k^2 p = 0, \qquad k = \frac{\omega}{c} \text{ - хвильове число}$$

Пропонується розбити робочий простір на області I та II (рис. 3.1) так, щоби область I при $0 \le r \le R_1 - h_{os}$, $R_0 = R_1 - h_{os}$; $\varphi\epsilon[0;2\pi]$, $\vartheta\epsilon[0;\pm\pi]$) відповідала замкненому простору внутрішнього об'єму перетворювача, а область II ($R_1 \le r \le \infty$, $\varphi\epsilon[0;2\pi]$, $\vartheta\epsilon[0;\pm\pi]$) — зовнішньому простору.

Поле в області I утворено хвилею, що проникла $p_I(r,\varphi,\theta)$, а поле в області II - суперпозицією плоскої $p^0(r,\varphi,\theta)$ і розсіяної $p_s(r,\varphi,\theta)$ хвиль:

$$p_{II}(r,\varphi,\theta) = p^0(r,\varphi,\theta) + p_s(r,\varphi,\theta)$$

Таким чином, розв`язок задачі зводиться до пошуку невідомих коефіцієнтів розкладень для акустичних, механічних та електричних полів системи "зовнішнє робоче середовище — сферична оболонка — внутрішній об'єм, що заповнений акустичним середовищем", як і наслідків впливу зовнішнього акустичного навантаження $p_{II}(r,\varphi,\theta)$.

3.1.2. Граничні умови та умови спряження

Акусто - механічні умови

Відповідно до постановок [8, 28, 56, 64] акусто-механічні умови визначаються для меж областей I та II у вигляді умов спряження силового та кінематичного типу як систему функціональних рівнянь:

$$\begin{cases} p_I - p_{II} = \sigma_{rr}; \\ \qquad r = R_1,\ r = R_0; \varphi \in [0;2\pi],\ \vartheta \in [0;\pi] \\ v_{rI} = v_{r\,II}; \end{cases} \qquad (3.1)$$

$$v_{rI}\big|_{r=R_0} = v_{rII}\big|_{r=R_1} \Rightarrow \frac{1}{j\rho_c c_c}\frac{\partial p_I}{\partial(k_c r)}\bigg|_{r=R_0} = \frac{1}{j\rho c}\frac{\partial p_{II}}{\partial(kr)}\bigg|_{r=R_1} \tag{3.2}$$

де v_{rI}, v_{rII} – радіальні складові коливальних швидкостей точок внутрішньої та зовнішньої поверхонь оболонки , що вважаються рівними;

$\sigma_{rr} = \sigma_{kj}$ – радіальна складова тензору результуючих механічних напружень, що виникають в п'єзо-матеріалі оболонки під час її деформації;

$$v_{rII}\big|_{r=R_1} = v_{r0}\big|_{r=R_1} \Rightarrow \frac{1}{j\rho c}\frac{\partial p_{II}}{\partial(kr)}\bigg|_{r=R_1} = v_{r0}\big|_{r=R_1} \quad \text{, де} \tag{3.3}$$

v_{r0} – радіальні складові коливальних швидкостей часток середовища $v_{rII}\big|_{r=R_1} = v_{r0}\big|_{r=R_1}$.

До того ж, в розвиток умови, що визначається першим рівнянням системи функціональних рівнянь (3.1), при контакті п'єзокерамічної оболонки з рідиною малої динамічної в'язкості, доречним є використання третього закону Н'ютона у вигляді наступної рівності:

$$n_k\left(\sigma_{kj} - \delta_{kj}\Delta p\right) = 0\,,\ \forall\ \ x_k \in S\,, \tag{3.4}$$

де n_k – k-й компонент вектору зовнішньої нормалі до поверхні перетворювача s (рис. 3.1);

δ_{kj} – символ Кронекера для індексів k, j;

$\Delta p = p_I(r,\varphi,\vartheta) - p_{II}(r,\varphi,\vartheta)$ - збитковий тиск, який приведено до поверхні оболонки $r = R_1$ або $r = R_0$;

$x_k \in S$ - умова належності просторової координати – середовищу оболонки.

Залучаючи до умов спряження переміщення $u_r, u_\varphi, u_\vartheta$ можна записати:

$$v_{rII}\big|_{r=R_1} = v_r\big|_{r=R_1} = j\omega u_r,\ \ r \in [R_0, R_1], \tag{3.5}$$

де v_r – радіальна складова коливальної швидкості матеріальних часток поверхні оболонки;

u_r – радіальна складова переміщень матеріальних часток поверхні оболонки.

Електричні умови

Використовуючи положення робіт [8, 28], вважаємо, що товщина оболонки є набагато меншою за радіальні розміри $h_0 << R_0, R_1$. Отже, електрична поляризація деформованої п'єзокерамічної оболонки повністю визначатиметься радіальним компонентом вектору електричної індукції $D_m \to D_r$. При цьому електричний заряд Q, який формується на електродованих поверхнях вільними носіями електричного струму в результаті впливу на них поляризаційних зарядів деформованого п'єзокерамічного елементу, з врахуванням [2, 8, 28] представимо у вигляді:

$$Q = -\int_S D_r dS = -R_0^2 \int_0^{2\pi}\int_0^{\pi} D_r(\varphi, \vartheta)\sin\vartheta d\vartheta d\varphi, \tag{3.6}$$

де $D_r(\varphi, \vartheta)$ відповідає рівнянню:

$$D_r = e_{11}\varepsilon_{rr} + e_{12}\left(\varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{\vartheta\vartheta}\right) + \chi_{11}^{\varepsilon} E_r \tag{3.7}$$

де S - площа електроду, $dS = R_0^2 \sin\vartheta d\vartheta d\varphi$.

Струм I_n кола навантаження (тобто, струм через навантаження електроду Z_n) представимо як швидкість змінення заряду Q, що визначатиметься похідною за часом:

$$I_n = \frac{\partial Q}{\partial t} = j\omega Q = -j\omega\int_S D_r dS = -j\omega R_0^2 \int_0^{2\pi}\int_0^{\pi} D_r(\varphi, \vartheta)\sin\vartheta d\vartheta d\varphi = -j\omega R_0^2 \cdot I, \tag{3.8}$$

$$I = \int_0^{2\pi}\int_0^{\pi} D_r(\varphi, \vartheta)\sin\vartheta d\vartheta d\varphi = \int_0^{2\pi} \cos(m\varphi) d\varphi \int_0^{\pi} D_r^{vm}(\varphi, \vartheta) P_v^m(\cos\vartheta)\sin\vartheta d\vartheta \quad .$$

Застосовуючи [28] переходимо до форми:

$$I = 4\pi D_r^0. \tag{3.9}$$

Отже, струм визначатиметься за виразом: $I_n = -j\omega 4\pi R_0^2 D_r^0$, де D_r^o відповідає центрально симетричній складовій виразу:

$$D_r^0 = e_{11}\varepsilon_{rr}^0 + e_{12}\left(\varepsilon_{\varphi\varphi}^0 + \varepsilon_{\vartheta\vartheta}^0\right) + \chi_{11}^{\varepsilon} E_r^0 . \qquad (3.10)$$

Використовуючи граничні умови виду [8, 9]: $\mathrm{div}D = \mathrm{div}D_r = \mathrm{div}D_r^0 = 0$, та $E_r = E_r^0 = -\dfrac{\partial\Psi}{\partial x_k}$ - маємо можливість дістати Ψ - скалярний електричний потенціал і, відповідно, електричну напругу U_n на електродах оболонки через відповідну різницю потенціалів.

Зазначимо, що визначення E_r^0 відповідає умові відсутності вільних зарядів в п'єзокераміці. Таким чином, для вектору D_r^0 , використавши форму запису оператора div в сферичних координатах, матимемо:

$$\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2 D_r^0\right) = 0, \quad \text{та} \quad D_r^0 = \frac{C_1}{r^2} , \qquad (3.10)$$

де C_1 - константа, що підлягає визначенню.

3.2. Розв`язок наскрізної задачі прийому електропружною сферою

У відповідності до робіт [1-4, 8] в частині подання акустичного поля в часткових областях I, II в результаті падіння плоскої хвилі на поверхню сфери з'являється розсіяна і проникла хвиля. Повне поле має задовольняти граничним умовам на поверхні сфери: рівність тисків і нормальних складових швидкості частинок на поверхнях перетворювача, що подані рівностями (3.1) – (3.3). Зауважимо, що розкладення для тисків можно подати у вигляді алгебраїчної суми центрально симетричної сферичної гармоніки, сукупності тессеральних гармонік нульового порядку (або вісесиметричний розв`язок) та тессеральних гармонік вищого порядку (або невісесиметричний розв'язок), які наведено у відповідних квадратних дужках наступних розкладень:

$$p_{II}(r,\varphi,\vartheta) = \left[p_0^* \sqrt{\frac{\pi}{2kr}}\, J_{1/2}(kr) + A_0 \sqrt{\frac{\pi}{2kr}}\, H_{1/2}^{(2)}(kr) \right] +$$
$$+ \left[p_0^* \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) j^n \sqrt{\frac{\pi}{2kr}}\, J_{n+1/2}(kr) P_n(\cos\vartheta_0) P_n(\cos\vartheta) + \right.$$
$$\left. + \sqrt{\frac{\pi}{2kr}} \sum_{n=1}^{\infty} A_n\, H_{n+1/2}^{(2)}(kr) P_n(\cos\vartheta) \right] +$$
$$+ \left[p_0^* \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{n} (2n+1) j^n \frac{(n-m)!}{(n+m)!} \sqrt{\frac{\pi}{2kr}}\, J_{n+1/2}(kr) \times \right.$$
$$\times P_n^m(\cos\vartheta_0) P_n^m(\cos\vartheta) \cos(m(\varphi - \varphi_0)) +$$
$$\left. + \sqrt{\frac{\pi}{2kr}} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{n} A_{nm}\, H_{n+1/2}^{(2)}(kr) P_n^m(\cos\vartheta) \cos(m\varphi) \right], \tag{3.11}$$

$$p_I(r,\varphi,\vartheta) = \left[B_0 \sqrt{\frac{\pi}{2kr}}\, J_{1/2}(k_c r) \right] + \left[\sqrt{\frac{\pi}{2kr}} \sum_{n=1}^{\infty} B_n J_{n+1/2}(k_c r) P_n(\cos\vartheta) \right] +$$
$$+ \left[\sqrt{\frac{\pi}{2kr}} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{n} B_{nm}\, J_{n+1/2}(k_c r) P_n^m(\cos\vartheta) \cos(m\varphi) \right], \tag{3.12}$$

де $A_0, B_0, A_{nm}, B_{nm}, \tilde{C}_{nm}$ – невідомі коефіцієнти розкладень (3.11), (3.12),

$J_{1/2}(kr)$, $H_{1/2}^{(2)}(kr)$ – функції Бесселя і Ханкеля нецілого характеру;

$\iota_n(kr)$ – сферична функція Бесселя цілого -го порядку, $n = 0,1,2,3, ...$;

$h_n^{(2)}(kr)$ – сферична функція Ханкеля другого роду n - го порядку;

$P_n^m(...)$ – приєднана функція Лежандра першого роду ступеня n та порядку $m, n = 0,1,2,3, ...$

Під впливом збиткового тиску, який представлено умовою (3.4), оболонка деформується, що відповідає певним переміщеннями матеріальних точок оболонки та виникненням за законом Гука відповідних механічних напружень:

$$\varepsilon_{\lambda\beta}(\varphi,\vartheta) = \varepsilon_{\lambda\beta}^0 + \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon_{\lambda\beta}^n P_n(\cos\vartheta) + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{n} \varepsilon_{\lambda\beta}^{nm} P_n^m(\cos\vartheta) \cos(m\varphi), \tag{3.13}$$

що по аналогії до (3.11), (3.12) представляє алгебраїчну суму центрально

симетричних, вісесиметричних та невісесиметричних розв'язків задачі.

Розуміючи це, рівняння коливань оболонки визначатимемо, виходячи з загальних умов руху, що наведені в роботах [2, 5, 6, 8, 28].

Для цього застосуємо вирази для розрахунку компонентів тензору результуючих механічних напружень в п'єзокераміці:

$$\begin{aligned}
\sigma_{rr} &= c_{11}^{E}\varepsilon_{rr} + c_{12}^{E}\varepsilon_{\varphi\varphi} + c_{12}^{E}\varepsilon_{\vartheta\vartheta} - e_{11}E_r \\
\sigma_{rr} &= c_{11}^{E}\varepsilon_{rr} + c_{12}^{E}\varepsilon_{\varphi\varphi} + c_{12}^{E}\varepsilon_{\vartheta\vartheta} - e_{11}E_r \\
\sigma_{\varphi\varphi} &= c_{12}^{E}\varepsilon_{rr} + c_{22}^{E}\varepsilon_{\varphi\varphi} + c_{12}^{E}\varepsilon_{\vartheta\vartheta} - e_{12}E_r \\
\sigma_{\varphi\vartheta} &= 2c_{44}^{E}\varepsilon_{\varphi\vartheta}, \quad \begin{array}{l}\sigma_{r\vartheta} = 2c_{55}^{E}\varepsilon_{r\vartheta} - e_{26}E_{\vartheta}, \\ \sigma_{r\varphi} = 2c_{55}^{E}\varepsilon_{r\varphi} - e_{26}E_{\varphi}.\end{array}
\end{aligned} \tag{3.14}$$

де $c_{11}^{E}; c_{12;}^{E} c_{22}^{E}; c_{44}^{E}; c_{55}^{E}$ – компоненти тензору модулів пружності (радіальна вісь сфери співпадає з віссю OX_1);

$\sigma_{\varphi\varphi}; \sigma_{\vartheta\vartheta}; \sigma_{\varphi\vartheta}; \sigma_{r\varphi}; \sigma_{r\vartheta}$ – компоненти тензору результуючих механічних напружень;

$e_{11}; e_{12}; e_{26}$ – п'єзомодулі; $\varepsilon_{rr}; \varepsilon_{\varphi\varphi}; \varepsilon_{\vartheta\vartheta}; \varepsilon_{r\varphi}; \varepsilon_{r\vartheta}; \varepsilon_{\varphi\vartheta}$ - компоненти тензору деформацій;

$E_r, E_{\varphi}; E_{\vartheta}$ – компоненти вектору напруженості електричного поля в п'єзокераміці і визначимо рівняння стану для компонентів вектору електричної індукції, за формою:

$$D_m = e_{mij}\varepsilon_{ij} + \chi_{mn}^{\varepsilon} E_n \tag{3.15}$$

де D_m – m-компонентний вектор електричної індукції, який визначається алгебраїчною сумою "електричної поляризації" $D_m^d = e_{mij}\varepsilon_{ij}$, (що обумовлено пружними механічними деформаціями ε_{ij} – тобто, це є динамічною складовою) та "кулонівської" складової $D_m^s = \chi_{mn}^{\varepsilon} E_n$, яка обумовлена попередньою поляризацією кераміки (це є статична складова); χ_{mn}^{ε} – компоненти тензору діелектричної проникності.

Далі, спираючись на [8] та реалізуючи умову відповідності коливань перетворювача другому закону Н'ютона в диференційній формі, рівняння руху

сфери відносно механічних напружень σ_{kj} та зміщень матеріальних часток оболонки $u_r, u_\varphi, u_\vartheta$ будуть :

$$\frac{1}{R_0}\left(2\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi} - \sigma_{\vartheta\vartheta}\right) + \rho_M \omega^2 u_r = 0,$$

$$\frac{1}{R_0 \sin\vartheta}\frac{\partial\sigma_{\varphi\varphi}}{\partial\varphi} + \frac{1}{R_0}\frac{\partial\sigma_{\varphi\vartheta}}{\partial\vartheta} + \frac{2\sigma_{\varphi\vartheta}}{R_0}\operatorname{ctg}\vartheta + \rho_M \omega^2 u_\varphi = 0, \qquad (3.16)$$

$$\frac{1}{R_0 \sin\vartheta}\frac{\partial\sigma_{\varphi\vartheta}}{\partial\varphi} + \frac{1}{R_0}\frac{\partial\sigma_{\vartheta\vartheta}}{\partial\vartheta} + \frac{1}{R_0}\left(\sigma_{\vartheta\vartheta} - \sigma_{\varphi\varphi}\right)\operatorname{ctg}\vartheta + \rho_M \omega^2 u_\vartheta = 0 \ ,$$

Де u_φ, u_ϑ - кутові компоненти вектору зміщень матеріальних часток деформованої сферичної оболонки.

Виходячи з рівнянь п'єзоефекту (3.14), (3.15), які доповнені компонентами вектору $D_m(D_r, D_\varphi, D_\vartheta)$ у вигляді:

$$D_r = e_{11}\varepsilon_{rr} + e_{12}\left(\varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{\vartheta\vartheta}\right) + \chi_{11}^{\varepsilon} E_r,$$

$$D_\varphi = 2e_{26}\varepsilon_{r\varphi} + \chi_{22}^{\varepsilon} E_\varphi \qquad (3.17)$$

$$D_\vartheta = 2e_{26}\varepsilon_{r\vartheta} + \chi_{22}^{\varepsilon} E_\vartheta,$$

та враховуючи суцільне електродування поверхонь перетворювача $D_\varphi = D_\vartheta = 0$ і співвідношення Коши для зміщень і деформацій [8, 28]:

$$u_\varphi = \frac{1}{\sin\vartheta}\frac{\partial u_r}{\partial\varphi}, \qquad u_\vartheta = \frac{\partial u_r}{\partial\vartheta}$$

$$\varepsilon_{\varphi\varphi} = \frac{1}{R_0}\frac{1}{\sin\vartheta}\frac{\partial u_\varphi}{\partial\varphi} + \frac{u_\vartheta}{R_0}\operatorname{ctg}\vartheta + \frac{u_r}{R_0} \qquad (3.18)$$

$$\varepsilon_{\vartheta\vartheta} = \frac{1}{R_0}\frac{\partial u_\vartheta}{\partial\vartheta} + \frac{u_r}{R_0} \ ,$$

після ряду взаємних перетворень (3.14)-(3.18) (див. [28]) для компоненти зміщень u_r отримуємо в спрощеній формі:

$$\alpha_\nu u_r + \frac{c_{11}^{**}}{R_0}\Delta p - \frac{e_{11}^{**}}{R_0}E_r = 0, \quad \text{де } \alpha_\nu = \frac{c_{12}^{**}}{R_0^2}\left(2 - \nu(\nu+1)\right) + \rho_M \omega^2 \qquad (3.19)$$

Зазначимо, що , що компоненту u_r можна представити рядом:

$$u_r = u_r(r,\varphi,\vartheta) = \sum_{\nu=0}^{\infty}\sum_{m=0}^{\nu} u_r^{nm}(r)P_\nu^m(\cos\vartheta)\cos(m\varphi) = \sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=0}^{n} u_r^{nm} f_n^m\left(\varphi,\vartheta\right),\ r = R_1$$

Визначимося з електричним полем. Для знаходження електричних характеристик: струму в колі зовнішнього навантаження I, електричної індукції D, та напруженості E_r необхідно визначити центрально симетричні компоненти розглянутих фізичних полів, а саме:

$$\sigma_{\vartheta\vartheta}^0, \sigma_{\varphi\varphi}^0, \varepsilon_{rr}^0, \varepsilon_{\varphi\varphi}^0, \varepsilon_{\vartheta\vartheta}^0, E_r^0, D_r^0, u_r^0, \Delta p^0 .$$

Так, після спрощень співвідношень для деформацій та механічних напружень відповідно до обраного типу електродування поверхонь перетворювача, центрально симетричні компоненти індукції та напруженості можемо представити як:

$$D_r^0 = e_{11}\varepsilon_{rr}^0 + e_{12}\left(\varepsilon_{\varphi\varphi}^0 + \varepsilon_{\vartheta\vartheta}^0\right) + \chi_{11}^{\varepsilon} E_r^0 . \qquad (3.20)$$

$$E_r^0 = \frac{C_1}{\chi_{11}^* r^2} + \frac{2e_{12}^*}{\chi_{11}^* R_0} u_r^0 - \frac{e_{11}}{\chi_{11}^* c_{11}^E}\Delta p^0 .$$

Застосування граничних умов по електричному полю (п.2) для центрально симетричного розв’язку виду

$$\mathrm{div}D = \mathrm{div}D_r = \mathrm{div}D_r^0 = 0 \ \text{ та } \ E_r^0 = -\frac{\partial\Psi^0}{\partial r}, \qquad (3.21)$$

Ψ^0 - потенціал центрально симетричного електричного поля; після інтегрування лівої та правої частини рівняння (3.21) по радіальній координаті для потенціалу отримаємо:

$$\Psi^0 = \frac{C_1}{\chi_{11}^* r} + C_2 + \left(\frac{e_{11}}{\chi_{11}^* c_{11}^E}\Delta p^0 - \frac{2e_{12}^*}{\chi_{11}^* R_0} u_r^0\right)(r - R_0) \qquad (3.22)$$

де C_2 – константа, що підлягає визначенню.

Вважаючи потенціал зовнішнього електроду нульовим, різниця потенціалів “зовнішній електрод - внутрішній електрод” становитиме:

$$\Psi^0\Big|_{r=R_0+h_0} = 0; \qquad (3.23)$$

$$\Psi^0\Big|_{r=R_0} - \Psi^0\Big|_{r=R_1} = U_n = j\omega Z_n 4\pi r^2 D_r^0\Big|_{r=R_0} = j\omega Z_n 4\pi R_0^2 D_r^0 = j\omega Z_n 4\pi C_1 \qquad (3.24)$$

де $U_n = I_n Z_n$; де, а $Z_n = R_n + jX_n$.

Таким чином, в результаті загального розв'язку задачі для вказаних граничних умов та типу електродування маємо п'ять невідомих коефіцієнтів $u_0^R, A_0, B_0, C_1, C_2.$, знаходження яких потребує п'яти алгебраїчних рівнянь. А саме:

- двох рівнянь, що витікають з силових і кінематичних умов спряження (3.11), (3.12) із залученням розкладень (2.11) і (2.12);
- двох рівнянь – (3.13), (3.14), що з використанням (3.22) дозволяють знайти коефіцієнти C_1, C_2 для відомого Z_n.

Останнє, п'яте рівняння для відшукання коефіцієнту u_r^0 витікає з (3.19), записаного для центрально симетричного розв'язку при $\nu = 0$, що дасть:

$$\alpha_0 u_r^0 + \frac{c_{11}^{**}}{R_0}\Delta p^0 - \frac{e_{11}^{**}}{R_0} E_r^0 = 0, \quad \text{де } \alpha_0 = \frac{2c_{12}^{**}}{R_0^2} + \rho_м \omega^2. \qquad (3.25)$$

Таким чином, отримано систему з п`яти алгебраїчних рівнянь, кількість яких відповідає кількості невідомих коефіцієнтів розкладень та рівнянь для електричного поля, що забезпечує можливість їх однозначного знаходження.

3.3. Результати розрахунків

Розрахунки проводилися для п`єзокерамічного сферичного перетворювача, виконаного з п`єзоматеріалу ЦТС-19 діаметром 135 мм та товщино стінки 5 мм.

В якості наповнювача внутрішнього об'єму сфери обирались повітря, гелій та вода.

3.3.1. Залежність напруги на навантаження від частоти для вакуумованого перетворювача

Математично різниця потенціалів на виході сферичного п'єзокерамічного перетворювача акустичних хвиль визначається співвідношенням:

$$U_{вых} = f_e(\omega)\frac{2\alpha}{\chi_{33}^{\sigma}}\left\{e_{31}^{*}\left[\varepsilon_{\vartheta\vartheta}^{(0,0)} + \varepsilon_{\varphi\varphi}^{(0,0)}\right] - \frac{e_{33}}{c_{33}^{E}}\Delta P^{(0,0)}\right\}$$

де $f_e(\omega) = i\omega C_0^{\sigma} Z_н / \left(1 + i\omega C_0^{\sigma} Z_н\right)$ – функція включення п'єзокерамічного приймача акустичних хвиль. Зауважимо, що, електрично, перетворювач демонструє лише нульову моду завдяки обраного типу електродування. Проте, амплітуда електричної напруги з електричного боку залежатиме від характеру повного поля (падаюче та розсіяне), а також від степені узгодження опорів перетворювача та навантаження.

3.3.2. АЧХ перетворювача із заповненням гелієм

Розрахункові АЧХ електричної напруги (різниці потенціалів) на виході перетворювача з внутрішнім заповненням гелієм для навантажень в діапазоні від $Z_n = 100$ Ом до $Z_n = 1$ МОм наведено на рис. 3.2 – рис. 3.4.

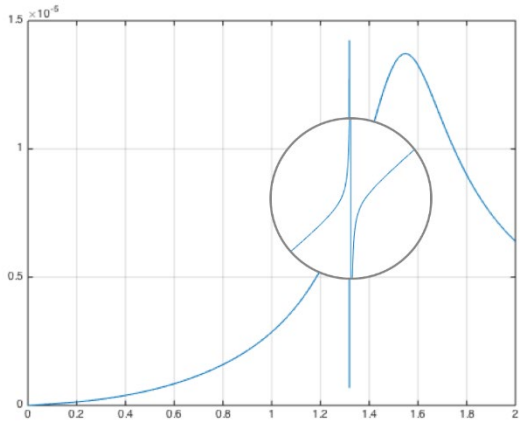


Рис. 3.2. АЧХ вихідної напруги $U_{вих}$ при навантаженні $Z_n = 100$ Ом

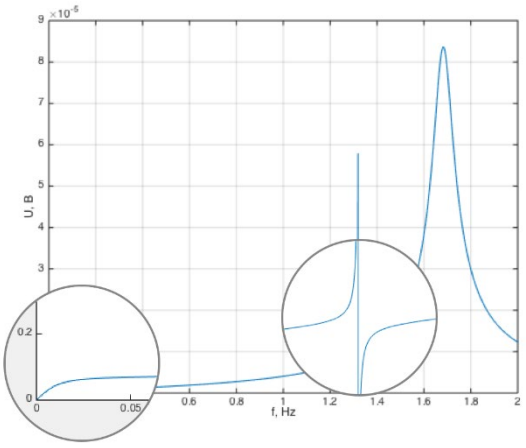


Рис. 3.3. АЧХ вихідної напруги $U_{\text{вих}}$ при навантаженні $Z_n = 10$ кОм

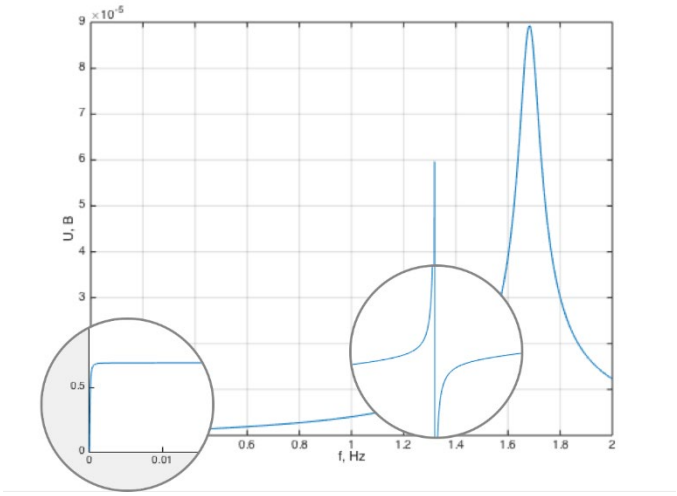


Рис. 3.4. АЧХ вихідної напруги $U_{\text{вих}}$ при навантаженні $Z_n = 1$ МОм

З розрахункових матеріалів рис.3.2 - рис. 3.4. видно, що оскільки гелій за характеристиками досить близький до повітря, їх АЧХ є схожими (дивись криву рис. 3.2.). Резонансна область, що супроводжується антирезонансом практично співпадають за частотою, а локальний екстремум АЧХ в області низьких частот виражений так само слабко, як і у випадку заповнення перетворювача повітрям.

3.3.3. АЧХ перетворювача із заповненням рідиною

Нижче (рис. 3.5 - рис.3.7) наведено АЧХ різниці потенціалів на виході перетворювача, що заповнений водою, для різних електричних навантажень в діапазоні від $Z_n = 100$ Ом до $Z_n = 1$ МОм.

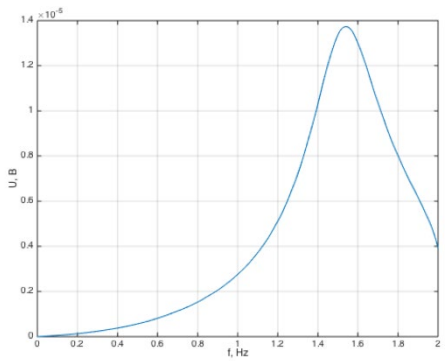


Рис. 3.5. АЧХ вихідної напруги $U_{\text{вих}}$ $Z_n = 100$ Ом та заповненні перетворювача водою

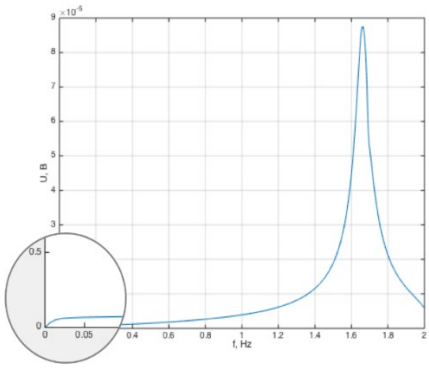


Рис. 3.6. АЧХ вихідної напруги $U_{\text{вих}}$ при навантаженні $Z_n = 10$ кОм та заповненні перетворювача водою

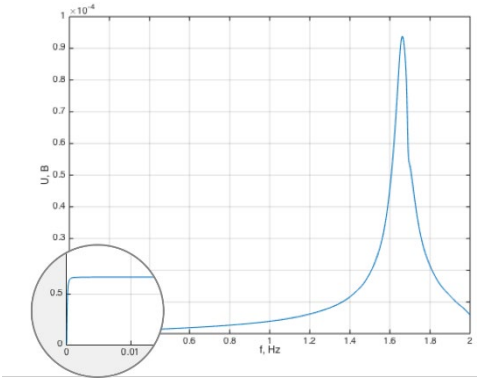
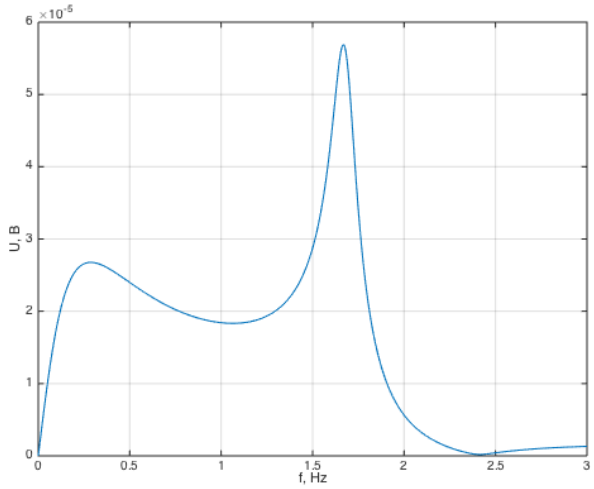


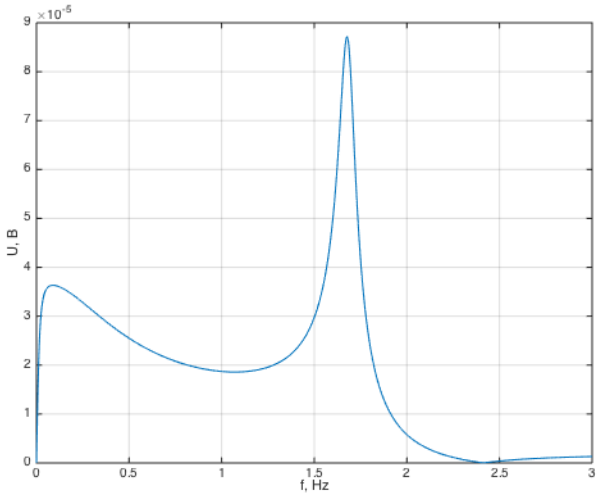
Рис. 3.7. АЧХ вихідної напруги $U_{\text{вих}}$ при навантаженні $Z_n = 1$ МОм та заповненні перетворювача водою

Результати демонструють особливість протидії заповнення зовнішньому середовищу. Тобто, вода всередині протидіє деформації п’єзоелектрика і компенсує зовнішній (статичний) тиск. При цьому бачимо, що резонанс більше не супроводжується антирезонансом, як у випадку заповнення повітрям чи гелієм.

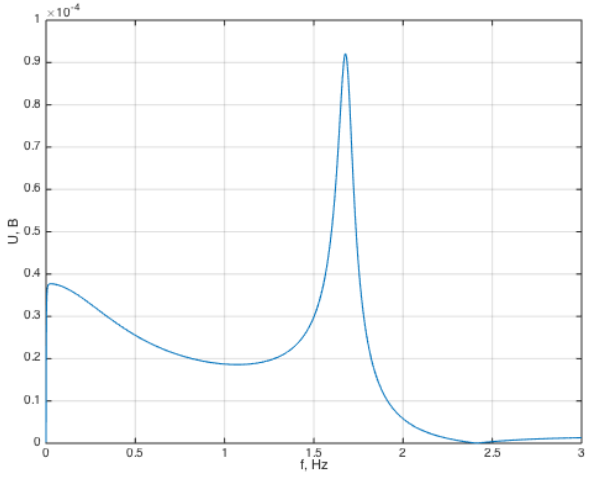
Локальний екстремум в діапазоні низьких частот виражений слабше, а абсолютне значення чутливості різко падає. З метою підтвердження теоретичних результатів, в лабораторних умовах була виміряна АЧХ при роботі перетворювача на навантаження 100 кОм.



а



б



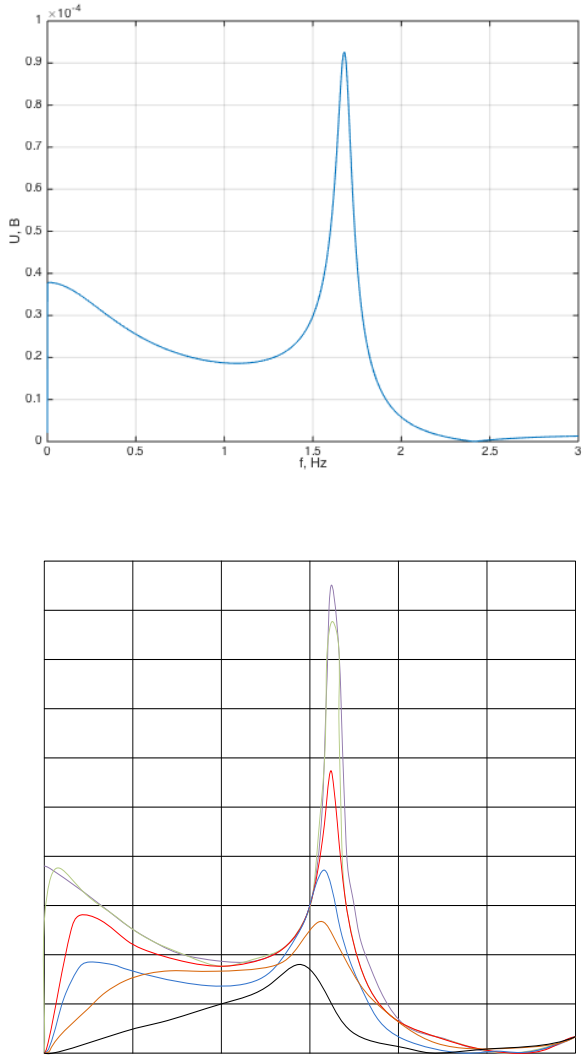


Рис 3.8. (АЧХ) різниці електричних потенціалів на виході перетворювача (діапазон опорів від $Z_n = 100$ Ом до $Z_n = 1$ МОм)

Результати демонструють особливість протидії заповнення зовнішньому середовищу. Тобто, вода всередині протидіє деформації п’єзоелектрика і компенсує зовнішній (статичний) тиск. При цьому бачимо, що резонанс більше не супроводжується антирезонансом, як у випадку заповнення повітрям чи гелієм.

Локальний екстремум в діапазоні низьких частот виражений слабше, а абсолютне значення чутливості різко падає. Як видно, що при збільшенні електричного навантаження, з’являється локальний екстремум АЧХ в області низьких частот [0 Гц; 0.5 Гц]. По мірі збільшення імпедансу екстремум стає більш пологим та гострим, а його пік наближається до осі ординат. Чутливість по полю

при цьому в області низьких частот вочевидь має зростати.

Подібний результат підтверджується даними, отриманими в роботах [75-77]. В режимі короткого замикання $Z_n \to 0$ функція включення $f_e(\omega) = 0$ та $U_{вых} = 0$. В режимі холостого ходу, коли $Z_n \to \infty$, при яких завгодно малих частотах, функція включення $f_e(\omega) = 1$. В цьому режимі функція являє собою функцію Хевісайда. Звідси випливає підтвердження тому, що п'єзокерамічний приймач акустичних хвиль не здатний реєструвати статичний тиск.

Вихідний електричний сигнал досліджуваного сферичного прийомного перетворювача з повністю електродованою поверхнею визначається центрально-симетричною складовою напружено-деформованого стану п'єзокерамічної оболонки.

Пунктирна крива є експериментальною. Як видно із співставлення розрахункових матеріалів з експериментальними – спостерігається певне співпадіння.

Результати демонструють особливість протидії заповнення зовнішньому середовищу. Тобто, вода всередині протидіє деформації п'єзоелектрика і компенсує зовнішній (статичний) тиск. При цьому бачимо, що резонанс більше не супроводжується антирезонансом, як у випадку заповнення повітрям чи гелієм.

Локальний екстремум в діапазоні низьких [0 Гц; 0.05 Гц] частот виражений слабше, а абсолютне значення чутливості різко падає.

Висновки до розділу 3

В результаті розв'язку «наскрізної» задачі прийому звуку електропружним сферичним перетворювачем з внутрішнім заповненням встановлено, показано, що:

- коливальна система "сфера-заповнювач" характеризується наявністю основного резонансу нульової моди та додаткового, положення якого залежить від електричного навантаження та характеристик заповнювача;
- виникнення додаткового резонансу обумовлено пружністю акустичного заповнювача. Зменшення пружності (збільшення інерційності) призводить до суттєвого зменшення амплітуди додаткового резонансу, зсув його по частотній

області аж до повного виключення цього резонансу;

- використання в якості наповнювача рідини виключає пружність наповнювача як таку в заданих умовах роботи. АЧХ перетворювача не містить низькочастотних резонансів, пов’язаних з інерційно-пружними властивостями системи «перетворювач-заповнювач»;
- характер АЧХ напруги на виході перетворювача показує, що у випадку використання будь-якого заповнювача п’єзокерамічний приймач акустичних хвиль не здатний реєструвати статичний тиск.

При цьому показано, що наявність заповнювача ускладнює узгодження опору перетворювача з вхідним опором прийомного тракту та призводить до зменшення ширини його робочої смуги.

РОЗДІЛ 4
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для перевірки відповідності отриманих теоретичних результатів і зроблених припущень, зроблених в сформульованих математичних і фізичних моделях задач прийому та випромінювання звуку електропружними перетворювачами сферичного типу, окремо виконано експериментальні дослідження. При цьому очікувані результати запропонованої методики мають відповідати отриманим даним гідроакустичних вимірювань з традиційною для гідроакустичних вимірювань точністю (не гірше 3 дБ).

Зрозуміло, що подані аналізу рішення наскрізних задач отримані як з використанням класичних методів гідроакустичних вимірювань, так і з розв`язання задач математичної фізики, а саме - методу Фур`є та основ методу часткових областей. Додамо, що використані для вимірювань методи бути реалізовані як у вільному полі, так і в умовах басейнів або в камер та трубах [78-80].

Таким чином, співставлення відповідності теоретичних і експериментальних даних, надає можливість використання вказаних моделей в ситуації, що наближена до реальних умов роботи перетворювача.

В ситуаціях роботи в режимі випромінювання та режиму прийому проведено експериментальні дослідження щодо вимірювань АЧХ електропружних прийомо-випромінючих сферичних перетворювачів з різними наповнювачами робочого об’єму, який працює у вільному полі. Окремим випадком визначення АЧХ (для режиму прийому) – є частотна характеристика чутливості $\beta(f)$.

При цьому, параметром, що вимірюється в режимі прийому є частотна залежність модуля повного електричного опору $|Z_z|$ перетворювача певного електродування. Перетворювач розміщено в рідині. Іншими словами, вимірювання частотної залежності $|Z_z|$ проводяться для з`ясування характеру змінення електричної напруги на електродах певного розкриву (наприклад, з кутами $\gamma_e = 2\pi$ і $\gamma_e = \pi$). Зазначимо, що вимірювання частотних залежностей $|Z_z|$ віднесено до

області амплітудно-фазових вимірювань та передбачає визначення різниці фаз φ між струмом і напругою шляхом вимірювання величини фазового кута φ_1 між напругою на виході опорного сигналу генератора (OS) і напругою на баластному активному опорі R_0 [78-80] (рис 4.1)

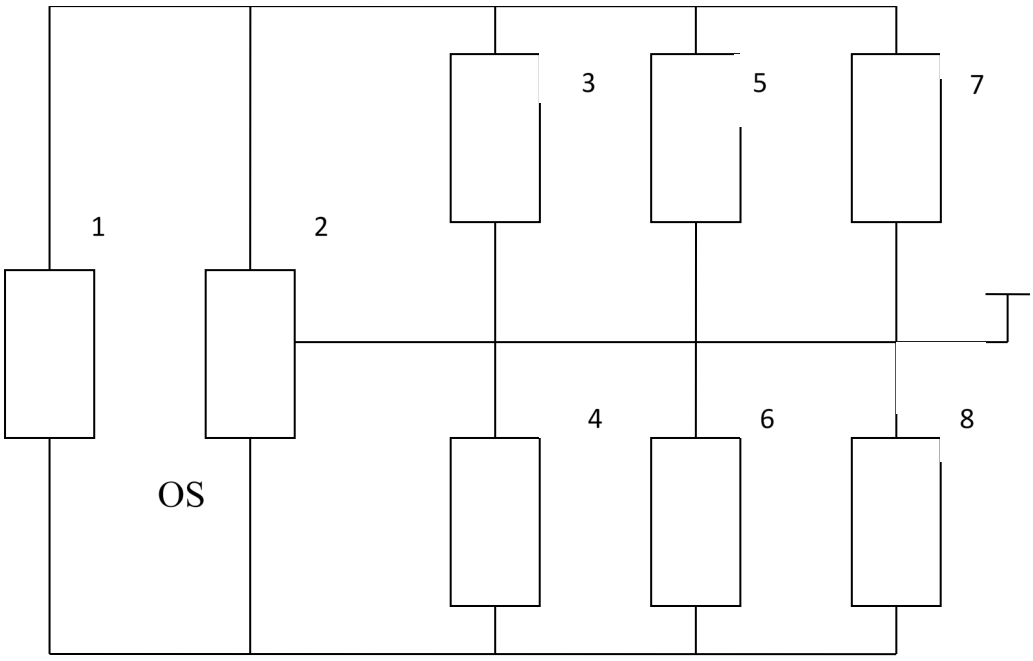


Рис 4.1. Структурна електрична схема вимірювання модуля повного електричного опору $|Z_z|$

1 – генератор, 2 – фазометр, 3 – частотомір, осцилограф, 5, 6 – вольтметри, 7 – баластний резистор, 8 – досліджуваний зразок - перетворювач.

І лише вимірювання чутливості відбувається для амплітудних значень $\beta(f)$. В якості досліджуваного перетворювача обрано сферичний перетворювач КЦ 3.837 діаметром 100 мм, з горлом та повним електродуванням зовнішньої та внутрішньої поверхонь. Перетворювач виготовлено з матеріалу ЦТС–19 та поляризовано в радіальному напрямку (поперечно до стінки).

Контакти полярностей “ + ” та “ – ” підключено до периферійних пристроїв генератора (режим випромінення) або до підсилювача (режим прийому). Технологічний отвір на сфері не впливає на її електроакустичні характеристики.

Варто додати, що для забезпечення відповідності експериментальних і розрахункових результатів виконуються:

- умова тонкої стінки п’єзокерамічного елементу $h0\ s / r0s \leq 0{,}1$;
- умова малості технологічного отвору.

Вимірювання відбувались у вимірювальному басейні та на вимірювальній базі Київського Науково-Дослідного Інституту Гідроприладів у відповідності до керівних документів типовими методами вимірювань характеристик акустичних матеріалів, які застосовані для виготовлення перетворювачів, а також електроакустичних параметрів, наведено в роботах [78, 80].

4.1. Вимірювання АЧХ пульсуючої сфери

4.1.1. Підготовка перетворювача до вимірювань

Відповідно до постановки задачі, для вимірювань оберемо джерело нульового порядку, що представлено п`єзокерамічною радіально поляризованою сферою. При цьому вимірювання частотних характеристик наслідує такий порядок дій:

- Зовнішнім оглядом встановлюється відсутність пошкоджень п’єзоелемента та елементів електричного монтажу. Цілісність п’єзоелементів встановлюється шляхом вимірювання електричної ємності перетворювача.
- Активна поверхня перетворювача обробляється шляхом протирання етиловим спиртом.
- Перетворювач витримується в воді не менше, ніж 3 години.
- Вимірювання внутрішнього опору постійному струму та опору ізоляції перетворювача, величини яких мають бути не меншими ніж 100 МОм. за допомогою мегомметра.

4.1.2. Вибір вимірювального сигналу і частотних параметрів

Вимірювання проводилися при роботі генератора на гармонійному сигналі фіксованої частоти. При цьому набір частотних параметрів передбачав визначення частотного діапазону Δf_p вимірювань і вибір частотного кроку, виходячі з резонансних областей частотної характеристики.

При цьому частотний діапазон вимірювань Δf_p обирався, виходячи зі значень частот власних форм коливань перетворювача "0", "1" відповідно до співвідношення

$$\Delta f_p = f_{0i} \pm \frac{f_{01}}{2Q}$$

де f_{0i} - частота резонансу і-ї форми коливань; Q – добротність, що визначена в документації на перетворювач.

Розраховані значення частот і-х форм коливань відповідають локальним частотним діапазонам для кожної з розрахованих Δf_p, які для перших двох форм склали:

$$\Delta f_{p0} - \Delta f_{00} \pm 1000 Гц \qquad \Delta f_{p1} - \Delta f_{00} \pm 1500 Гц .$$

Загальний частотний діапазон змінення частоти був визначений як:

$$\Delta f_p = (4000 \pm 30000)\ Гц .$$

Частотний крок в частках на частотах, віддалених від резонансу для даної добротності відповідно до [78, 80] становить – не меншше ніж $0.05\, f_{0i}$. При цьому в середині резонансної області може зменшити, а поза нею - збільшити в 3 рази. Отже, частотний крок – є величина змінна. Відтак, для резонансної області нульової моди крок становить 136 Гц, а поза неї – 1230 Гц.

4.1.3. Визначення основних відомостей про метод вимірювань АЧХ

Метод вимірювань полягає в наступному:

- збудження електричним полем перетворювача при підключенні електродів, а також вимірюванна амплітуда електричної напруги на балластному резисторі і самому перетворювачі проводимо для отримання частотної залежності.

При цьому визначеються резонансні та антірезонансні ділянки обраного за п. 5.2.3. частотного вимірювального діапазону [78].

- вимірювання проводилися відповідно до електричної структурної схеми (Рис. 4.1.). При цьому $|Z_z|$ не має бути більшим ніж 0.05 модуля повного телектричного опору, який виміряно між вихідними клемами генератора з симетричним виходом та його заземленим корпусом для кожної частоти вимірювального діапазону.
- динамічний діапазон та рівні використаних сигналів U_c визначався у відповідності до існуючого рівню оточуючих перешкод акустичної та електричної природи U_n $\frac{U_c}{U_n} \geq 20 дБ$.

Наведена нерівність забезпечена наступним чином – коли на виході – на досліджуваному перетворювачі вимірювалося значення напруги перешкод, на балластному опорі вимірюється напруга перешкод U_n;

На досліджуваному зразку встановлюється напруга, що більша U_n, але не менше ніж на 20 дБ.

Електрична напруга на баластному резисторі 7 U_{R0} контролюється вольтметром 5, а напруга U_z на перетворювачі – вольтметром. Вимірювач частоти 3 та осцилограф 4 контролюють сигнал за частотою та зовнішньому вигляду. Фазометром 1 вимірюємо фазовий кут φ_1 між двома напругами U_z і U_{R0}. Величину балансного резистора R_0 знайдемо з умови :

$$R_0 << \frac{1}{\omega C}$$

де C – статична ємність перетворювача за обраного електродування;

При цьому має виконуватися нерівність

$$\frac{1}{L} \leq \frac{U_R}{U_z} \leq L \ ,$$

де L - відношення напруг на виходах електродів перетворювача, (погрішність фазометру не перебільшує 0.5 град.).

Значення косинуса різниці фаз поміж струмом і напругою визначалося як:

$$cos\varphi = cos(180^o - \varphi_1).$$

де φ- різниці фаз поміж струмом і напругою (град); φ_1- результат вимірювання різниці фаз напруг U_z та U_R з використанням фазометра 7.

При цьому значення модуля повного електричного опору $|Z_z|$, Ом визначається за формулою: $|Z_z| = R_0 \frac{U_z}{U_{R0}}$.

4.1.4 Оцінка похибки результатів вимірювань

Використовуючи положення методу вимірювань (4.1.3), відповідності до схеми вимірювань (Рис. 4.1) - зауважимо, що похибка результату вимірювання частотної залежності модуля повного внутрішнього опору $|Z_z|$ для заданого значення довірчої ймовірності P=0.5 визначалася у відповідності до графічних матеріалів [81] і характеру змінення функції “косинус” різниці фаз між напругою на перетворювачі та струмом, що протікає через нього. При цьому погрішність становила $\delta_0 = \pm 20\%$. Зазначимо також, що визначення верхньої та нижньої границь довірчого інтервалу, розраховувались по [80] і залученням коефіцієнтів Ст`юдента.

Середньоквадратичне значення погрішності розраховувалося по результатам 10 показань шкали вольтметра для кожного значення частоти обраного частотного діапазону.

Результати вимірювань наведено на рис. 4.2, та рис. 4.3.

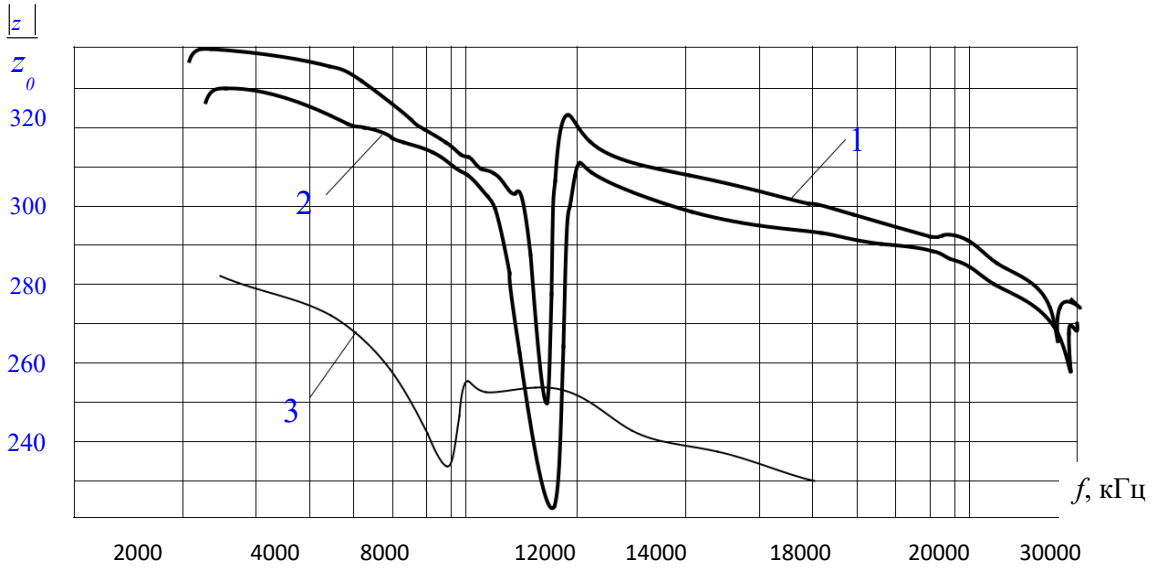


Рис. 4.2 АЧХ сферичного перетворювача для електродів з розкривом $\Delta\gamma = 2\pi$ (позначено 1), з розкривом $\Delta\gamma = \pi$ (позначено 2), з розкривом $\Delta\gamma = 2\pi/3$ (наповнено гліцерином і позначено 3)

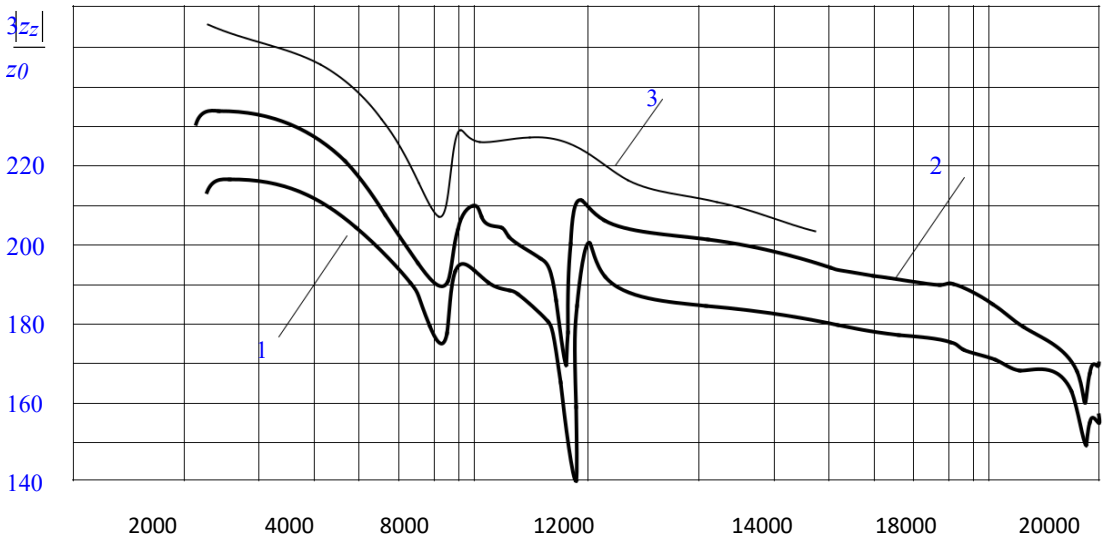


Рис. 4.3 АЧХ сферичного перетворювача для електродів з розкривом $\Delta\gamma = \pi$, (позначено 1), з розкривом $\Delta\gamma = \pi/2$ (позначено 2), з розкривом $\Delta\gamma = \pi/4$, 3 (наповнено гліцерином і позначено 3).

4.2 Вимірювання чутливості прийомника сферичного типу

Вимірювання чутливості перетворювача як функції частоти $\beta(f)$ відбувається в режимі прийому. Значення АЧХ в заданому частотному діапазоні визначатимуться по модулю при реалізації хвильових обставин вільного поля . При цьому бажаним є утворення сферичної хвилі (хвильовий бік) та режиму холостого ходу (електричний бік).

Положимо, що підготовка перетворювача до вимірювань чутливості, вибір вимірювального сигналу і частотних параметрів, основні відомості про метод вимірювань та оцінка погрішності результатів вимірювань (відповідно п. 4.1.1, 4.1.2, 4.1.3, 4.1.4 з п. 4.1) цілком відповідають наведеним в п. 4.1.1, 4.1.4 Отже, лише дії по п. п.. 4.1.2, 4.1.3. потребують коментарів.

4.2.1 Вимірювання чутливості електропружного перетворювача

Вибір вимірювального сигналу і частотних параметрів суттєво відрізняється від попередньої ситуації (вимірювання $|Z_z|$). Це пов'язано з характером збудження акустичного поля в робочому середовищі (басейні), - неперервному для АЧХ по п. 4.1 та імпульсному для $\beta(f)$. На рис. 4.2 наведена структурна схема вимірювання чутливості сферичного перетворювача в басейні. А сама структурна схема реалізує можливість проведення вимірювань модифікованим методом порівняння, який вимагає використання двох перетворювачів - еталонного і досліджуваного.

У відповідності до [80] порядок проведення вмірювань $\beta(f)$ полягає в наступному:

- тракт генерації (генератор 1 разом з підсилювачем потужності та пристроєм формування сигналів 2) задає послідовність імпульсних сигналів, які подаються на випромінювач 4 та випромінюється в робоче середовище. При цьому фіксуємо значення електричних напруг на виходах ланки "еталонний гідрофон" ("досліджуваний перетворювач") - "попередній підсилювач" – " селектор - формувач стробу за часом" – "вимірювальна група" (осцилограф, вольтметр, самописець рівня) Робота тракту генерації і самописця – синхронізовано.

- після переходу на іншу частоту обраного частотного діапазону вимірювання повторюють На кожній частоті виконуються 3 вимірювання з наступним осередненням а чутливість на кожній частоті розраховується за формулою

$$\beta(f)\big|_f = \beta_e = 2\beta_0 \frac{U_e}{U_0},$$

де β_0 - чутливість еталонного гідрофону на частоті f

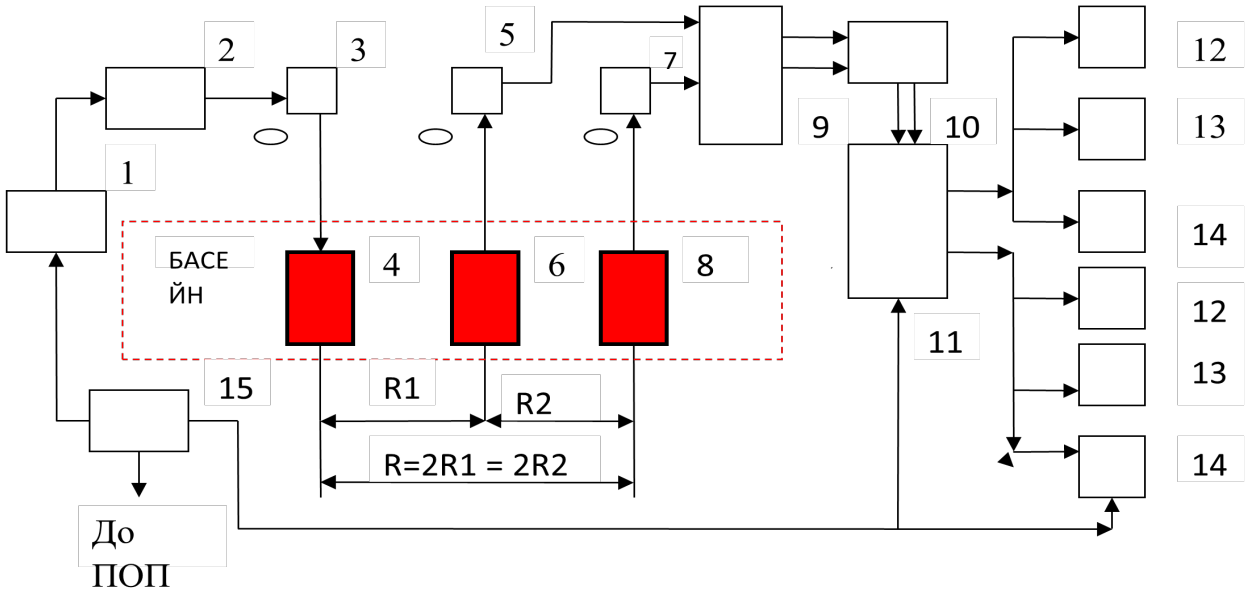


Рис 4.6 Структурна електрична схема вимірювання чутливості $\beta(f)$ у вільному полі

1 – генератор, 2 – підсилювач потужності, 3, 5, 7 – ПОП, 4 – випромінювач, 6 – еталонний гідрофон, 8 – досліджуваний перетворювач, 9 – двохканальний підсилювач, 10 – частотний селектор, 11 – пристрій формування стробу, 12 – вольтметр, 13 – осцилограф, 14 – самописець рівня, 15 – синхронізатор.

U_e значення електричної напруги на виході досліджуваного перетворювача на частоті вимірювань f;

U_0 значення електричної напруги на виході еталонного гідрофона на частоті вимірювань f;

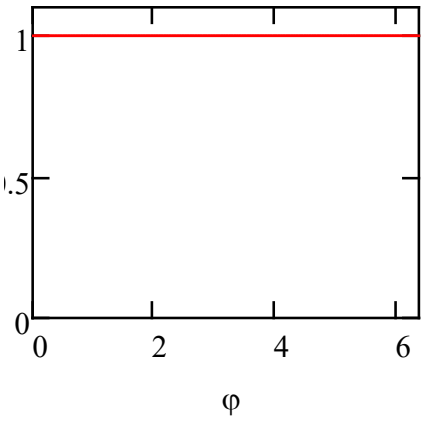
Результати вимірювань чутливості наведено на Рис. 4.6.

4.3 Просторові характеристики сферичного п'єзокерамічного перетворювача

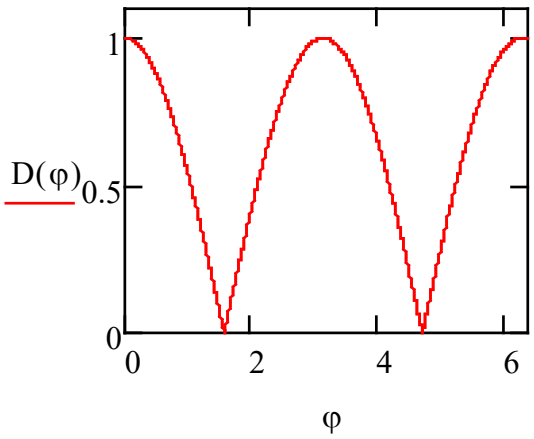
З точки зору формування характеристики направленості, сферичний перетворювач задовольняє всім вимогам щодо моделі поширення синфазних збурень часток середовища, які розповсюджуються в оточуючому середовищі. Повне електродування при цьому залишає нам лише нульові моди коливань сферичної оболонки. Резонанс нульової моди виникає за умов рівності довжини середнього радіусу сфери - довжині хвилі в матеріалі п'єзокераміки. Проте, корисним є на наш погляд розуміння того, який модовий склад коливального процесу є можливим взагалі.

Роздільне нанесення на п`єзоелемент електрично відокремлених один від одного електродів, призводить до збагачення коливального процесу сфери (Рис.5.1 – Рис. 5.2) і викривляє відповідні просторові характеристики мод. В нашому випадку, через обраний тип електродування ми маємо справу лише з нульовою модою і характеристика направленості мала б вигляд ХН з рис. 5.2. На Рис. 5.2. б, в, г, наведені ХН для окремих мод "1", "2", "3", де ХН

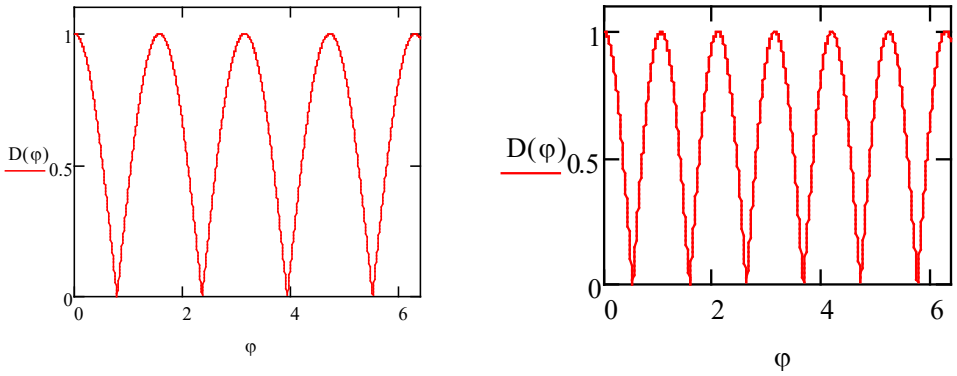
$$D(\varphi) = cos(n\varphi) \qquad n = 0,1,2,3,\ldots,\varphi \in [0,2\pi]$$



а.



б.



в. г.

Рис. 5.1 ХН модових складових сферичного джерела, склад яких регулюється кількістю та формою електродів

Вимірювання відбувалися з використанням тональних радіоімпульсів з заповненням на частотах 2 кГц та 10.5 кГц. Умови вимірювань, аналогічні наведеним в п. 4.3, за схемою на Рис. 4.5. Основною відмінністю в проведенні вимірювань ХН від описаних вище ситуацій вимірювань є те, що всі ПОП можуть обертатися навколо вертикальної вісі (наприклад – пара “випромінювач – досліджуваний перетворювач”.)

Результати вимірювань (наведено на Рис. 4.1, Рис. 5.1) показують, що навіть в умовах дальнього поля та імітації ситуації безеховості вимірювального басейна в режимах прийому і випромінювання, ХН мають суттєві відмінності від ХН, яка являється теоретично досяжною (рис. 5.1.а) Суттєві розбіжності в означених ХН дещо зменшуються по мірі зміщення резонансу нульової моди в бік нижніх частот.

Причиною значної нерівномірності ХН є невизначений поки алгоритм врахування в сумарному коливальному процесі - горла сфери, як для режиму прийому так і для режиму випромінювання. Запит на усунення такого дефекту існує. Отже, в подальшому представляється доцільним приділити цьому питанню більше уваги в фізичному, математичному і технологічному плані.

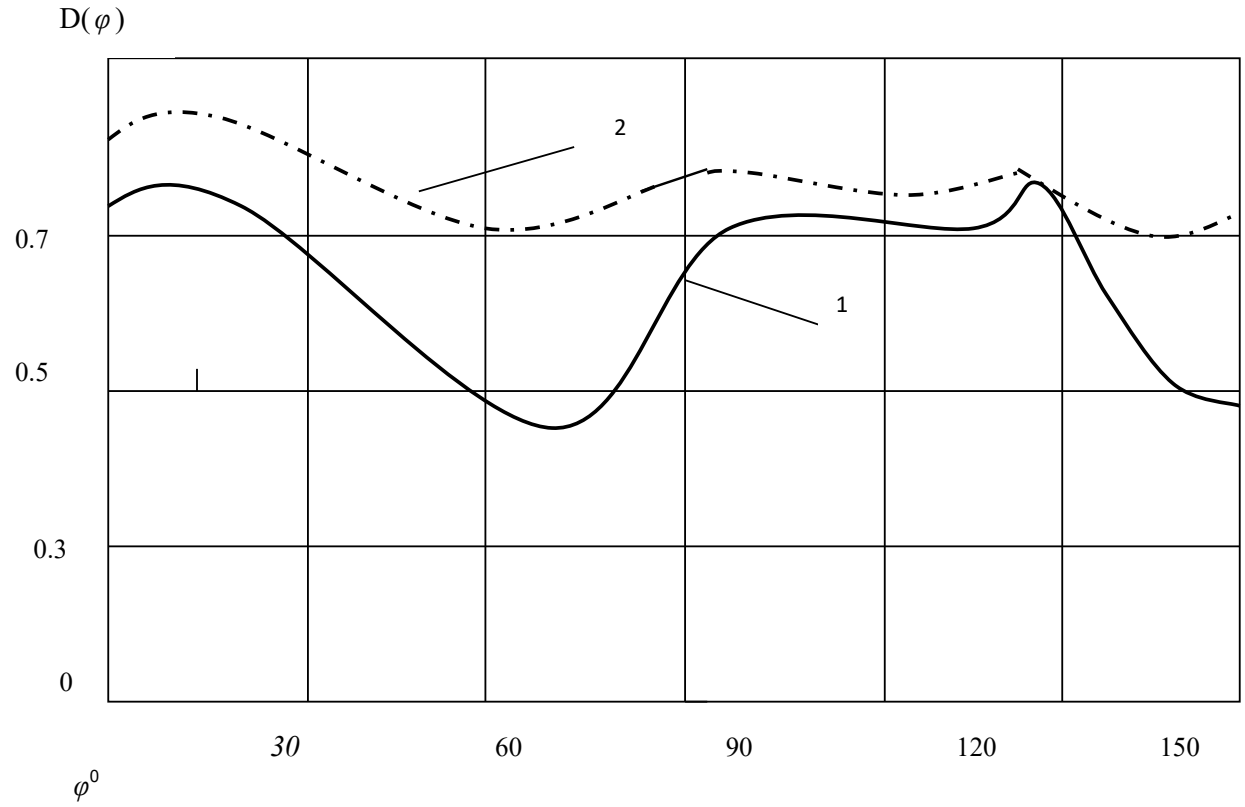


Рис.5.2. ХН сферичного перетворювача (режим прийому) для $d / \lambda = 0,66$ (крива 1) та $d / \lambda = 0,3$ (крива 2).

Висновки до розділу 4

В результаті виконаних гідроакустичних вимірювань, проведених за стандартною методикою, встановлено співпадіння отриманих даних з розрахунковими залежностями основних характеристик сферичного п’єзокерамічного перетворювача. При цьому:

- Визначено умови проведення вимірювань, типи, джерела та величини похибок, а також структурні схеми і порядок проведення вимірювань;
- Показано, що значення верхньої та нижньої границь довірчого інтервалу для відносної погрішності вимірювань АЧХ та параметрів ХН регулюються шляхом взаємозаміни складу приладів та знаходиться в традиційних для гідроакустичних вимірювань діапазонах;
- Виміряні АЧХ перетворювачів і показані резонансні області для перших чотирьох форм коливань. Отже, погрішність вимірювань імпедансу,

коефіцієнту передачі та чутливості становила меньше 3 дБ.

А також, у результаті проведених експериментальних досліджень основних розрахункових залежностей роботи, а також під час підготовки та проведення гідроакустичних вимірювань:

- Встановлено умови проведення вимірювань, види, джерела та величини похибок, а також структурні схеми та порядок приведення вимірювань.
- Експериментально підтверджено особливості формування модового складу вихідних електричних сигналів для різних видів електродування та способу комутації електродів.
- Проведено вимірювання основних параметрів ХН у частині визначення бічного поля, нулів, ореолу ХН, а також ширини характеристики спрямованості за рівнем мінус 3 дБ.

При цьому показано, що:

- ХН, що реалізують кутові особливості різних мод коливань, формуються за допомогою одиночного приймача на основі однієї співвісної коливальної системи;
- Отримані комбіновані ХН відбивають властивості наднаправленості багатомодових систем як одиночних, так і тих, що працюють у складі антенних решіток;
- Використання багатомодових систем, в приведених ситуаціях роботи, дозволяє відмовитися від застосування екранів, через ймовірність отримання практично односпрямованих ХН;

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті виконання роботи сформульовано наступні загальні висновки:

1. Виконано об’ємний аналіз літературних джерел за напрямками роботи в частині акустичних, механічних та електричних полів;
2. Поставлено та розв’язано наскрізні задачі про прийом та випромінювання звукових хвиль електропружним електродованим джерелом нульового порядку;
3. З метою наближення розрахункових та постановочних умов випромінювання і прийому звуку до реальних умов роботи п’єзокерамічного перетворювача розглянуто сферичний перетворювач, внутрішня область якого заповнена або рідиною або газом.

При цьому:

- Розглянуто імпедансні залежності сферичних електропружних перетворювачів, які заповнені рідинними наповнювачами;
- Проведено аналіз модової структури акустичного поля відповідно до типу електродування та наповнювача;
- Визначені умови узгодження елементів кола “середовище - електричне навантаження’’ та “генератор - акустичне навантаження” з урахуванням взаємодії трьох фізичних полів - електричного, механічного та акустичного;
- Встановлено, що отримані експериментальні результати відповідають результатам розрахунків, що підтверджує правильність зроблених припущень, вибору умов проведения розрахунків, а також висновків в теоретичній частині роботи.

Список літератури

1. Cady, W. Piezoelectricity: An introduction to the theory and applications of electromechanical phenomena in crystals. New York-London, 1946.

2. Mason, W. P. (1950). Piezoelecric crystals and their application to ultrasonics. Van Nostrand.

3. Warren P. Mason; Piezoelectricity, its history and applications. *J Acoust Soc Am* 1 December 1981; 70 (6): 1561–1566. https://doi.org/10.1121/1.387221

4. Grinchenko, V.T., Ulitko, A.F. & Shulga, N.A. Монография (1989). The mechanics of related fields in structural elements. (Vol. 5). Naukova dumka. 1989 - 279 p.

5. А. Коржик, А. Лейко, В. Дідковський Багатомодові електропружні перетворювачі акустичних пристроїв. Монография (2018): LAMBERT. Academic Publishing. –К.:НТУУ ім.. Сікорського..2018, 383 с.

6. Грінченко В.Т Сенченко І.В. Випромінювання звуку частково екранованими п’єзокерамічними перетворювачі // Прикл. Механіка. –1983. – Т.18, №2. – С. 15-21.

7. Коржик О.В., Лейко О.Г. Взаємодія плоскої акустичної хвилі з лінійної решіткою електропружних циліндричних перетворювачів // Наукові вісті НТУУ КПІ, 2001.№ 4. – С. 106-114

8. Лейко О.Г. Закономірности взаємодії плоскої акустичної хвилі з циліндричними решітками, що складаються з п’єзокерамічних циліндричних перетворювачів./ Лейко А.Г., Ткаченко В.П., Шамарін Ю.Є. // Акустичний вісник. -2000. Т.3,№ 2.- С.34-32

9. Борисейко В.А., Улітко А.Ф. Електропружні коливання товстостінної п’єзокерамічної сфери // Теплові навантаження в елементах конструкцій.1974.- Вип. 14, – С. 121-126

10. Кубенко В.Д., Рябуха Ю.Н., Савіна І.В. Дифракція акустичних хвиль на коаксіальных циліндричних оболонках, що заповнені в’язкою рідиною // Прикладна механіка. - 1988.-Т.24, № 10. – .С. 28-34

11. Коржик О.В., Лейко О.Г. Формування характеристики направленості

одиночного приймального електропружного перетворювача з розрізними електродами // Наукові вісті НТУУ КПІ. – 2005, №1. – С. 50-55

12. Коржик О.В., Стасів П.П. Відгук колового циліндричного перетворювача на збудження його звуковою хвилею// Судобуд. Промисл. Сер. Акустика. – 1991, № 9. –С. 27-29

13. Коржик О.В. АЧХ деяких форм коливань п’єзокерамічних прийомників звуку при різних видах електродування в умовах зв’язаності/ Коржик О.В. //Акустичний вісник.2009.-Т. 12, № 3.-С. 33-40

14. Коржик О.В. ФЧХ деяких форм коливань п’єзокерамічних циліндричних прийомників звуку при різних видах електродування в умовах зв’язаності / Коржик О.В. // Акустичний вісник.2009.-Т. 13№ 4.-С. 29-33.

15. Коржик О.В. Застосування методу скрізної задачі до дослідження ФЧХ акустичного поля прийомного циліндричного п’езокерамічного перетворювача з наскрізними електродами/ Коржик О.В. // Електроніка та зв’язок. 2010, № 3.-С. 155-159

16. Коржик О.В. Застосування методу наскрізної задачі до дослідження АЧХ акустичного поля приймального п'єзокерамічного циліндричного перетворювача з розрізними електродами / Коржик О.В. // Електроніка та зв’язок. 2010-№ 3.-С. 160-166

17. Карновський М.І. Взаємні акустичні імпеданси сферичних випромінювачів та резонаторів / Карновський М.І. // Доп. АН СССР. 1941.-Т. 32,№1. – С.40-43

18. Грінченко В.Т., Вовк І.В. Хвильові задачі розсіювання звуку на пружних оболонках // - К.: Наукова думка. 1986, -240 с.

19. Бабаєв А.Є., Бут Л. М., Савін В.Г. Нестаціонарні коливання тонкостінного циліндричного п'єзовібратора в рідині при несиметричному електричному збудженні // Прикл. Механіка. -1990. – Т. 36.-С.59-

20. Савін В.Г. Перетворення акустичних імпульсів на електричні циліндричної п'єзокерамічною оболонкою // Акуст. Ж.-1992. Т. 33.; №1-С.144-149

21. Моргун І.О. Випромінювання звукових імпульсів сферичним тонкостінним перетворювачем з розрізними електродами // Електроніка та зв’язок,- 2007, №3, -С. 43-49

22. Бабаєв А.Є., Нестационарні режими работи багатомодового циліндричного випромінювача з урахуванням процесів у кабельному тракті // Прикл. механ. – 1990, -Т. 26, № 12.-С. 59-67

23. Petrishchev O.N. (2012), Harmonic oscillations of piezoceramic elements. Part 1. Harmonic oscillations of piezoceramic elements in vacuum and the resonance-antiresonance method. AVERS - P. 16-41

24. Лейко О.Г., Коржик О.В. Формування характеристики направленості одиночного приймального електропружного перетворювача з розрізними електродами // Наукові вісті НТУУ КПІ. – 2005, №1. – С. 50-55

25. Aronov B. Couplend vibration analysis of the thin-walled cylindrical piezoelectric ceramic transducers / *JASA*. – 2009. – Vol. 125, no. 3. – P. 803–818. https://doi.org/10.1121/1.3056560

26. Shulga, N.A., Grigorenko, A. Ya. & Loza, I.A. (1984). Axisymmetric electroelastic waves in a hollow piezoceramic cylinder. *Prikladnaya Mekhanika, 20*(1), 26-32.

27. Aronov B., David A. Brown, Hiang Yan. Coreu Bachand // Modal analysis of the electromechanical conversion in piezoelectric ceramic spherical shells. August 2011, *The Journal of the Acoustical Society of America 130(2):* 753-63. DOI: 10.1121/1.3593363

28. Андрущенко В.О, Борисейко О.В., Немченко Д.С., Улітко В.А. Експериментальне вивчення ефективності перетворення енергії на резонансних коливаннях п’єзокерамічного стрижня з розрізними електродами при керованому електричному збудженні // КОНСОНАНС,2009. Київ, 2009,. – С.5-6. Електронний ресурс.:http/ www.hidromech/kiev.ua/ru/WWW-CUNS/2009-038-433/pdf

29. Андрущенко В.А., Вовкодав А.П., Карлош В.П., Улітко А.Ф. Дослідження коефіцієнта електромеханічного зв'язку у круглих п'єзокерамічних пластинах // Прикл. механіка. - 1975.Т. 11, № 4 - С.42-48

30. Aronov B. Couplend vibration analysis of the thinwalled cylindrical piezoelectric ceramic transducers/ JASA. – 2009. – Vol. 125, no. 3. – P. 803–818.; https://doi.org/10.1121/1.3056560

31. Korzhyk, O. V. (2010). Application of the "through" problem to the study of the amplitude-frequency characteristics of the acoustic field of a receiving cylindrical piezoceramic transducer with cut-off electrodes./ Elektronika ta zv'yazok, 15(3), 160-166.

32. Korzhyk, O. V., Kuroyedova, T. S. & Filipova, N. Yu (2013). Investigation of the electromechanical characteristics of a radiating cylindrical piezoceramic transducer with a fully electroded surface located in a closed annular layer. *Elektronika ta zv'yazok*, 18(1), 102-109. https://doi.org/10.20535/2312-1807.2013.18.1.189189

33. Korzhyk, O. V., Petryshchev, O. N., Hubinets′, Yu. V. & Filipova N. Yu (2014). Determination of electric voltage on the load of the receiving spherical electric-elastic transducer, which is filled with an acoustic medium (setting and general solution). Systemy obrobky informatsiyi. Zbirnyk naukovykh prats′, *123*(7), 49-56.

34. Korzhyk, O. V. (2013). Determining the boundary conditions in the formulation of problems of sound reception by a spherical electroelastic transducer with split electrodes. Elektronika ta zv'yazok, *18*(2), 97-104. https://doi.org/10.20535/2312-1807.2013.18.2.186872

35. Korzhyk, O. V. (2009) Amplitude-frequency characteristics of some forms of oscillations of piezoceramic cylindrical sound receivers at different types of electroding in the conditions of connection. Akustychnyy visnyk, *12*(3), 33-40. http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/87284

36. Коржик, М.О., Курдюк, С.В., Коржик, О.В. (2018). Імпедансні характеристики плоско-паралельного акустичного хвилеводу з комбінуванням межами при порушенні його двочастотних сигналом. *Мікросистеми, Електроніка та Акустика*, *23*(3), 65–74. https://doi.org/10.20535/2523-4455.2018.23.3.135928

37. Коржик, М.О., Курдюк, С.В., Коржик, О.В. (2018). Імпедансні характеристики пласко-паралельного акустичного хвилеводу з акустично м`якими границями при збудженні його двохчастотним сигналом. *Мікросистеми, Електроніка та Акустика*, *23*(4), 65–73. https://doi.org/10.20535/2523-

4455.2018.23.4.137528

38. Петріщев О.М., Коржик О.В., Д.Д. Новак, І.В. Кандрачук Про один метод розрахунку частотної характеристики чутливості сферичного п'єзокерамічного гідрофону // Electronics and Communication / Vol 8 №;5(82) ? 2014- С/ 71-87

39. Korzhyk, O.V., Naida, S., Kurdiuk, S., Nizhynska, V., Korzhyk, M., & Naida, A. Use of the pass-through method to solve sound radiation problems of a spherical electro-elastic source of zero order. *EUREKA: Physics and Engineering*, (5), 133-146. (2021). doi: https://doi.org/10.21303/2461-4262.2021.001292 (Scopus, Q3);

40. N.Y. Filipova, O.V. Korzhik, A.S. Chayka, S.A. Naida, M.O. Korzhik, A.S. Naida. Dynamics of Receiving Electroelastic Spherical Shell with a Filler. *J. Nano-Electron. Phys.* 12 №4, 04034 (2020). doi: https://doi.org/10.21272/jnep.12(4).04034 (Scopus, Q3)

41. Петріщев О.М. Коржик О.В. Прийом звуку сферичних електропружних перетворювачів з розрізними електродами (Частина 1) Electronics and Communications – 2014, Vol.19 № 6(83), с. 94-109

42. Петріщев О.М.. Коржик О.В. Прийом звуку сферичних електропружних перетворювачів з розрізними електродами (Частина 2) Electronics and Communications – 2014, Vol.20 № 1(84), с. 57-64

43. Leiko, O., Derepa, A., Pozdniakova, O. & Starovoit, Y. (2018). Acoustic fields of circular cylindrical hydroacoustic systems with a screen formed from cylindrical piezoceramic radiators. *Romanian Journal of Acoustics and Vibration, 15*(1), 41-46. http://rjav.sra.ro/index.php/rjav/article/view/49

44. Filipova, N. Yu. (2014). The formulation and solution of the problem of sound radiation by a multimode piezoelectric transducer located in a closed annular layer. Vestnik Zabaykal'skogo gosudarstvennogo universiteta, 104(1), 74-82.

45. Карновський М.І. Дифракція звуку. –К.: КПІ. Метод вказівки курсу ТОГА. 1974. –24с.

46. Гузь А.Н., Головчан В.Т. Дифракція пружних хвиль у багатозв'язних тілах.-К.: Наукова думка. 1972. -254 с.

47. Грінченко В.Т., Вовк І.В., Маципура В.Т., Хвильові задачі акустики Київ, ІНТЕРСЕРВІС, 2013 -578 с.

48. Грінченко В.Т., Вовк І.В. Основи акустики. Київ, Наукова думка, 2007, -640 с.

49. В. С. Дідковський, С. М. Порошин, О. В. Коржик, О. Г. Лейко, О. М. Петрищев. С. А. Найда. Акустичні антени: Навчальний посібник / Акустична Техніка – 2007, 244 с.

50. Петріщев О.М., Коржик О.В. Розрахунок частотної характеристики сферичного монолітного п`єзокерамічного гідрофону // Electronics and Communications – 2014, Vol. 19. № 3(80), с. 73-87

51. Коржик О.В., Коржик В.Ю. Одноточковий метод визначення характеристик акустичних матеріалів у хвилеводах // Акустичний вісник. – 2007, Т. 11, № 1. – С. 28-31.

52. Aronov B. Couplend vibration analysis of the thin-walled cylindrical piezoelectric ceramic transducers // JASA. – 2009.– Vol. 125, no. 3.– P. 8038.; https://doi.org/10.1121/1.3056560

53. Petrishchev, O.N. (2012). Harmonic oscillations of piezoceramic elements. Part 1. Harmonic oscillations of piezoceramic elements in vacuum and the resonance-antiresonance method. AVERS.

54. Morgun, I.O. & Savin, V.G. (2007). Converting acoustic pulses into electrical ones with a spherical piezoceramic shell, shielded from the outside by an elastic shell. Akustychnyy visnyk, *10*(3), 60-69. http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/1047

55. Derepa, A. V., Dzhanazyan, V. V., Leyko, O. H. & Drozdenko, O. I. (2019). Modern approaches to the design of hydroacoustic antennas of ship hydroacoustic stations. Ozbroyennya ta viys'kova tekhnika, *22*(2), 93-98. https://doi.org/10.34169/2414-0651.2019.2(22).93-98

56. Korzhyk, O. V. (2010). Application of the "through" problem to the study of the amplitude-frequency characteristics of the acoustic field of a receiving cylindrical piezoceramic transducer with cut-off electrodes. Elektronika ta zv'yazok, *15*(3), 160-166.

57. Korzhyk, O. V., Kuroyedova, T. S. & Filipova, N. Yu (2013). Investigation of the electromechanical characteristics of a radiating cylindrical piezoceramic transducer with a fully electroded surface located in a closed annular layer. Elektronika ta zv'yazok, *18*(1), 102-109. https://doi.org/10.20535/2312-1807.2013.18.1.189189

58. Korzhyk, O. V. (2013). Determining the boundary conditions in the formulation of problems of sound reception by a spherical electroelastic transducer with split electrodes. Elektronika ta zv'yazok, *18*(2), 97-104. https://doi.org/10.20535/2312-1807.2013.18.2.186872

59. Korzhyk, O. V. (2009). Amplitude-frequency characteristics of some forms of oscillations of piezoceramic cylindrical sound receivers at different types of electroding in the conditions of connection. Akustychnyy visnyk, *12*(3), 33-40. http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/87284

60. Aronov, David A. Brown, Hiang Yan. Coreu Bachand. // Modal analysis of the electromechanical conversion in piezoelectric ceramic spherical shells. August 2011, The Journal of the Acoustical Society of America 130(2):753-63. DOI: 10.1121/1.3593364

61. Derepa, A. V., Leiko, O. H., Drozdenko, O. I. & Svyatnenko, A. O. (2019). Properties of electric fields of hydroacoustic transdusers with internal buffle. Ozbroyennya ta viys'kova tekhnika, *24*(4), 41-47. https://doi.org/1034169/2414-0651.2019.4(24).41-48

62. Leyko, O. H., Kurdyuk, S. V. & Starovoyt, YA. I. (2018) Physical fields of hydroacoustic sonar arrays with baffle and cylindrical piezoceramic radiators with radial polarization. Mikrosystemy, Elektronika ta Akustyka : naukovo-tekhnichnyy zhurnal, *23*(1), 30-36. https://doi.org/10.20535/2523-4455.2018.23.1.99725

63. Leiko, O. H. & Sviatnenko, A. O. (2017). Physical fields of flat hydroacoustic antennas based on cylindrical radiators with internal screens. Elektronika ta zv'yazok, *22*(2), 66-72. https://doi.org/10.20535/2312-1807.2017.22.1.86484

ДОДАТОК А. Список опублікованих праць за темою дисертації

1. Коржик, М.О., Курдюк, С.В., Коржик, О.В. (2018). Імпедансні характеристики плоско-паралельного акустичного хвилеводу з комбінуванням межами при порушенні його двочастотних сигналом. *Мікросистеми, Електроніка та Акустика*, *23*(3), 65–74. https://doi.org/10.20535/2523-4455.2018.23.3.135928

2. Коржик, М.О., Курдюк, С.В., Коржик, О.В. (2018). Імпедансні характеристики пласко-паралельного акустичного хвилеводу з акустично м`якими границями при збудженні його двохчастотним сигналом. *Мікросистеми, Електроніка та Акустика*, *23*(4), 65–73. https://doi.org/10.20535/2523-4455.2018.23.4.137528

3. N.Y. Filipova, O.V. Korzhik, A.S. Chayka, S.A. Naida, M.O. Korzhik, A.S. Naida. Dynamics of Receiving Electroelastic Spherical Shell with a Filler // *J. Nano-Electron. Phys.* , pp. 1-7, V.12, №4, 2020. https://doi.org/10.21272/jnep.12(4).04034

4. Korzhyk, O., Naida, S., Kurdiuk, S., Nizhynska, V., Korzhyk, M., & Naida, A. Use of the pass-through method to solve sound radiation problems of a spherical electro-elastic source of zero order. EUREKA: Physics and Engineering, (5), 133-146. (2021). doi: https://doi.org/10.21303/2461-4262.2021.001292

5. Sergey Naida, Oleksii Korzhyk, Ivan Lastivka, Olha Pavlenko, Tetiana Zheliaskova, Maxim Korzhyk, Anton Naida, Nikita Naida, Oleksander Chaika. Mode-Matching Method Applied to Solving Sound Reception Problem Using Helmholtz Resonator. Journal of Nano- and Electronic Physics, Vol. 14, № 1, 01035(7pp) (2022). DOI: https://doi.org/10.21272/jnep.14(1).010355.