

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Приладобудівний факультет

Кафедра приладів і систем неруйнівного контролю

«На правах рукопису»
УДК 620.179

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Протасов А.Г.

«__» _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

**зі спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології**

**на тему: «Дослідження ультразвукової системи контролю зміщення
людської кістки при зламах»**

Виконав:

студент 6 курсу, групи ПК-61м
Богданов В.М.

Керівник:

к.т.н., доц.
Баженов В. Г.

Консультант з розроблення стартап-проекту:

к.е.н., доц.
Бояринова К.О.

Рецензент:

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____

Київ – 2018 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Приладобудівний факультет

Кафедра приладів і систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-науковою програмою

Спеціальність (спеціалізація) – 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології (комп'ютерно-інтегровані технології та системи неруйнівного контролю).

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Протасов А.Г.

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Богданову Володимирі Михайловичу

1. Тема дисертації «Дослідження ультразвукової системи контролю зміщення людської кістки при зламах», науковий керівник дисертації Баженов Віктор Григорович к.т.н., доц., затверджена наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____
2. Термін подання студентом дисертації _____
3. Об'єкт дослідження: процес поширення ультразвукових хвиль в передпліччі.
4. Предмет дослідження: методи та засоби побудови ультразвукової системи для контролю кісток. Засоби підвищення достовірності та швидкодії контролю.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: дослідити можливості побудови ультразвукової системи та порівняти її з існуючим рентгенівським аналогом, зробити аналіз проведення контролю людських кісток за допомогою фазованої решітки; дослідити методи підвищення роздільної здатності перетворювачів на базі фазованої решітки; проаналізувати ефективність методів пригнічення побічних ефектів.
6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: 1 – назва, предмет, об'єкт, наукова новизна, завдання дослідження; 2 – схематичні зображення методів побудови ультразвукової системи; 3 – дослідження

діаграм направленості у середовищі MatLab; 4 – Результати моделювання розподілу акустичного тиску у середовищі Comsol Multiphysics; 5 - аналіз ефективності методів пригнічення побічних ефектів.

7. Орієнтовний перелік публікацій: одна стаття, одна теза.

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розробка стартап-проектів	Бояринова Катерина Олександрівна		

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Формулювання завдання магістерської дисертації	01.10.2016	Виконано
2	Проведення аналітичного огляду методів ультразвукової дефектоскопії	10.12.2016	Виконано
3	Аналіз проведення контролю людських кісток за допомогою ФР	20.02.2017	Виконано
4	Дослідження методів підвищення роздільної здатності перетворювачів на базі ФР	10.05.2017	Виконано
5	Моделювання ДН перетворювачів на базі ФР	15.09.2017	Виконано
6	Моделювання розподілу акустичного тиску	25.10.2017	Виконано
7	Аналіз ефективності методів пригнічення побічних ефектів.	20.02.2018	Виконано
8	Формулювання висновків	10.04.2018	Виконано

Студент

Богданов В.М.

Науковий керівник дисертації

Баженов В.Г.

* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.

Реферат

Дана магістерська дисертація складається з 90 сторінок, 40 ілюстрацій, 25 таблиць та 18 літературних посилань.

В магістерській дисертації було проведено дослідження можливостей побудови ультразвукової системи для контролю кісток передпліччя. Було запропоновано систему, яка включає в себе шість лінійних антенних решіток, активні групи лінійних антенних решіток можуть використовуватись як фазовані антенні решітки.

Досліджені можливі схеми прозвучування в системі. Запропоновані два режими роботи системи, перший це визначення наявності тріщини, другий знаходження розміру зміщення. В результаті дослідження було виявлено, що найбільш ефективним є дзеркально тінювий метод, але це значно ускладнює алгоритм роботи системи, а саме потребує початкового налаштування. Також у даній системі для підвищення достовірності та швидкодії контролю при похилому введенні променю пропонується випромінювання в двох напрямках одночасно на різних частотах. Проаналізована сучасна елемента база, яка задовольняє поставленим вимогам системи за допомогою широкополосних композитних датчиків.

Мета роботи полягає у дослідження можливості побудови системи для проведення контролю людських кісток на базі ФР.

Аналіз режимів роботи ФР, виявлення побічних ефектів ФР при реалізації контролю, та розробка методів їх пригнічення.

Об'єкт дослідження – процес поширення ультразвукових хвиль в передпліччі.

Предмет дослідження – методи та засоби побудови ультразвукової системи для контролю кісток. Засоби підвищення достовірності та швидкодії контролю.

Ключові слова: ультразвукова система, фазована антенна решітка, лінійна антенна решітка, ультразвук, діаграма направленості.

Abstract

This master's thesis consists of 90 pages, 40 illustrations, 25 tables and 18 literary references.

In the master's dissertation was carried out research of possibilities of construction of an ultrasonic system for control of bones of a forearm. A system has been proposed that includes six linear antenna arrays, active groups of linear antenna arrays can be used as phase antenna arrays.

Possible sound schemes in the system are investigated. Two operating modes of the system are proposed, the first is the definition of the presence of a crack, the second finding the size of the displacement. The study found that the most effective is the mirror-shadow method, but it greatly complicates the algorithm of the system, and it requires initial setup. Also, in this system, radiation in two directions simultaneously at different frequencies is proposed in order to increase the reliability and speed of control in the inclined beam. The modern element is analyzed, which satisfies the requirements of the system with the help of broadband composite sensors.

The purpose of the work is to study the feasibility of building a system for the control of human bones on the basis of phased array.

Analysis of the modes of doing phased array, the detection of side effects of phased array in the implementation of control, and the development of methods of their oppression.

The object of the research is the process of spreading ultrasound waves in the forearm.

Subject of research - the methods and means of constructing an ultrasound system for bone control. Means of increasing the reliability and performance of control.

Key words: ultrasound system, phased array antenna, linear antenna array, ultrasound, directional diagram.

Зміст

Перелік умовних позначень.....	8
Вступ.....	9
1. Аналіз проведення контролю людських кісток за допомогою ФР.....	15
1.1. Основні відомості та принцип роботи фазованої решітки.....	15
1.2. Близня і дальня зони випромінювання.....	18
1.3. Діаграма направленості прямокутного випромінювача.....	25
1.4. Діаграма направленості розподіленого перетворювача ФР.....	28
1.5. Фронтальна роздільна здатність.....	33
1.6. Типи лінійних ФР та основні вимоги до них.....	36
1.7. Основні вимоги до лінійних ФР.....	39
1.8. Побічні ефекти їх класифікація і вплив на характеристики ФР.....	39
1.9. Висновки до розділу	44
2. Дослідження методів підвищення роздільної здатності перетворювачів на базі ФР.....	45
2.1. Аналіз методів пригнічення побічних мод коливань в перетворювачах на базі ФР.....	45
2.2. Моделювання ДН перетворювачів на базі ФР.....	50
2.3. Використання програмного забезпечення Comsol Multiphysics для моделювання акустичного поля перетворювача.	55
2.3.1. Моделювання розподілу акустичного тиску в ОК.....	55
2.3.2 Моделювання проведення контролю ближній зоні.....	57
2.3.3. Рекомендації при контролі в зонах сканування, де виникає трансформація хвиль.....	58
2.4. Висновки до розділу	60
3. Аналіз ефективності методів пригнічення побічних ефектів. Порівняння результатів моделювання.....	61
3.1. Розрахунок затримок.....	61

3.2. Моделювання роботи фазованої решітки	66
3.3. Висновки до розділу	71
4. Розроблення стартап-проекту	72
4.1 Опис ідеї проекту	72
4.2 Технологічний аудит ідеї проекту	73
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	74
4.4 Аналіз пропозицій ринку	77
4.5 Фактори конкурентоспроможності	79
4.6 Аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту	79
4.7 SWOT-аналіз стартап-проекту	80
4.8 Альтернативи ринкової поведінки	81
4.9 Розроблення ринкової стратегії проекту	82
4.10 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	84
4.11 Висновки до розділу	87
Висновки	88
Список використаної літератури	89

Перелік умовних позначень

ЛАР	Лінійна антенна решітка
ФАР	Фазована антенна решітка
ФР	Фазована решітка
ПЕП	П'єзоелектричний перетворювач
ДН	Діаграма направленості

Вступ

Актуальність теми дослідження

Контроль людських кісток завжди буде актуальною задачею. При зламах, забоях доводиться звертатися до рентгенівського методу контролю, а після операції при зламі кістки зі зміщенням інколи доводиться робити рентген і не один раз.

Всім давно відомо, що рентгенівські промені заподіюють певну шкоду здоров'ю, вчені багато років намагаються знизити до мінімуму негативний вплив променів на організм людини.

Рентгенівський метод контролю дає гарну та чітку картинку зламу кістки, але він по перше не мобільний, потребує спеціально обладнаних приміщень, спеціальної підготовки фахівців тому його не можливо використовувати в польових умовах. По друге рентгенівське опромінення має негативний вплив на організм людини. Тому було проведено дослідження можливостей створення мобільної ультразвукової системи, яка би дозволила проводити експрес контроль в польових умовах. Це особливо важливо у наш час, коли на сході ідуть бойові дії.

Сьогодні при серйозних зламах зі зміщенням використовуються такі складні конструкції (рис 1.1), при яких важко переміщати пацієнта до рентген кабінету. Також завжди є потреба постійного контролю процесу складання кісток під час операції.



Рис. 1.1 Конструкція після операції зі зміщенням

Постановка завдання

Виникла необхідність в розроблені ультразвукової системи контролю людських кісток для зменшення отриманої дози рентгенівського опромінення при зламах чи забоях (рис 1.2).

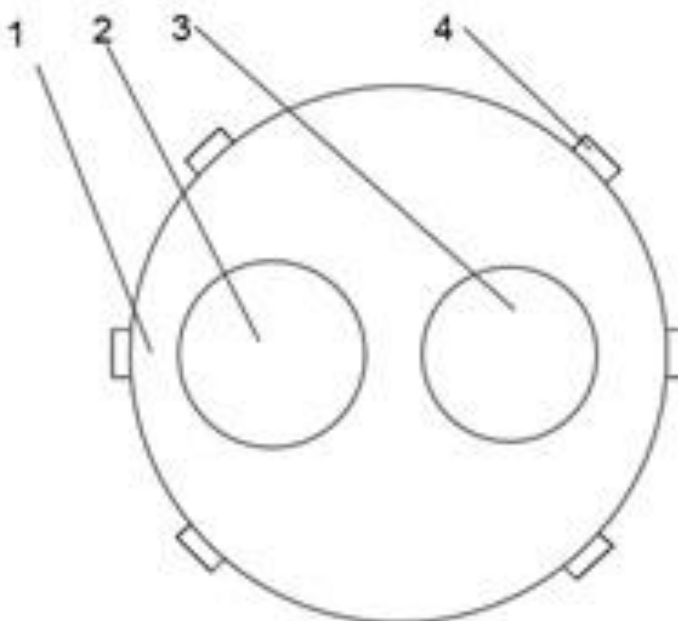


Рис. 1.2 Схематичне зображення положення датчиків на передпліччі:
1 – передпліччя, 2 – променева кістка, 3 – ліктьова кістка, 4 – лінійна антенна решітка.

Для реалізації такої системи пропонується використання лінійних ультразвукових антенних решіток. В цьому випадку активну групу лінійної антенної решітки пропонується використовувати як фазовану антенну решітку. Рівень електроніки на сьогоднішній день дозволяє це реалізувати

Схема прозвучування показана на рис 1.3. Можливі два режими роботи. У першому режимі ми шукаємо тріщину. Відомо, що при випромінюванні ультразвукового променя паралельно до зламу його неможливо визначити, тому пропонується використовувати похиле введення променю. Також при потребі є можливість зміни кута введення

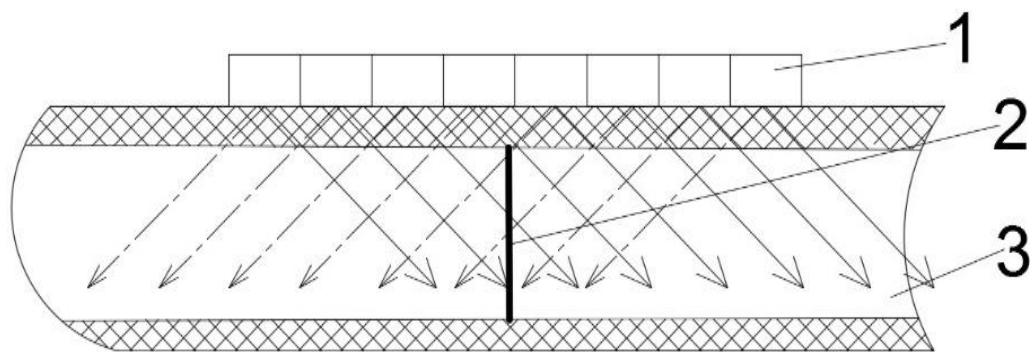


Рис. 1.3 Схематичне зображення пошуку зламу:

1 – лінійна антенна решітка, 2 – злам кістки, 3 – об'єкт контролю

У другому режимі, який показаний на рис. 1.4 ми визначаємо величину зміщення кістки випромінюючи промінь паралельно до кістки.

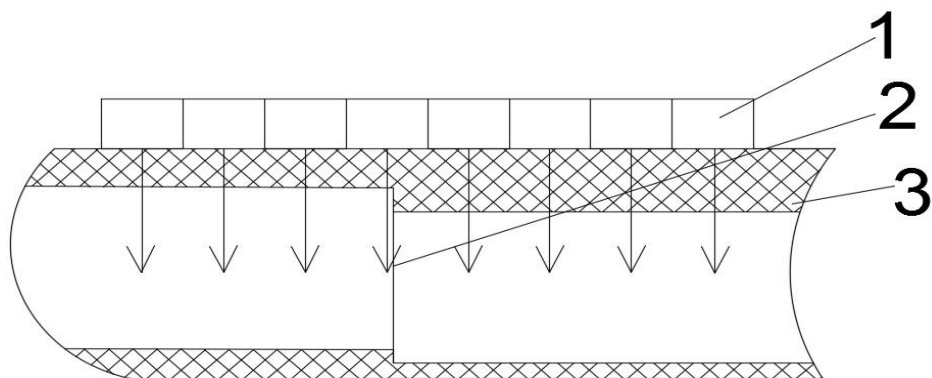


Рис. 1.4 Схематичне зображення визначення величини зміщення кістки:

1 – лінійна антенна решітка, 2 – зміщення кістки, 3 – об'єкт контролю

Також у даній системі для підвищення достовірності контролю при похилому введенні променю пропонується випромінювання в двох напрямках одночасно на різних частотах (рис 1.5). В кожній активній групі використовується 16 елементів. Якщо буде потреба то є можливість використання кожної групи окремо. Є широкополосні композитні датчики які дають змогу це реалізувати.

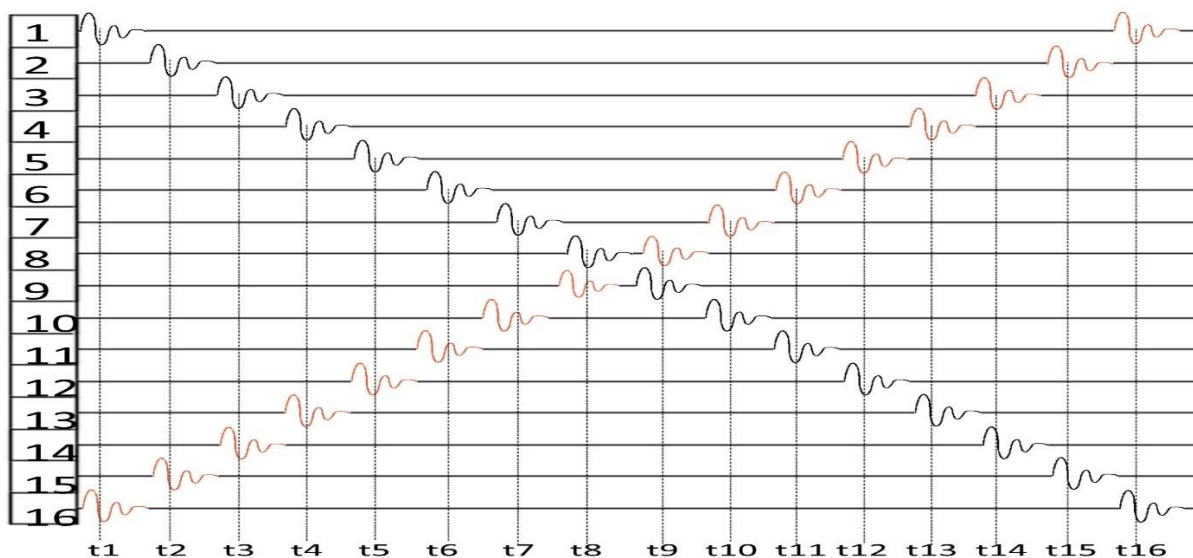


Рис. 1.5 Схема випромінювання в двох напрямках одночасно

Випромінювачі у вигляді фазованих решіток (ФР) набувають в ультразвуковій дефектоскопії дедалі більшого поширення завдяки перевагам електричного сканування порівняно з механічним, а також можливість динамічного керування діаграмою направленості (зміна кута введення і ширина пучка) і забезпечення статичного та динамічного фокусування. Також ФР має такі переваги як швидкість, універсальність, малі габарити, механічна надійність, та ін..

У порівнянні з традиційними монолітними перетворювачами ФР забезпечують підвищену достовірність, точність і швидкодію контролю що, насамперед, обумовлено можливістю:

– проводити електронне управління спрямованістю, формою і енергією ультразвукового (УЗ) променя ФР, як в режимі випромінювання, так і в режимі прийому імпульсних сигналів;

– формувати в реальному масштабі часу двовимірні ультразвукові зображення (томограми) перетинів контрольованих об'єктів з метою виявлення дефектів типу порушення суцільності (раковини, тріщини та ін..) та неоднорідності (включення, структурно-топологічні зміни щільності та ін..).

Аналіз літературних джерел

Відомо, що достовірність і точність ультразвукового контролю визначаються акустичної чутливістю і роздільною здатністю перетворювача, а також здатність зберігати не змінними ці параметри в процесі сканування об'єкту контролю. Досягнення максимальних значень цих параметрів є основною метою при проведенні контролю людських кісток.

Підвищення роздільної здатності за рахунок пригнічення побічних ефектів які виникають в ФР присвячені роботи вчених: Пілецкаса Е.Л, J.D. Larson, J.F. Dias, A. Hanafy, J. Sato та ін..

Також деякими вченими були створені математичні моделі ФР з урахування побічних ефектів, які виникають в перетворювачі : Домаркаса В.Й., Пілецкаса Э.Л., Кажиса Р.-И., Шмакова Ю.Г., Фалькевича С.А., Мажейки, L.W.Schmerr, J.Sato, M.Onoe,.

В роботі Пілецкаса Е.Л, J.D. Larson, J.F. Dias, A. Hanafy, J. Sato та ін.. проведені методи та способи пригнічення побічних ефектів, які виникають в ФР

Мета та завдання дослідження

Метою даного дослідження є дослідження можливості побудови системи для проведення контролю людських кісток на базі ФР, яка забезпечить та підвищить достовірність контролю.

Аналіз режимів роботи ФР, виявлення побічних ефектів ФР при реалізації контролю, та розробка методів їх пригнічення.

Об'єкт дослідження – процес поширення ультразвукових хвиль в передпліччі.

Предмет дослідження – методи та засоби побудови ультразвукової системи для контролю кісток. Засоби підвищення достовірності та швидкодії контролю.

РОЗДІЛ 1

Аналіз проведення контролю людських кісток за допомогою ФР

В даному розділі представлені основні відомості про ФР, класифікація ФР, принцип роботи, які вимоги пред'явлені до ФР для проведення контролю. Показано основна класифікація побічних ефектів які присутні в ФР, та основні методи пригнічення побічних ефектів. Приведено процес контролю людських кісток за допомогою ФР. Запропоновані схеми прозвучування на базі ФР . Показано які задачі та складнощі виконують при проведенні контролю за допомогою монолітних перетворювачів та ФР.

1.1. Основні відомості та принцип роботи фазованої решітки

У зв'язку зі складністю виготовлення кільцевих і матричних ФР, а також систем управління ними, найбільш широке поширення в даний час отримали лінійні ФР, яким в даному розділі присвячено більшість часу.

Лінійна ФР (рис 1.6) являє собою набір ідентичних п'єзоперетворювачів, розташованих уздовж однієї лінії на відстані один від одного (зазвичай $d = \lambda/2$, де - λ довжина ультразвукової хвилі в ОК), В результаті їх інтерференції формується спрямоване поле - ультразвуковий промінь лінійної ФР.

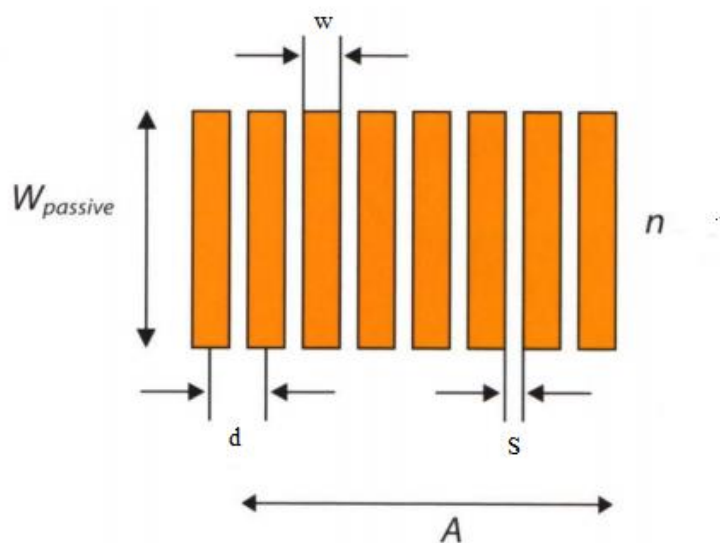


Рис. 1.6 Лінійна ФР

A- активна апертура

d – крок

s– зазор між сусідніми елементами

w – ширина одного елемента

n– кількість елементів

ФР різняться видом сканування, геометричною формою і розташуванням елементів, ФР можуть бути умовно розділені на три типи: кільцеві, лінійні і матричні, що забезпечують відповідно одомірне, двомірне і тривимірне сканування ультразвуковим променем. (рис. 1.7 а, б).

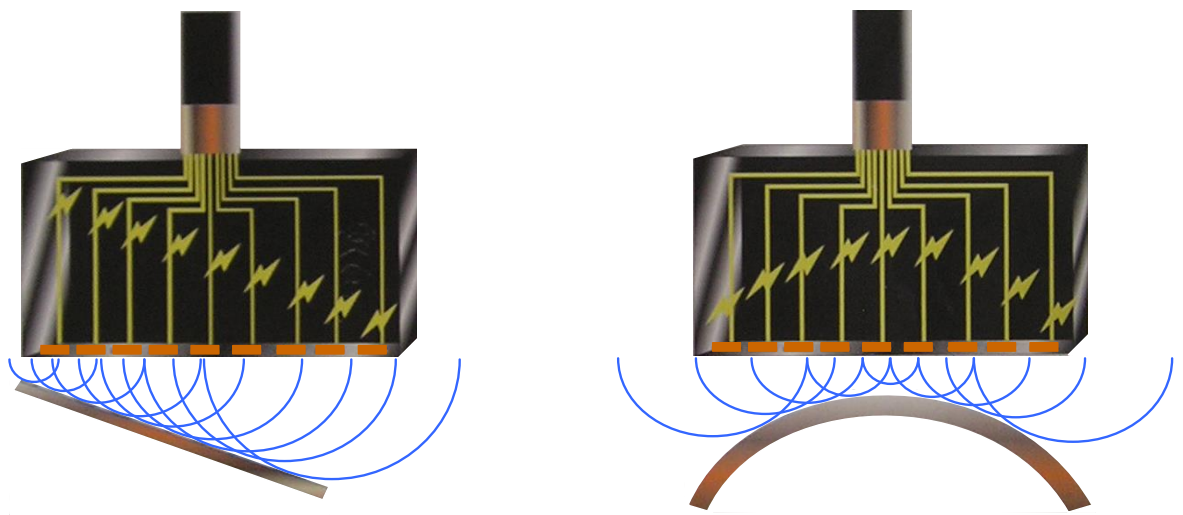


Рис 1.7 - Розподіл часових затримок (фазових зсувів) збуджуючих імпульсів і формування похилого (а) і фокуруючих (б) ультразвукових полів (променів) лінійної ФАР ПЕП

Формування ультразвукового поля лінійної ФАР ПЕП засноване на принципі Гюйгенса розподіл тиску в полі є результатом накладення елементарних хвиль, що виходять від точок активних поверхонь п'єзоперетворювачів ФР. При накладенні хвиль відбувається збільшення тиску в тому випадку, якщо їх фази збігаються, і ослаблення, аж до повної компенсації, якщо хвилі знаходяться в протифазі, в результаті чого поле лінійної ФР набуває спрямований характер.

Змінюючи часові затримки збуджуючих електричних імпульсів, що подаються на елементи ФР, можна здійснювати управління спрямованістю, формою і енергією ультразвукового променя, тобто проводити сканування і динамічне фокусування в досліджуваному просторі контрольованого об'єкта, а також генерувати поздовжні, поперечні і поверхневі хвилі.

У режимі прийому управління ультразвуковим променем здійснюється аналогічним чином, що впливає з принципу взаємності.

На рис. 1.8 наведена узагальнена структурна схема системи електронного сканування та динамічного фокусування ультразвукового променя лінійної ФР. У передавальному тракті системи, багатоканальний генератор електричних сигналів виробляє імпульси, що надходять на входи фазуючих пристроїв, в якості яких використовуються електронно керовані лінії затримки, що створюють необхідний розподіл фазових зсувів електричних імпульсів між каналами тракту. З виходів ліній затримки через підсилювачі потужності (на малюнку не показані) на входи елементів ФР надходять збуджуючі імпульси напруги зі створеними фазовими зсувами. В результаті електроакустичного перетворення на робочих (випромінюючих) поверхнях елементів ФАР виникають коливальний тиск, що викликає випромінювання імпульсних ультразвукових хвиль, які інтерферуючи формують ультразвуковий промінь з глибиною фокусу і кутовим положенням у відповідності до фазових зсувів. У приймальному тракті системи на робочі (приймальні) поверхні елементів ФАР впливає тиск, створюваний відбитими від дефекту ультразвуковими хвилями, що поширюються в зворотному напрямку. В результаті акустико-електричного перетворення на виходах елементів ФР утворюються луноімпульси напруги, які посилюються за допомогою попередніх підсилювачів (на малюнку не показані) надходять на входи керованих ліній затримки, що забезпечують між каналами повну компенсацію фазових зрушень прийнятих луноімпульсів. Отримані синфазні луноімпульси підсумовуються, в результаті чого амплітуда напруги сумарного

луноімпульса на виході суматора стає максимальною, при якій значення глибини фокусу і кутового положення ультразвукового променя в режимах прийому і випромінювання збігаються. При безперервній зміні тимчасових затримок система забезпечує динамічне фокусування і сканування ультразвуковим променем у межах заданого сектора.

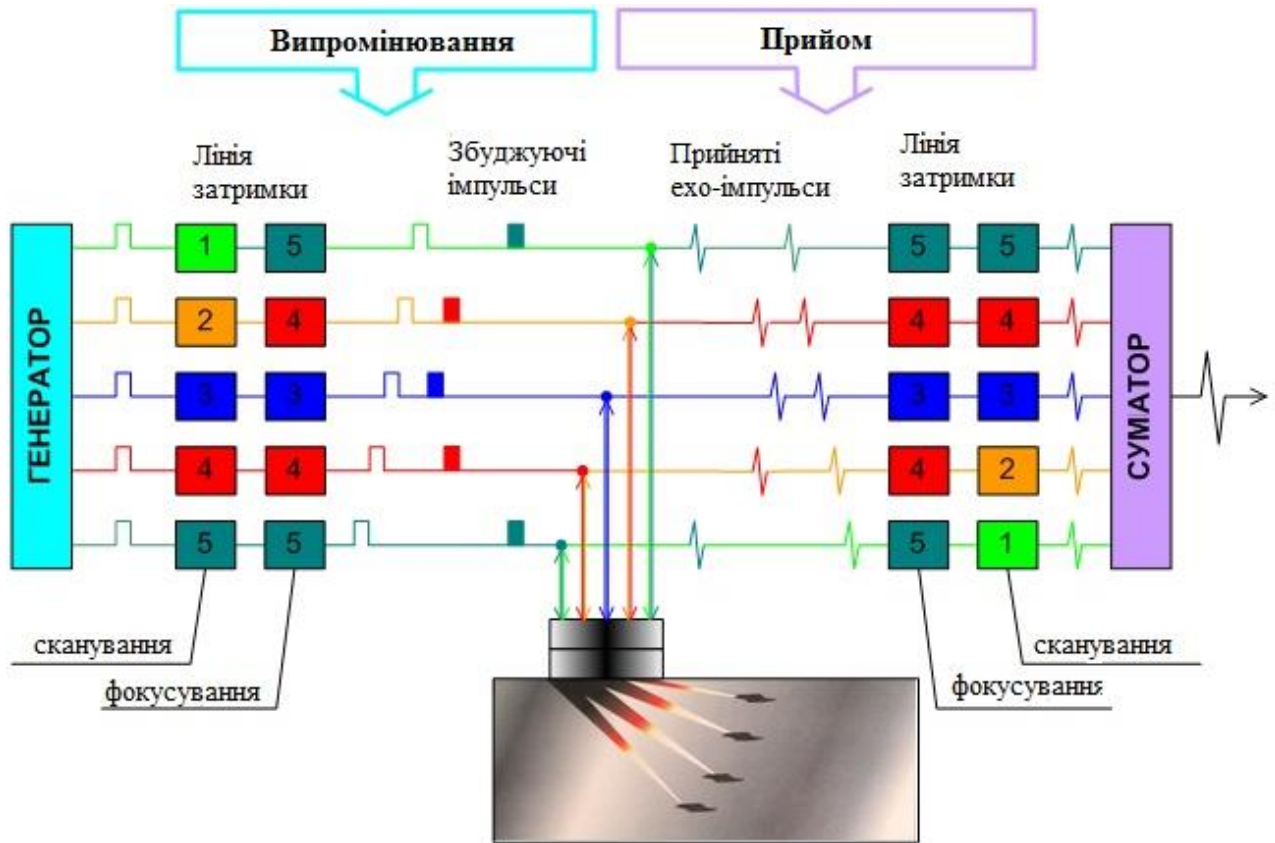


Рис 1.8 - Узагальнена структурна схема системи електронного сканування та динамічної фокусування ультразвуковим променем лінійної ФР

1.2 Близня і дальня зони випромінювання

Для того щоб описати характеристики направленості випромінювача необхідно описати зони, які виникають при випромінюванні

Проаналізуємо характер зміни акустичного тиску вздовж акустичної осі. Для цього розглянемо закон зміни модуля тиску в на відстані r_0 :

$$\left| \sin\left(\frac{\pi}{\lambda}(r_1 - r_0)\right) \right|.$$

Інтерес для аналізу становлять такі два випадки: 1) точки вздовж осі x з нульовим значенням тиску; 2) точки осі z з максимумами тиску.

1. Точки вздовж осі z з нульовим значенням тиску. Для них виконується умова

$$\frac{\pi}{\lambda}(r_1 - r_0) = \pi n, \quad n = 1, 2, 3, 4, \dots$$

Останнє нульове значення тиску на осі (за винятком, коли $r_0 \rightarrow \infty$) зосереджується в точці, для якої виконується умова $\frac{\pi}{\lambda}(r_1 - r_0) = \pi$, тобто для $n = 1$, є $r_1 = r_0 + \lambda$.

Оскільки $r_1^2 = a^2 + r_0^2$ то після сумісного розв'язання цих двох рівнянь отримаємо відстань від центра випромінювача до останнього мінімуму з рівняння

$$(r_0 + \lambda)^2 = a^2 + r_0^2$$

або з урахуванням $\lambda \ll a$

$$r_{0\min} = \frac{a^2}{2\lambda} - \frac{\lambda}{2} \cong \frac{a^2}{2\lambda}.$$

2. Точки осі z з максимумами тиску. Для них виконується загальна умова

$$\frac{\pi}{\lambda}(r_1 - r_0) = \frac{\pi}{2}(2n - 1), \quad \text{де } n = 1, 2, 3, \dots$$

Останнє максимальне значення тиску на осі визначається в точці, для якої виконується умова

$$\frac{\pi}{\lambda}(r_1 - r_0) = \frac{\pi}{2}, \quad \text{тобто для } n = 1,$$

звідки

$$r_1 = r_0 + \frac{\lambda}{2}.$$

Розв'язуючи спільно з рівністю $r_1^2 = a^2 + r_0^2$ систему рівнянь, дістанемо відстань від центра випромінювача до останнього максимуму (межу ближньої зони):

$$\left(r_0 + \frac{\lambda}{2}\right)^2 = a^2 + r_0^2,$$

або з урахуванням того, що $\lambda \ll a$,

$$r_0 = \frac{a^2}{\lambda} - \frac{\lambda}{4} \cong \frac{a^2}{\lambda} = r_{\text{бл}}.$$

Віддалені точки на осі z . Для визначення акустичного тиску у віддалених точках акустичної осі скористаємося виразом

$$P_{\text{max}}(r_0) = 2p_0 \left| \sin\left(\frac{\pi}{\lambda}(r_1 - r_0)\right) \right|.$$

зведеним до вигляду

$$P_{\text{max}}(r_0) = 2p_0 \left| \sin\left(\frac{\pi}{\lambda} \frac{a^2}{2r_0}\right) \right| = 2p_0 \left| \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{r_{\text{бл}}}{r_0}\right) \right|.$$

Тут, з урахуванням того, що $r_0 \gg a$, виконано перетворення

$$r_1 - r_0 = \sqrt{r_0^2 + a^2} - r_0 = r_0 \left(\sqrt{1 + \frac{a^2}{r_0^2}} - 1 \right) \approx r_0 \left(1 + \frac{a^2}{2r_0^2} - 1 \right) = \frac{a^2}{2r_0}.$$

На відстані від випромінювача, коли значення синуса можна замінити його аргументом, амплітуду акустичного тиску вздовж осі можна подати виразом

$$P_{\text{max}}(r_0) = p_0 \frac{\pi a^2}{\lambda} \cdot \frac{1}{r_0} = p_0 \frac{S}{\lambda} \cdot \frac{1}{r_0},$$

з якого виходить, що тиск змінюється обернено пропорційний r , що характерно для сферичної хвилі. Вже на відстані $r = 6 \frac{a^2}{\lambda}$ поширення хвилі (з похибкою 1%) відповідає сферичному закону.

Межею дальньої зони, тобто межею сферичного поля, вважають відстань r уздовж осі випромінювання, для якої виконується умова:

$$r_1 - r_0 = \frac{\lambda}{16},$$

звідки $\left(r_0 + \frac{\lambda}{16}\right)^2 = a^2 + r_0^2$, і з урахуванням $\lambda \ll a$ маємо

$$r_{\text{д}} = \frac{8a^2}{\lambda} - \frac{\lambda}{2} \cong \frac{8a^2}{\lambda} = 8r_{\text{бл}}.$$

У результаті аналізу розподілу тиску вздовж осі випромінювача (акустичної осі) можна зробити такі висновки (рис. 1.9):

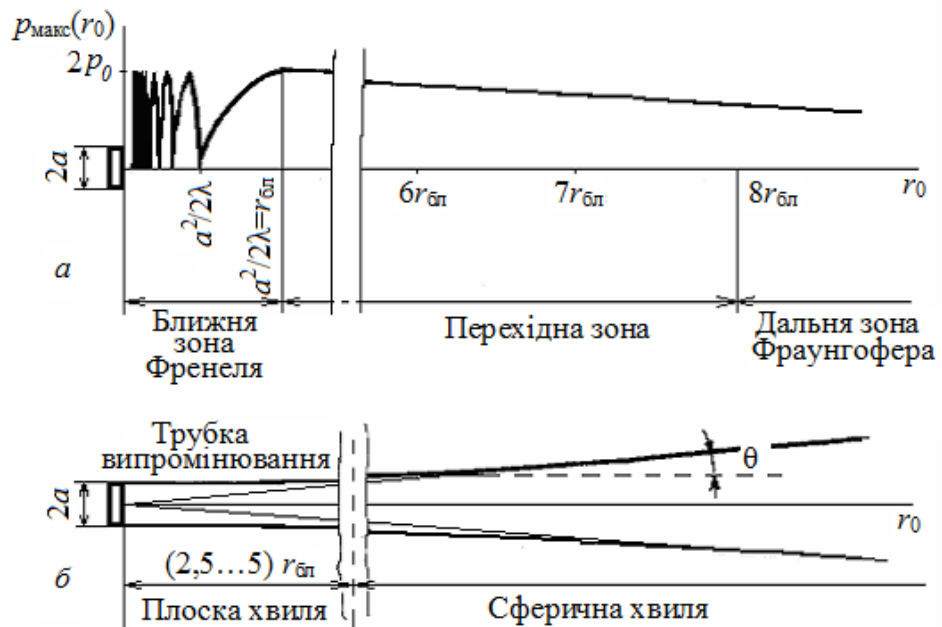


Рис. 1.9 Акустичне поле дискового випромінювача: a – розподіл модуля акустичного тиску вздовж акустичної осі; b – межі акустичного пучка

1. Уздовж осі випромінювача до відстані $r_0 = \frac{a^2}{\lambda}$, у ближній зоні або зоні Френеля, звукова хвиля поширюється в трубці випромінювання з перетином, що дорівнює перетину поршневої діаграми (випромінювача). У ближній зоні хвиля умовно плоска.

2. Починаючи з відстані $r_0 = 8r_{\text{ФЛ}} = 8\frac{a^2}{\lambda}$, тобто в дальній зоні або зоні Фраунгофера, плоский випромінювач поводитья як джерело сферичної хвилі. В цій зоні формується звична діаграма направленості випромінювання

3. Ділянку вздовж осі $\frac{a^2}{\lambda} < r_0 < 8\frac{a^2}{\lambda}$ доцільно вважати перехідною зоною, у якій спостерігається поступовий перехід від площинної хвилі до сферичної.

4. Межі зон випромінювання випромінювачів, що не мають дискової форми, оцінюються з урахуванням максимального розміру перетворювача. Для прямокутного перетворювача, наприклад, з розмірами $2a \cdot 2b$ ближня зона визначатиметься по радіусу описаного кола

$$r_{\text{Ф}} = \frac{a^2 + b^2}{\lambda}.$$

5. Можна зробити висновок, що звукова енергія в ближній зоні вздовж акустичної осі не поширюється. А як же вона передається в дальню зону? Очевидно, що в перетині трубки випромінювання існують концентричні зони з ненульовою інтенсивністю. У такому разі говорити про площинну хвилю в трубці випромінювання (ближній зоні) можна вельми умовно.

Характеристика направленості випромінювача визначається просторовим розподілом акустичного поля, зокрема, просторовим розподілом

акустичного тиску, який виражається за кінцевою формулою (1.1) показаний на рисунку 1.10. [1]

$$p(r, t) = \frac{j\rho_0 e^{j\omega t}}{\lambda} \int_S \frac{e^{-jkr}}{r} ds \quad (1.1)$$

Де ρ_0 – густина середовища, в якому поширюється хвиля, ω - кутова частота,

λ -довжина хвилі k - кутове число $\int_S \frac{e^{-jkr}}{r} ds$ – інтеграл Релея.

Направленість характеризує поле в дальній зоні. Її визначають на відстані $r \geq 2 \frac{L^2}{\lambda}$, де L – найбільший лінійний розмір випромінювача.

Відповідно до теореми взаємності направленість випромінювача в режимах випромінювання і приймання однакова. Характеристику направленості випромінювача за тиском у загальному вигляді можна виразити функцією $p(r_0, \theta, \varphi)$, де θ і φ – кутові координати рівновіддалених точок.

Відношення

$$\frac{p(r_0, \theta, \varphi)}{p(r_0, \theta_A, \varphi_A)} = |R(\theta, \varphi)| e^{j \arg R(\theta, \varphi)} \quad (1.2)$$

є нормованою характеристикою направленості випромінювача, а її модуль $R(\theta, \varphi)$ називають діаграмою направленості (ДН), яка являє собою в геометричному розумінні деяку поверхню, укладену в сферу одиничного радіуса та яка торкається цієї сфери в координатах θ_A і φ_A . Ці кутові координати визначають напрямок акустичної осі.

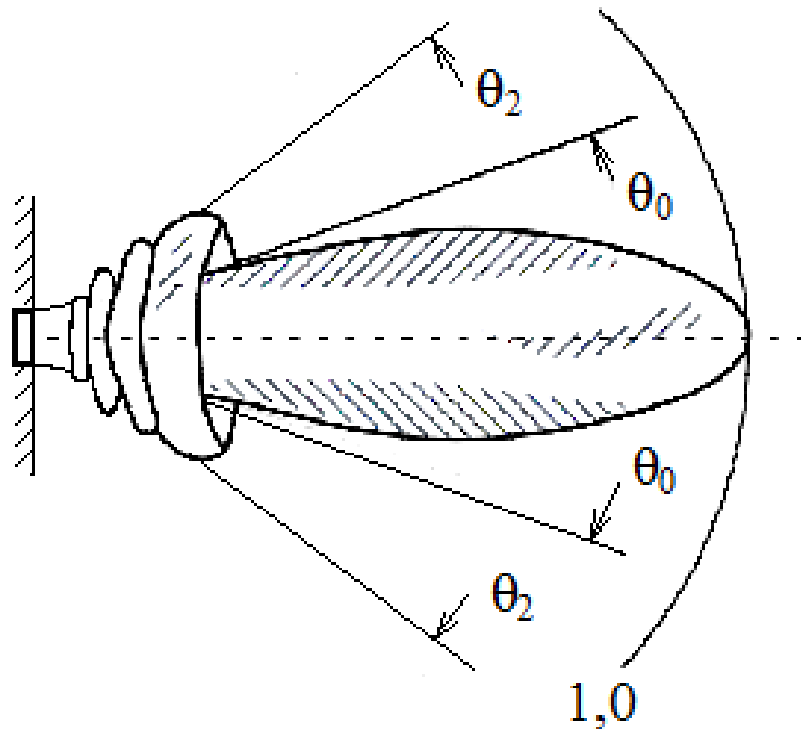


Рис.1.10 Просторове уявлення характеристики направленості випромінювання дискового випромінювача в дальній зоні

Слід від перетину просторової ДН площиною, що проходить через акустичну вісь, є площинною ДН. [1]

ДН відповідно до її визначення (1.1) можна подати для плоского перетворювача в загальному вигляді як відношення виразу (1.3) до його максимального значення:[2]

$$p(r_0, \theta, \varphi) = \frac{jp_0 e^{j(\omega t - kr_0)}}{\lambda r_0} \int_S e^{jk(x \sin \theta \cos \varphi + y \sin \theta \sin \varphi)} dx dy \quad (1.3)$$

$$R(\theta, \varphi) = \frac{1}{S} \int_S e^{jk(x \sin \theta \cdot \cos \varphi + y \sin \theta \cdot \sin \varphi)} dx dy. \quad (1.4)$$

У випадку випромінювача прямокутної форми ДН визначають за формулою

$$R(\theta, \varphi) = \frac{1}{S} \int_{-a}^a \int_{-b}^b e^{jk(x \sin \theta \cdot \cos \varphi + y \sin \theta \cdot \sin \varphi)} dx dy . \quad (1.5)$$

$$p(r_0, \theta) = \frac{j p_0 e^{j(\omega t - k r_0)}}{\lambda r_0} \int_0^{2\pi} \int_0^a e^{jk \rho \sin \theta \cos \gamma} \rho d\rho d\gamma \quad (1.6)$$

Якщо випромінювач подано в полярній системі координат (це стосується, наприклад, дискових випромінювачів), тоді, з урахуванням рівняння (1.6), його ДН в загальному вигляді можна виразити так:

$$R(\theta) = \frac{1}{S} \int_0^{2\pi} \int_0^a e^{jk \rho \sin \theta \cos \gamma} \rho d\rho d\gamma . \quad (1.7)$$

1.3 Діаграма направленості прямокутного випромінювача

Використовуючи формули (1.1) і (1.8) бачимо, що ДН прямокутного випромінювача можна визначити з виразу (1.9)

$$p_{\max}(r_0, \theta, \varphi) = p_0 \frac{2a2b}{\lambda r_0} \left| \frac{\sin(ka \sin \theta \cos \varphi)}{ka \sin \theta \cos \varphi} \right| \cdot \left| \frac{\sin(kb \sin \theta \sin \varphi)}{kb \sin \theta \sin \varphi} \right| . \quad (1.8)$$

$$R(\theta, \varphi) = \left| \frac{\sin(ka \sin \theta \cos \varphi)}{ka \sin \theta \cos \varphi} \right| \cdot \left| \frac{\sin(kb \sin \theta \sin \varphi)}{kb \sin \theta \sin \varphi} \right| . \quad (1.9)$$

Вертикальний перетин просторової діаграми направленості ДН (для $\varphi = 0$) дає площинну вертикальну (умовно) ДН

$$R_{\varphi=0}(\theta) = \frac{\sin(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} . \quad (1.10)$$

де $2a$ - вертикальний розмір випромінювача.

Горизонтальний перетин просторової діаграми (для $\varphi = 0,5\pi$) утворює площинну горизонтальну (умовно) ДН:

$$R_{\varphi=\frac{\pi}{2}}(\theta) = \frac{\sin(kb \sin \theta)}{kb \sin \theta}, \quad (1.11)$$

де $2b$ – горизонтальний розмір випромінювача.

Для виявлення особливостей ДН прямокутного випромінювача проаналізуємо, наприклад, вертикальну ДН.

Основною характеристикою ДН вважається повний розкрив головної пелюстки ДН або розкрив її на рівні 3 дБ ($2\theta_{0,7}$). Повний розкрив головної пелюстки ДН визначається кутом між двома суміжними з акустичною віссю напрямками нульового випромінювання. Напрямки нульового випромінювання можна визначити за умови, що

$$R(\theta) = \frac{\sin(k \sin \theta)}{k \sin \theta} = 0.$$

Скористаємося функцією $\frac{\sin \xi}{\xi}$, графік якої показано на рис. 1.6..

Нульові значення функції відповідають значенням $\xi = m\pi$, де $m = 1, 2, 3, \dots$

Оскільки $\xi = k \sin \theta$, кути нульового випромінювання, між якими формуються основна і бокові пелюстки ДН, визначають так:

$$\theta_0 = \arcsin \frac{\pi}{ka} = \arcsin \frac{\lambda}{2a} = \arcsin \frac{1}{\mathfrak{Z}}$$

$\theta_2 = \arcsin \frac{2}{\mathfrak{Z}}$; $\theta_4 = \arcsin \frac{3}{\mathfrak{Z}}$ і т.д., поки аргумент оберненого синуса не

досягне одиниці. Тут $\mathfrak{Z} = \frac{L}{\lambda} = \frac{2a}{\lambda}$ – хвильовий розмір перетворювача.



Рис. 1.11 Графік функції $\frac{\sin \xi}{\xi}$

Відносні величини максимумів бокових пелюсток можна обчислити з функції $\frac{\sin \xi}{\xi}$, або визначити за табульованою кривою цієї ж функції. Рівні бокових пелюсток: перша – 0,24; друга – 0,12; третя – 0,08 і т.д.

Отримані кути нульового випромінювання і величини максимумів бокових пелюсток дають змогу будувати ДН в декартових або полярних координатах (рис. 1.12 і 1.13). Тут головну пелюстку укладено між суміжними напрямками θ_0 .

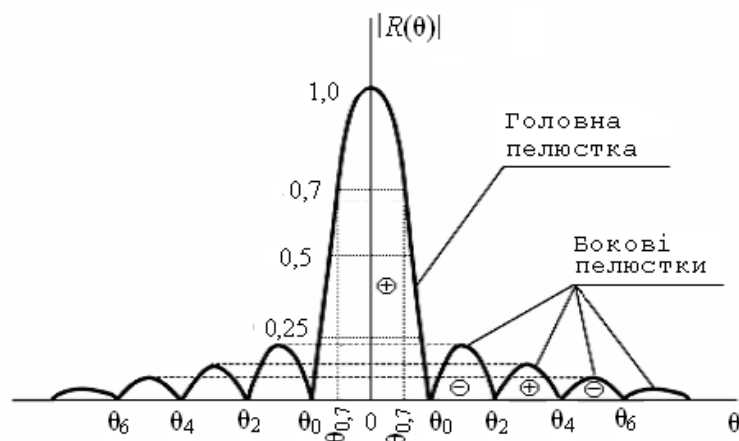


Рис. 1.12 ДН прямокутного випромінювача в декартовій системі координат

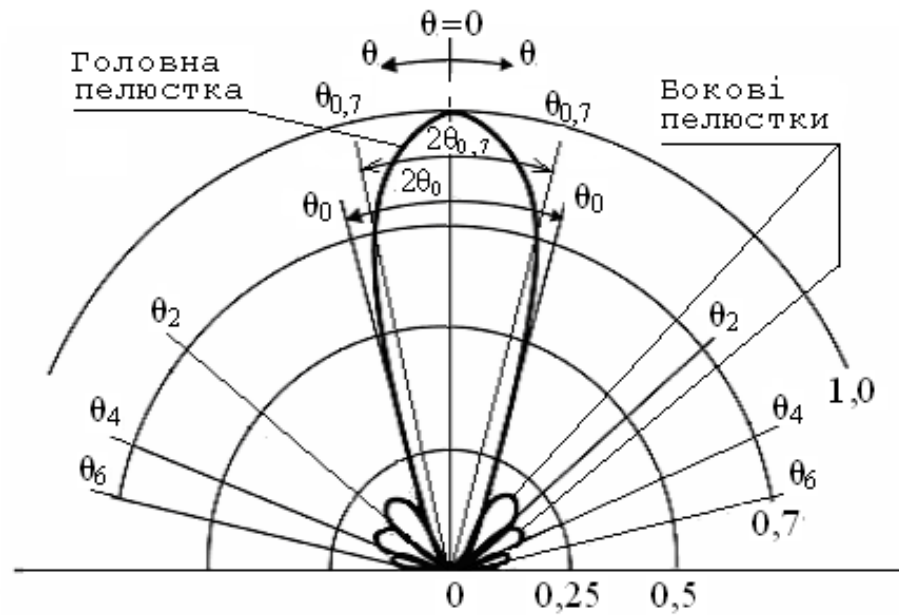


Рис. 1.13 ДН прямокутного випромінювача в полярній системі координат

Таким чином, розкрив головної пелюстки становить кут $2\theta_0$. Для практичних цілей вигідно використовувати розкрив головної пелюстки на рівні декількох децибелів, найчастіше на рівні -3дБ за акустичним тиском ($2\theta_{0,7}$).

Ліворуч і праворуч від головної пелюстки формуються бокові пелюстки. Акустичний тиск у сусідніх пелюстках ДН в протифазі.

Слід зазначити, що відносна величина бокових пелюсток залежить від форми перетворювача і не залежить від його хвильового розміру. Від хвильового розміру перетворювача залежить тільки розкрив головної пелюстки і кількість бокових.[1]

1.4 Діаграма направленості розподіленого перетворювача ФР

Розглянемо лінійну ФР (рис 1.14) з n однакових лінійних випромінювачів завширшки h з періодом d . Як виявлено раніше, ДН окремого лінійного випромінювача в площині $z-x$ не залежить від розміру l , а повністю визначається шириною випромінювача h . Акустичний тиск у

точці M_1 , розміщеній в дальній зоні на відстані r_0 від ФР у площині $z-x$ (якщо $\varphi = 0$), можна визначити з рівняння (1.6) як

$$p_{M_1} = \frac{jp_0 e^{j\omega t} e^{-jkr_0}}{\lambda r_0} hl \frac{\sin(\frac{kh}{2} \sin\theta)}{\frac{kh}{2} \sin\theta}.$$

Цей тиск в точці M_1 створюється одним елементом ФР.

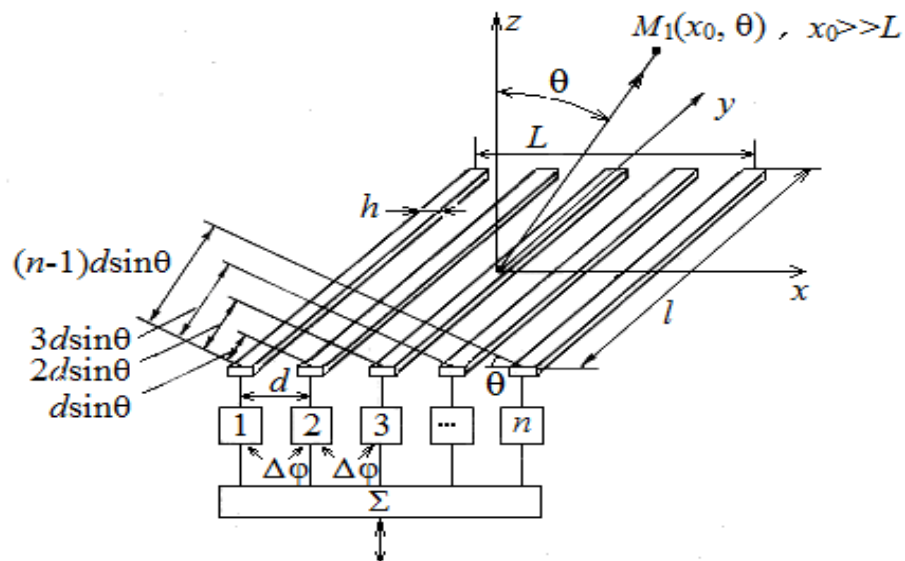


Рис. 1.14 Лінійна фазована решітка

Якщо r_0 – відстань від n -го елемента до точки M_1 , то від решти елементів у міру зменшення їх номерів різниця ходу збільшується на $d \sin \theta$ і для елемента під номером 1 становить $(n-1)d \sin \theta$.

Тоді в точці M_1 з полярними координатами r_0, θ сумарний тиск

$$\begin{aligned} p_{M_1}^{\Sigma} &= \sum_1^n p_{nM_1} = \frac{jp_0 h l e^{j\omega t}}{\lambda r_0} \sum_1^n \frac{\sin(\frac{kh}{2} \sin\theta)}{\frac{kh}{2} \sin\theta} e^{-jk(r_0 + (n-1)d \sin\theta)} = \\ &= \frac{jp_0 h l e^{j(\omega t - kr_0)}}{\lambda r_0} \cdot \frac{\sin(\frac{kh}{2} \sin\theta)}{\frac{kh}{2} \sin\theta} \sum_1^n e^{-jh(n-1)d \sin\theta}. \end{aligned} \quad (1.12)$$

Таким чином, ДН відповідно до її визначення має вигляд

$$R(\theta) = \frac{P \sum_{m_1} (\theta)}{P \sum_{m_1} (\theta = 0)} = \frac{\sin(\frac{kh}{2} \sin \theta)}{\frac{kh}{2} \sin \theta} \cdot \frac{1}{n} \sum_{1}^n e^{-jk(n-1)d \sin \theta}.$$

У цьому рівнянні сума членів геометричної прогресії зводиться до виразу

$$\sum_{1}^n e^{-jk(n-1)d \sin \theta} = \frac{e^{-jknd \sin \theta} - 1}{e^{-jkd \sin \theta} - 1} = \frac{\sin(\frac{kdn}{2} \sin \theta)}{n \sin(\frac{kd}{2} \sin \theta)} e^{-\frac{1}{2} jk(n-1)d \sin \theta},$$

і тоді діаграма направленості лінійної ФГ в площині $z-x$ має загальний вигляд

$$R(\theta) = \frac{\sin(\frac{\pi dn}{\lambda} \sin \theta)}{n \sin(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta)} \cdot \frac{\sin(\frac{\pi h}{\lambda} \sin \theta)}{\frac{\pi h}{\lambda} \sin \theta} e^{-j \frac{\pi d(n-1)}{\lambda} \sin \theta},$$

а її модуль

$$R(\theta) = \left| \frac{\sin(\frac{\pi dn}{\lambda} \sin \theta)}{n \sin(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta)} \right| \left| \frac{\sin(\frac{\pi h}{\lambda} \sin \theta)}{\frac{\pi h}{\lambda} \sin \theta} \right|, \quad (1.13)$$

у якому d , h і n – період, ширина елемента і кількість елементів ФР відповідно.

Якщо врахувати, що $h < \lambda$ (а інакше вузькі ДН окремих елементів ФР у просторі випромінювання можуть не перетнутися і не виникне формувальна ДН ФР просторова інтерференція), то другий співмножник у виразі (1.13) прямує до одиниці, і тоді модуль ДН становитиме:

$$R(\theta) = \left| \frac{\sin\left(\frac{\pi dn}{\lambda} \sin\theta\right)}{n \sin\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin\theta\right)} \right|. \quad (1.14)$$

З виразу (1.11) видно, що максимум ДН розташований у напрямку нормалі до ФГ ($R_{\theta=0} = 1$) і не залежить від відношення $\frac{d}{\lambda}$ – хвильового розміру періоду ФР.

Напрямки нульового випромінювання можна визначити з рівності нулю виразу (1.14), тобто з умови, що

$$\frac{\pi dn}{\lambda} \sin\theta = m\pi \quad m = 1, 2, 3, \dots,$$

звідки

$$\theta = \arcsin \frac{m\lambda}{nd}.$$

Для $m = 1$ отримаємо кутові межі головної пелюстки

$$\theta_0 = \arcsin \frac{\lambda}{nd} \cong \arcsin \frac{\lambda}{L + d},$$

де $L = d(n - 1)$ – розмір ФГ уздовж осі x .

Розхил головної пелюстки дорівнює

$$2\theta_0 = 2\arcsin \frac{\lambda}{L + d}.$$

Якщо більш ретельно розглянути вираз (1.14), то нескладно помітити, що він може мати одиничні значення не тільки, якщо $\theta = 0$. Це можливо також за умови, коли чисельник і знаменник виразу (1.13) згортаються в 0. Тоді з'являються побічні максимуми, що дорівнюють головному. Ця умова має вигляд рівняння

$$R_{\theta \neq 0}(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{\pi dn}{\lambda} \sin\theta\right)}{n \sin\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin\theta\right)} = 1,$$

з якого випливає

$$\sin\left(\frac{\pi dn}{\lambda} \sin\theta\right) = 0,$$

або

$$\frac{\pi dn}{\lambda} \sin\theta = \frac{m}{n} \pi. \quad (1.15)$$

Якщо відношення $\frac{m}{n}$ – ціле число, то наведена умова водночас виконується і для знаменника та є достатньою для побічних максимумів, значення яких легко визначити з виразу (1.15):

$$\sin\theta_g = \frac{m \lambda}{n d} \leq 1, \quad \text{звідки} \quad \frac{d}{\lambda} \geq \frac{m}{n}.$$

Додаткові побічні максимуми не виникають за умови ($\theta_g = 90^\circ$), тобто $\frac{m \lambda}{n d} > 1$ або $\frac{d}{\lambda} < \frac{m}{n}$, де $\frac{m}{n}$ – мінімальне ціле число.

Оскільки m і n – цілі числа, то відсутність додаткових максимумів одиничного рівня не спостерігається за умови

$$d < \lambda \frac{n-1}{n}. \quad (1.16)$$

Якщо зіставити між собою ФГ і монолітний перетворювач з однаковими апертурами ($2a = nd$ і $2b = l$), то відношення створюваного ними акустичного тиску в дальній зоні вздовж акустичної осі (для $\theta = 0$) можна знайти за виразами (1.8) і (1.11):

$$K_F = \frac{p_{M_1 \max}^\Sigma(r_0, \theta = 0)}{p_{\max}(r_0, \theta = 0)} = \frac{h \ln}{2a2b} = \frac{h \ln}{dnl} = \frac{h}{d}. \quad (1.17)$$

Отже, якщо період ФР дорівнює або менший за половину довжини хвилі в об'єкті контролю ДН, то ФР не відрізнятиметься від ДН монолітного

випромінювача з такими самими апертурними розмірами; якщо $d \geq \lambda \frac{n-1}{n}$, то в ДН з'являються додаткові побічні максимуми які починають «проростати», якщо $d = \frac{\lambda}{2}$. [6]

1.5 Фронтальна роздільна здатність

Під фронтальною роздільною здатністю розуміють мінімальну відстань Δl між двома однаковими за величиною точковими дефектами, що роздільно виявляються та залягають в об'єкті контролю на однаковій глибині.

Розглянемо, як визначається фронтальна роздільна здатність в різних зонах випромінювання.

Фронтальна роздільна здатність у дальній зоні ($r_0 > (6-8)r_{\text{бл}}$). Якщо використовувати критерій, що ґрунтується на розрізненні двох точок, якщо акустичний тиск між ними на 3дБ менший від максимального, то фронтальну роздільну здатність в дальній зоні визначають як

$$\Delta l = 2r_0 \sin \theta_{0,7} ,$$

Відповідно до графіка функції $\frac{\sin \xi}{\xi}$ (рис. 1.5) визначимо $\xi_{0,7}$, для якого значення функції становить мінус 3 дБ або 0,707 від максимуму. Тоді $\xi = 1,4$, у зв'язку з чим $\arcsin \theta_{0,7} = 1,4$, звідки

$$\Delta l = \frac{2r_0 \cdot 1,4}{ak} = \frac{2,8}{\pi} r_0 \frac{\lambda}{2a} = 0,88 \frac{r_0 \lambda}{2a} ,$$

Таким чином, роздільне виявлення дефектів у дальній зоні настає для відстані між ними

$$\Delta l \geq 0,88 \frac{r_0 \lambda}{2a} \approx \frac{r_0 \lambda}{2a} . \quad (1.18)$$

Для поліпшення фронтальної роздільної здатності в дальній зоні слід поліпшити спрямованість перетворювача (зменшувати $2\theta_0$) шляхом збільшення його лінійного розміру і частоти. Разом з тим поліпшення фронтальної роздільної здатності можна досягти, застосовуючи фокусувальні перетворювачі або перетворювачі з нерівномірним розподілом поля поблизу перетворювача (розподілені перетворювачі).

Фронтальна роздільна здатність у ближній зоні $r_0 < r_{\text{бл}}$. Якщо перетворювач дисковий, то в ближній зоні промінь не виходить за межі циліндричної поверхні, яку називають трубкою випромінювання. Розміри перетину трубки випромінювання збігаються з розмірами перетворювача. Проте розрізненню дефектів заважають інтерференційні максимуми і мінімуми поля перетворювача. Тому надійне розрізнення дефектів відбудеться, якщо відстань між ними більша, ніж діаметр перетворювача: $\Delta l \geq 2a$.

Фронтальна роздільна здатність в зоні $r_0 \approx r_{\text{бл}}$ (або в межах $r_{\text{б}} \leq r_0 \leq 2,5r_{\text{бл}}$). Зупинимося на визначенні розмірів перетину променя в площині, що проходить через межу ближньої зони, тобто при $r_0 \approx r_{\text{бл}}$. Розглянемо випадок з дисковим перетворювачем за умови, що його радіус перевищує довжину хвилі в середовищі випромінювання, тобто $a > \lambda$.

Скористаємося виразом

$$p(r_0, \theta) = \frac{jP_0 e^{j(\omega t - kr_0)}}{\lambda r_0} \int_0^{2\pi} \int_0^a e^{jk\rho \sin\theta \cos\gamma} \rho d\rho d\gamma,$$

де $r_0 = r_{\text{бл}} = \frac{a^2}{\lambda}$, тоді відносний розподіл акустичного тиску на межі

ближньої зони становитиме:

$$\begin{aligned}
R(\theta) &= \frac{p(r_{\text{бл}}, \theta)}{p(r_{\text{бл}}, \theta = 0)} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^a e^{jk(\rho \sin \theta \cos \lambda - \frac{\rho^2 \lambda}{2a^2})} \rho d\rho d\gamma}{\int_0^{2\pi} \int_0^a e^{-jk \frac{\rho^2 \lambda}{2a^2}} \rho d\rho d\gamma} = \\
&= \frac{j}{2a^2} \int_0^a e^{-jk \frac{\rho^2 \lambda}{2a^2}} \left(\int_0^{2\pi} e^{jk\rho \sin \theta \cos \lambda} d\gamma \right) \rho d\rho.
\end{aligned} \tag{1.19}$$

Розв'язок внутрішнього інтеграла виразу (1.19) є функцією Бесселя нульового порядку, помноженою на 2π

$$\int_0^{2\pi} e^{jk\rho \sin \theta \cos \lambda} d\gamma = 2\pi J_0(k\rho \sin \theta).$$

Таким чином, відносний розподіл комплексної величини акустичного тиску в площині, що проходить через межу ближньої зони, складає

$$R(\theta) = \frac{j\pi}{a^2} \int_0^a e^{-jk \frac{\rho^2 \lambda}{2a^2}} J_0(k\rho \sin \theta) \rho d\rho.$$

Розглянемо дійсну частину цього виразу у вигляді

$$\begin{aligned}
\text{Re } R(\theta) &= \frac{\pi}{a^2} \int_0^a \sin \left(\pi \frac{\rho^2}{a^2} \right) J_0(k\rho \sin \theta) \rho d\rho = \\
&= \frac{\pi}{2} \int_0^a \sin \left(\pi \left(\frac{\rho}{a} \right)^2 \right) J_0 \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \left(\frac{\rho}{a} \right) \sin \theta \right) d \left(\frac{\rho}{a} \right)^2 = \\
&= \frac{\pi}{2} \int_0^1 \sin \pi x J_0 \left(\pi (\mathfrak{S} \cdot \sin \theta) \sqrt{x} \right) dx,
\end{aligned} \tag{1.20}$$

де \mathfrak{S} – хвильовий розмір випромінювача; $x = d \left(\frac{\rho}{a} \right)^2$ – нормована змінна.

За раніше прийнятих умов можна зробити спрощення

$$\Im \sin \theta = \frac{2a}{\lambda} \frac{\rho_r}{r_0} = \frac{2\rho}{a},$$

тоді вирази (1.20) можна записати у вигляді

$$\operatorname{Re} R\left(\frac{\rho_r}{a}\right) = \frac{\pi}{2} \int_0^1 \sin \pi x J_0\left(\frac{\rho_r}{a} 2\pi\sqrt{x}\right) dx. \quad (1.21)$$

У результаті числового інтегрування виразу (1.20), де параметром є $\frac{\rho_r}{a}$, можна отримати розмір кружка Ейрі, а також ефективний розмір пучка в перетині на межі ближньої зони.

Наприклад, діаметр кружка Ейрі на підставі графіка визначають з умови

$$a = \frac{\rho_r}{a} \Rightarrow d_r = 2\rho_r = 2\alpha a$$

відповідно і розмір перетину променю на рівні мінус 3дБ складе

$$2\rho_{r(0,7)} = 2\gamma a.$$

Із виконаного аналізу можна зробити висновок, що найвища фронтальна роздільна здатність площинного монолітного перетворювача спостерігається на глибині $h \cong r_{0L}$ і становить близько 80% від діаметра перетворювача.[7]

1.6 Типи лінійних ФР та основні вимоги до них

На рис.1.15 представлені основні типи лінійних ФР, призначені для роботи в луно-імпульсному режимі:

– контактна нормальна сумісна ФР (рис. 1.15 а) забезпечує в об'єкті контролю динамічне фокусування і сканування УЗ променем у секторі $\pm 45^\circ$ з використанням поздовжніх хвиль;

– контактна похила сумісна а ФАР ПЕП (рис. 1.15 б) забезпечує в об'єкті контролю динамічне фокусування і поздовжнє (вздовж нахилу призми)

сканування УЗ променем у секторі $30^\circ - 70^\circ$ з використанням поздовжніх або поперечних хвиль зі стандартними кутами введення;

– контактна похила поєднана ФР (рис.1.15, в) забезпечує в об'єкті контролю динамічне фокусування і поперечне (поперек нахилу призми) сканування УЗ променем у секторі $\pm 60^\circ$ з використанням поперечних хвиль, при цьому кути нахилу площини сканування можуть приймати значення, що відповідають стандартним кутам введення поперечних хвиль при поздовжньому скануванні;

– контактна похила роздільно-сумісна ФР (рис. 1.15, г) забезпечує в ОК динамічне фокусування і поздовжнє сканування УЗ променем у секторі $0^\circ - 70^\circ$ з використанням поздовжніх хвиль або в секторі $30^\circ - 70^\circ$ з використанням поперечних хвиль;

– імерсійним похилі суміщені ФАР ПЕП з поздовжнім (рис. 1.15, д) і поперечним (рис. 1.15, е) скануванням аналогічні ФР, представленим, відповідно, на рис.1.15, б і 1.15, в. При цьому основною відмінністю імерсійних ФР від контактних, є використання рідинної призми замість твердо тільної, що потребує зменшення кутів падіння УЗ променю на межу розділу для забезпечення тих же секторів сканування і типів УЗ хвиль, в сталі, які прийняті для вищевказаних контактних ФАР ПЕП.[4]

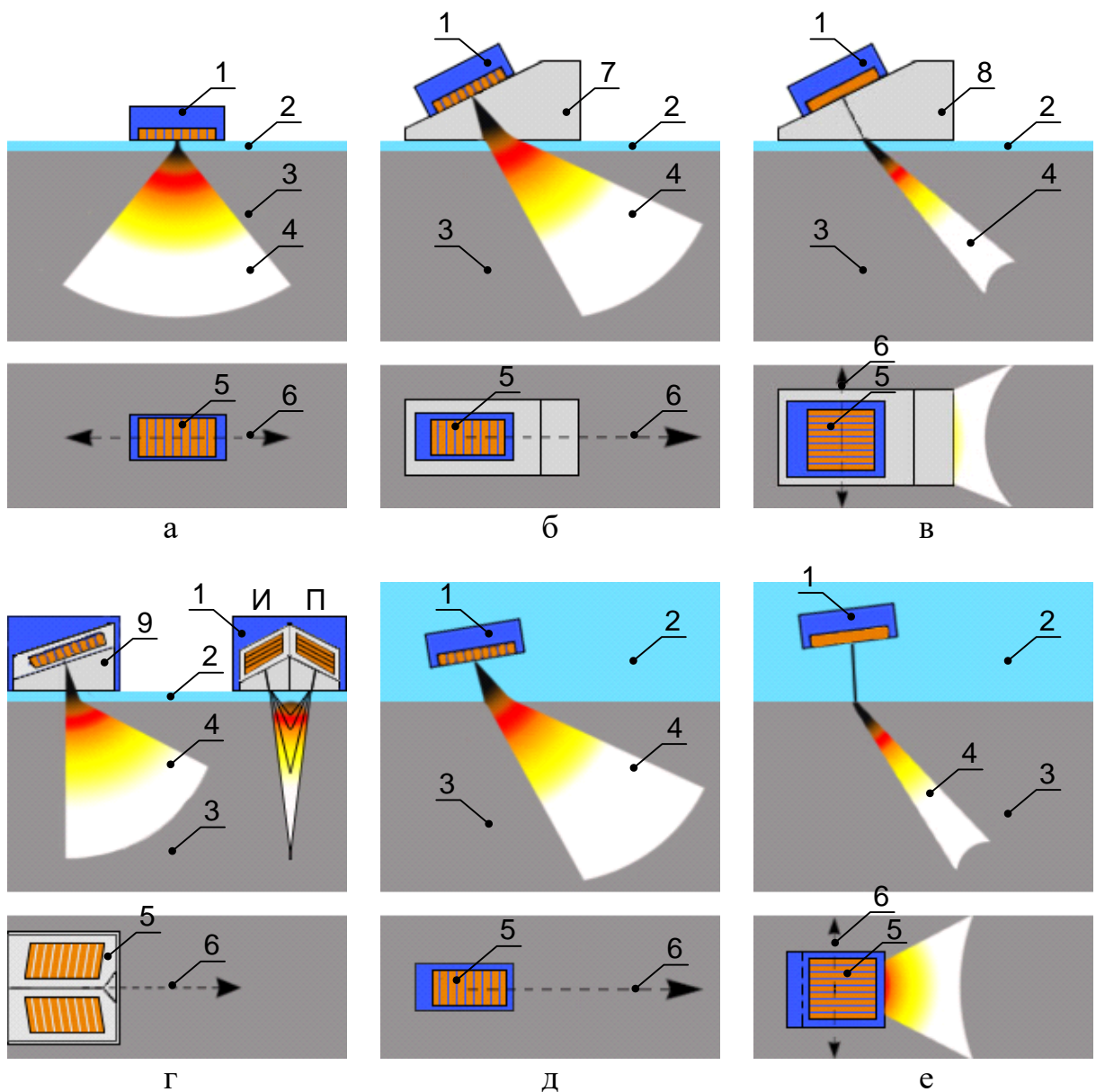


Рис 1.15. - Основні типи лінійних ФАР ПЕП: а - контактна нормальна сумісна; б, в - контактні похилі суміщені, відповідно, з поздовжнім і поперечним скануванням; г - контактна похила роздільно-сумісна; а, б, в, г - можуть використовуватися в щільовому варіанті; д, е - імерсійним похилі суміщені, відповідно, з поздовжнім і поперечним скануванням; д, е - можуть використовуватися в контактньо-імерсійному варіанті; 1 ФР; 2 - шар контактної або імерсійної рідини; 3 - об'єкт контролю; 4 - сектор контролю; 5 - п'єзоперетворювачі; 6 - напрямок сканування; 7, 8, 9 – призми.

1.7 Основні вимоги до лінійних ФР

Лінійні ФР повинні відповідати таким основним вимогам:

1. Досягнення мінімальної ширини основної пелюстки імпульсної характеристики спрямованості і мінімального рівня її бічних пелюсток при скануванні досліджуваного простору контрольованого об'єкта.
2. Досягнення максимально широкої смуги пропускання п'єзоперетворювачів ФР, тобто Забезпечення мінімальної тривалості зондувальних імпульсів і перехідних процесів (малій інерційності) при перетворенні сигналів.
3. Забезпечення високої чутливості: ця вимога сприяє поліпшенню співвідношення сигнал - шум, що важливо при обробці луносигналів.
4. Зниження шумів в п'єзоперетворювачі ФР, т. Е. Поліпшення їх ревербераційній-шумових характеристик.
5. Узгодження повних електричних опорів п'єзоперетворювачів ФР з багатоканальними генераторами і приймачами.
6. Досягнення максимального акустичного узгодження та максимальної стабільності акустичного контакту п'єзоперетворювачів ФР з ОК

1.8. Побічні ефекти їх класифікація і вплив на характеристики ФР

Побічні ефекти, що виникають в лінійних ФР можна умовно розділити на дві групи:

- ефекти, які стосуються окремих п'єзоперетворювачів ФР: інерційність коливань; збудження "паразитних" мод коливань; дію ефективної апертури;
- ефекти, що відносяться до решітки п'єзоперетворювачів: взаємний зв'язок між елементами; ефекти, обумовлені не ідентичністю і неточністю просторового положення елемента; розширення ультразвукового променя при скануванні; крайові ефекти.

Інерційність коливань - властивість п'єзоперетворювача зберігати коливальний стан протягом певного часу після припинення дії збуджуючого

імпульсу стандартної форми: одиничного стрибка $\sigma(t)$ (функція Хейвісайда) або одиничного імпульсу $\delta(t)$ (функція Дірака). Цей стан являє собою перехідний процес, причини виникнення якого в основному обумовлені: багаторазовими відбиттям акустичних хвиль у конструктивних елементах ФР і наявністю в п'єзоелементі кількох областей електроакустичного перетворення енергії. У нашому випадку, для п'єзоелемента у формі паралелепіпеда, перетворення енергії здійснюється на його двох протилежних поверхнях, покритих електродами. Ці поверхні в режимі випромінювання генерують два ультразвукових імпульси, відстаючих один щодо одного на час $t_0 = h_1/v$, де h_1 - товщина п'єзоелемента, v - швидкість ультразвуку. Звідси випливає, що мінімально досяжна тривалість перехідного процесу в однорідному п'єзоелементі з плоско паралельними поверхнями обумовлена його товщиною і не може бути отримана коротше t_0 . Форма і тривалість перехідного процесу в ФР в основному залежать від співвідношення акустичних опорів п'єзоелемента, демпфера, узгоджувального і захисного шарів, об'єкта дослідження, а також електричного навантаження і електромеханічних властивостей п'єзоматеріала.

Збудження "паразитних" мод коливань п'єзоелемента по ширині - ефект, що виникає в п'єзоелементі паралелепіпедної форми із співвідношенням геометричних розмірів: $l \gg w_0, h_1$ а $w_0 \approx h_1$, при порушенні основної моди коливань п'єзоелемента по товщині h_1 . Суть цього ефекту полягає у взаємодії в п'єзоелементі двох із трьох систем резонансних коливань, обумовлених пов'язаними між собою поздовжніми модами коливань по товщині і поперечними модами коливань по ширині, так як їхні власні частоти коливань близькі один до одного. При цьому корисною слід вважати лише основну (нижчу) поздовжню моду коливань по товщині, діючу в напрямку вектору поляризації п'єзоелемента. Причини виникнення "паразитних" мод коливань п'єзоелементів обумовлені сумірністю їхніх геометричних розмірів

по товщині h_1 і ширині w_0 . Це пояснюється необхідністю виконання загальноприйнятих вимог до проектування конструкцій лінійних ФР, в результаті чого п'єзоелементи решітки мають геометричні розміри по довжині l значно більше, ніж по ширині w_0 і товщині h_1 , а розміри по ширині і товщині мають один порядок, тобто є спів вимірні. Наявність паразитних мод коливань по ширині суттєво впливає на тимчасові характеристики ФР. При співвідношенні геометричних розмірів $w_0/h_1 = 0,7 \div 1,7$ п'єзоелемента в його імпульсній характеристиці з'являються складові, обумовлені резонансними частотами, близькими один до одного, які відповідають двом сильно вираженим модам коливань: нижчої поздовжньої моді коливань по товщині і нижчої поперечної моді коливань по ширині, що призводить до збільшення тривалості перехідних процесів і, отже, до збільшення тривалості зондувальних ехоімпульсів, тобто. до погіршення поздовжньої роздільної здатності ФР. Крім того, на підставі результатів, отриманих в роботі дію побічної моди коливань по ширині суттєво погіршує поперечну роздільну здатність лінійної ФР.

Збудження паразитної моди коливань "маса - пружина" - ефект, що виникає в коливальній системі "п'єзоелемент - демпфер" і являє собою гармонійний осцилятор, в якому п'єзоелемент діє як концентрована маса, а демфуючий шар як пружина. Ця мода збуджується за наявності асиметричного навантаження на двох протилежних гранях п'єзоелементів, при цьому одні грані взаємодіють з робочим середовищем, а інші з демпфером. Основні труднощі викликає той факт, що резонансна частота "паразитної" моди коливань розташована поблизу резонансної частоти основної корисної моди коливань п'єзоелемента по товщині, у зв'язку з чим, електрична фільтрація "паразитної" моди малоефективна. Ця мода коливань володіє високою добротністю і, в випадку її порушення, відбувається зростання тривалості ревербераційній-шумової характеристики і, отже, це призводить до

збільшення протяжності мертвої зони. Крім того, мода "маса - пружина" породжує сильний взаємний зв'язок між елементами ФР, вплив якої збільшує ширину основної пелюстки ДН, тим самим, погіршує поперечну роздільну здатність ФР.[10]

Дія ефективної апертури - ефект, що проявляється у вигляді збільшення площі приймально-випромінюючих поверхонь (апертур) п'єзоелементів ФР. Причина виникнення цього ефекту полягає у відсутності жорсткого звукопоглинального екрана навколо приймально-випромінюючих поверхонь п'єзоелементів, що пов'язано з приєднанням до цих поверхнях суцільного захисного (або узгоджувального) шару і обумовлена наступним:

- в режимі випромінювання - розбіжністю ультразвукових пучків, випромінені активними поверхнями п'єзоелементів, при проходженні через суцільний захисний (або узгоджувальний) шар в об'єкт контролю;

- в режимі прийому - реакцією п'єзоелементів на збуджуючі їх ультразвукові хвилі, що прийшли з об'єкта контролю через ділянки поверхні суцільного захисного (або узгоджувального) шару більші за площею, ніж активні поверхні п'єзоелементів.

Збільшення апертури окремих п'єзоперетворювачів веде до звуження їх ДН, в наслідок чого, п'єзоперетворювачі можуть не випромінювати в тих напрямках, де формуються бокові пелюстки ФР, що дозволяє зменшити їх рівень. Однак, звужуючи ДН п'єзоперетворювачів ФР, зменшується сектор, в якому проводиться сканування основним пелюсткою ДН лінійної ФР. При цьому ширина основної пелюстки ДН змінюється мало.

Взаємний зв'язок - ефект, при якому електричне збудження одного з п'єзоперетворювачів ФР призводить до випромінювання акустичних хвиль безпосередньо цим же елементом та більш менш усіма іншими.

Існують два види взаємного зв'язку між п'єзоперетворювачами ФР:

1. Електрична взаємний зв'язок, при якій електричний збудливий імпульс, поданий на один з п'єзоперетворювач може впливати на інші через

ємність, опір, індуктивність або по кабелю, що сполучають п'єзоперетворювачі з приймачами. При збудженні п'єзоперетворювачів електричним імпульсом великої амплітуди в п'єзоелементі накопичується значний заряд. У міру того, як заряд зменшується, п'єзоелемент створює акустичні хвилі, які збуджуються уздовж ФР і збуджують інші п'єзоперетворювачі, які, в свою чергу, перетворюють ці хвилі в електричні імпульси. У режимі прийому амплітуда цих імпульсів може бути порівнянна з амплітудою корисних луна-сигналів. Електричний взаємний зв'язок призводить до збільшення реверберації, тобто до збільшення протяжності мертвої зони.

2. Акустична взаємний зв'язок виникає через збудження та поширення різних типів хвиль в конструктивних елементах ФР. У основі демпфера може поширюватися хвиля Релея, амплітуда руху частинок якої згасає експоненційно далеко від вільної поверхні, в шарі глибиною у дві довжини хвилі. Одним з ефективних методів придушення цієї хвилі є руйнування траєкторії її поширення, тобто. різання пазів на глибину $h = 2\lambda$, де λ - довжина хвилі в матеріалі остови.

У захисному шарі залежно від навантаження може виникати хвиля Лемба, яка має два види:

– симетрична мода, при русі поверхонь шару в протилежних напрямках один від одного;

– асиметрична, при русі поверхонь шару в одному напрямку.

Обидва види хвиль дисперсійні і містять багато гармонік.

Взаємний зв'язок між елементами ФР призводить до збільшення їх активних апертур. Це означає, що ДН п'єзоперетворювачів будуть вужчі. При цьому ФР в процесі сканування може мати "сліпі точки" тобто, певні кутові напрямки, які вона не зможе опитувати. Крім того, ширина основної пелюстки ДН також збільшується, що погіршує поперечну роздільну здатність ФР.

Взаємний зв'язок сприяє збільшенню тривалості перехідних процесів в п'єзоперетворювачів ФР, в результаті чого збільшується тривалість зондуючих імпульсів і, отже, зменшується повздовжня роздільна здатність ФР.[11]

1.9 Висновки до розділу

В першому розділі переставлені теоретичні основи проведення контролю ультразвуковими датчиками. Розглянуті основні види ФР, та надано класифікація побічних ефектів, які виникають у ФР.

Запропоновано використання датчиків на базі ФР, для проведення контролю людських кісток. Використання ФР має ряд переваг:

- Зменшення кількості датчиків, що призводить до зменшення габаритних розмірів матриці.

- Можливість електронного сканування забезпечує дослідження з високою вірогідністю, та відповідно методиці проведення контролю людських кісток.

Використання ФР значно ускладнило систему. До електронного тракту необхідно виставити ряд вимог що збільшить вартість розробки, та ускладнить проектування.

При проведенні контролю необхідно враховувати трансформацію хвиль, а контроль в ближній зоні.

Також необхідно використовувати методи пригнічення побічних ефектів, які впливають на роздільну здатність перетворювачів.

РОЗДІЛ 2

Дослідження методів підвищення роздільної здатності перетворювачів на базі ФР.

В даному розділі проведений аналіз методів пригнічення побічних ефектів які впливають на роздільну здатність перетворювачів. Проведене моделювання ДН ФР, з урахування впливу побічних ефектів. Встановлені методи які дозволило підвищити роздільну здатність, та спростити електронний тракт системи. Розглянута можливість використання програмного забезпечення comsol multiphysics для проведення моделювання акустичного поля в ОК. Надані рекомендації для проведення контролю ближній зоні, та по інтерпретації результатів при трансформації хвиль.

2.1. Аналіз методів пригнічення побічних мод коливань в перетворювачах на базі ФР

Найбільш впливовим побічним ефектом є побічні моди коливань, тому розглянемо методи їх пригнічення.

З усіх взаємодіючих мод коливань в перетворювачі на базі ФР корисною можна вважати тільки нижчу повздовжню моду коливань п'єзоелемента по товщині, діючу в напрямку вектору поляризації, при цьому інші моди коливань є побічними або «паразитними».

Такий характер взаємодії між модами коливань обумовлений вибором співвідношень геометричних розмірів п'єзоелемента, які визначаються на підставі наступних загальноприйнятих вимог до проектування ФР.

– довжина п'єзоелемента l визначається виходячи з необхідної ширини ДН решітки в площині, перпендикулярній площині сканування, при цьому значення цієї ширини прагнуть наблизити до значень ширини ДН в площині сканування, що дозволяє досягти кращої просторової роздільної здатності ФР.

– ширина п'єзоелемента w_0 дорівнює $w_0 = d - b$; де $d = \lambda_{cp}/2$ – крок решітки, який визначається з умови відсутності додаткової пелюстки ДН, яка б дорівнювала основній, при заданому секторі сканування ФР, λ_{cp} – довжина хвилі ультразвукових коливань в контрольованому середовищі; b – ширина паза між п'єзоелементами, яка вибирається якомога менше, виходячи з умови мінімальних втрат енергії при випромінюванні і прийомі ультразвукових коливань, але не менш, ніж необхідно для забезпечення заданого рівня ослаблення взаємного зв'язку між п'єзоелементами ФР;

– товщина h_1 визначається з умови збудження в п'єзоелементі в напрямку вектору поляризації основного пів хвильового резонансу на заданій частоті $h_1 = \lambda_{пз}/2$, де $\lambda_{пз} = c/f$ $\lambda_{пз}$. c . f - відповідно, довжина хвилі, швидкість поширення і частота ультразвукових коливання основної поздовжньої моди в п'єзоелементі.

В результаті виконання зазначених вимог довжина п'єзоелемента l стає однаковою з розміром бази решітки L , а його товщина h_1 однаковою з шириною w_0 , при цьому виконується умова $l \gg w_0, h_1$. Отже, співвідношення геометричних розмірів п'єзоелемента w_0/h_1 визначає склад мод коливань в перетворювачі на базі ФР.

Наявність в п'єзоперетворювачі побічних мод коливань перешкоджає його роботі в одномодовому режимі випромінювання (прийому) ультразвукових імпульсів, що знижує поперечну роздільну здатність ФР. На жаль, спроба усунути побічні моди коливань п'єзоелементів при зазначеному відношенні w/h шляхом застосування електричної фільтрації виявляється не надто ефективною, оскільки в цьому випадку потрібно фільтр з високою добротністю, щоб усуваючи побічні моди коливань не вплинути на основну моду коливань і, тим самим, не погіршити параметри корисного імпульсу

Представлені існуючі методи пригнічення побічних мод коливань в перетворювачах на базі ФР:

- метод пригнічення "паразитних" поперечних мод коливань п'єзоелементів по ширині і варіанти його реалізації;
- метод пригнічення моди коливань "маса - пружина" в коливальній системі "п'єзоелемент - демпфер".

Метод пригнічення "паразитних" поперечних мод коливань п'єзоелементів розглянутий на прикладі п'єзоелемента ФР рис 2.1.

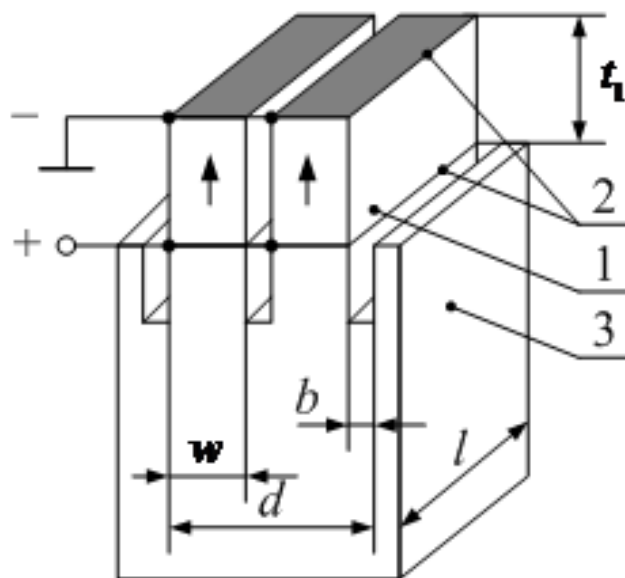


рис 2.1 Окремі п'єзоелементи ФР та схема їх включення: 1 - п'єзоелементи, 2 - електроди, 3 – демпфер.

П'єзоелемент перетворювача ФР додатково розділений на ряд індивідуальних п'єзоелементів (рис 2.1.), які за допомогою паралельного електричного з'єднання сигнальними провідниками об'єднані в групу (як мінімум по два).

Загальна ширина поверхні випромінювання (прийому) ультразвукових коливань такої групи, включаючи ширину пазів, приблизно дорівнює половині довжини хвилі в середовищі, тобто $\lambda_{cp}/2$, а ширина поверхні кожного

індивідуального п'єзоелемента групи, принаймні, менше $\lambda_{cp}/4$. Індивідуальні п'єзоелементи, отриманого перетворювача ФР мають паралелепіпедну форму і виконані з співвідношеннями геометричних розмірів: $l \gg w, t_1$ $w/h < 0.7$;

При обраному відношенні w/h , при зменшенні ширини w та не змінний h , в індивідуальних п'єзоелементів перетворювача збільшується інтервал між резонансними частотами основний повздовжньої моди коливань по товщині та ширині. Крім того, зменшуються втрати енергії збуджуючого електричного поля на пов'язані коливання, що призводить до перерозподілу енергії між основною і побічними модами коливань на користь основної моди.

В цьому випадку є доцільним проводити електронну фільтрацію.

Метод пригнічення моди коливань "маса - пружина" в коливальній системі "п'єзоелемент - демпфер".

Відомо що, величина добротності Q моди коливань "маса - пружина" є значно більшою у порівнянні з основною модою коливань по товщині. З літератури відомо що, величина добротності для моди коливань "маса - пружина" у разі використання вольфрам-вінілового демпфера становить $Q = 6 \div 10$, що істотно впливає на коливання основного резонансу п'єзоелемента по товщині, збільшуючи тривалість його ревербераційній-шумової характеристики. На жаль, ця побічна мода коливань має частоту, близьку до частоти моди коливань п'єзоелемента по товщині, що не дозволяє з допомогою електричної фільтрації провести її усунення, не погіршуючи при цьому параметри імпульсу.

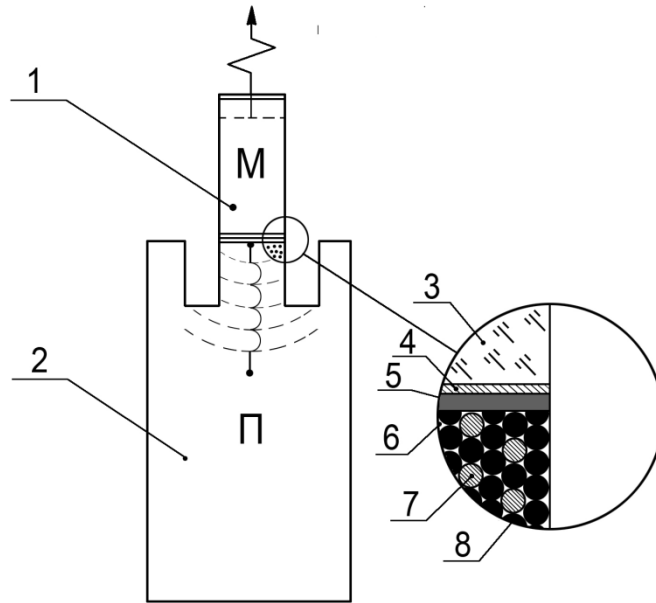


Рис. 2.2 Модель окремого п'єзоелемента лінійної ФР, 1 - п'єзоелемент; 2 - демпфер; 3 - п'єзокераміка; 4 - електрод; 5 - клей; 6 - пори; 7 - сполучний компонент; 8 - порошок вольфраму; 9 - припій; 10 - металізація; 11 – компаунд

Представлена модель окремого п'єзоелемента лінійної ФР (рис. 2.2,) є результатом реалізації розробленого методу пригнічення побічної моди коливань "маса - пружина" в коливальній системі "п'єзоелемент - демпфер" шляхом різкого зниження її добротності. Відповідно до формули (2.1) для зменшення добротності потрібно пониження частоти коливань, збільшення швидкості ультразвукових хвиль в демпфері, а також збільшення їх загасання в матеріалі демпфера.

$$Q_{МП} = \frac{\pi \cdot f_{МП}}{\alpha \cdot V_0}, \quad (2.1)$$

де V_0 - швидкість звуку в демпфері, α - коефіцієнт затухання коливань в демпфері, $f_{МП}$ - частота коливань.

Так, введення в демпфер 2 компонента (компаунда) 11 усуває пори 6 і, тим самим, збільшує пружну постійну матеріалу демпфера $C_{эфф}$, що в свою чергу, підвищує швидкість поширення в ньому ультразвукових хвиль V_0 при незначному збільшенні його густини ρ_0 (2.2).

$$V_0 = \sqrt{\frac{C_{\text{эфф}}}{\rho_0}} \quad (2.2).$$

Крім того, за рахунок заповнення пор β зростає поглинання ультразвукових хвиль внаслідок збільшення в'язкого тертя частинок матеріалу демпфера в умовах взаємного переміщення, тобто. Зростає коефіцієнт затухання коливань α (2.3).

$$\alpha = \alpha_0 \cdot f^n, \quad (2.3)$$

де f – частота ультразвуку в демпфері

Розміщення між поверхнею нижнього електрода 4 п'єзоелемента 1 і металізованої поверхнею 10 демпфера 2 шари припою 9 забезпечують додаткове збільшення коефіцієнта загасання α , а також деяке збільшення ефективної маси $m_{\text{эфф}}$, приєднаної до п'єзоелементи 2. Враховуючи це, а також те, що збільшення $C_{\text{эфф}}$ призводить до збільшення коефіцієнта пружності $K_{\text{эфф}}$ системи "п'єзоелемент - демпфер" її власна частота $f_{\text{МП}}$ практично не зміниться (2.4).

$$\omega_{\text{МП}} = \sqrt{\frac{K_{\text{эфф}}}{m_{\text{эфф}}}}, \quad (2.4).$$

Таким чином, розроблена модель окремого перетворювачка лінійної ФР з урахуванням вжитих заходів забезпечує повне пригнічення побічної моди коливань "маса - пружина". [6]

2.2. Моделювання ДН перетворювачів на базі ФР

На основі інформації, яка була представлено в попередньому пункті, можна сказати що метод пригнічення побічних пелюсток заснований на:

зменшенні пружного зв'язку між основною повздовжньою модою коливань п'єзоелемента по товщині та побічної поперечної модою коливань по ширині за рахунок розширення інтервалів між частотою резонансу мод їх парціальними частотами, а також зменшення пов'язаності між ними шляхом

вибору оптимального відношення геометричних розмірів п'єзоелемента:
 $w/t_1 < 0,7; (w_1 \div w_2)/t_1 < 0,7;$

Проведено побудову ДН ФР в математичному середовищі Matlab використовуючи математичну залежність (1.11). На підставі формули можемо отримати ДН змінюючи параметри перетворювача.

Розрахунок поля ФР проводиться відповідно до п. 1.1.2. Визначаємо сумарний тиск в кожній точці поля, який виникає в результаті дії кожного елемента ФР.

Моделювання ДН ФР та монолітного перетворювача показує що поділ перетворювача на окремі елементи знижує рівень бокових пелюсток (рис. 2.3). Безумовно використання призводить до покращення достовірності, Зникає вірогідність не вірної інтерпретації результатів.

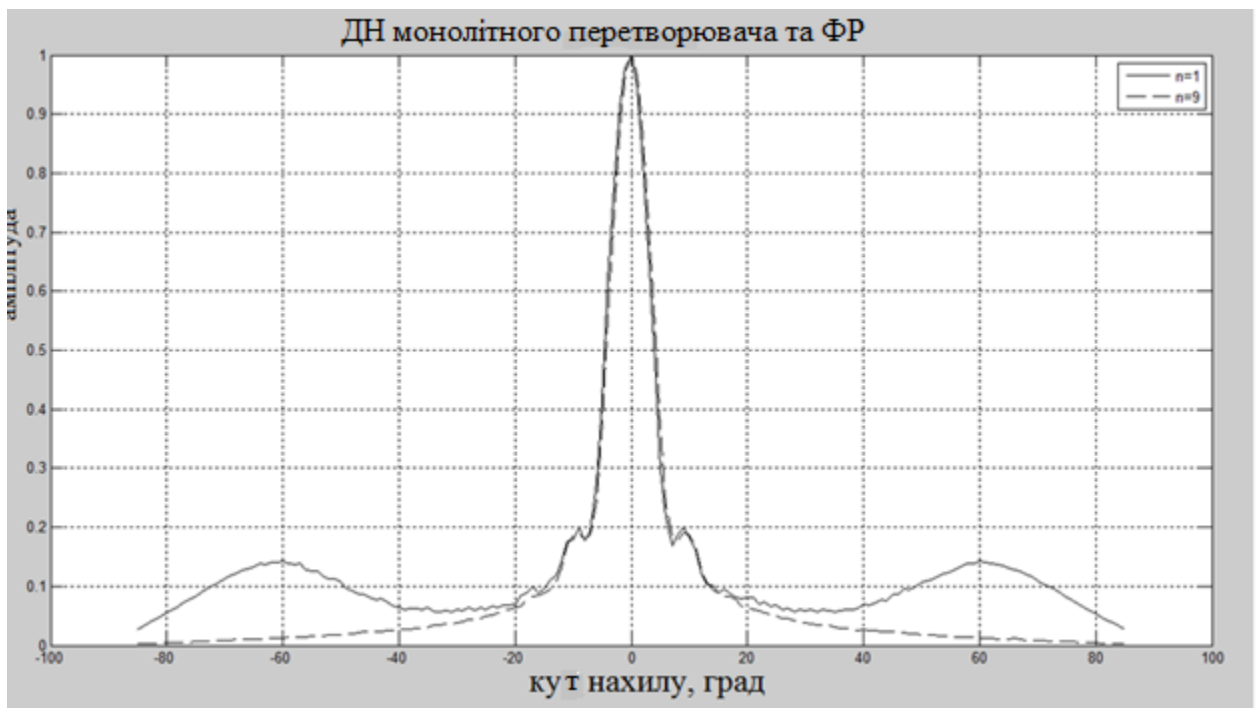


Рис. 2.3 ДН монолітного перетворювача та перетворювача на базі ФР при куті нахилу 0°.

Було проведено побудову ДН при відхиленні акустичної осі на кут від 0° до 40° з кроком 10°.

Результат моделювання показаний на рис 2.4. видно що при збільшенні кута нахилу збільшується амплітуда бокової пелюстки.

Таблиця 2.1 Амплітуди бокових пелюсток в залежності від кута нахилу.

A	Кут, °	A,	Кут,°
0,05	0	0,18	0
0,05	10	0,22	10
0,12	20	0,21	20
0,25	30	0,24	30
0,475	40	0,275	40

Також побічні ефекти впливають на ширину розкриву головної пелюстки, що погіршує роздільну здатність (рис 2.5).

Таким чином можна зробити висновок що, при обраних геометричних розмірах ФР, доцільним є проведення контроль в кутах відхилення не більше ніж 15° . Якщо є необхідність відхилити промінь на більший кут, в такому випадку можна обирати крок решітки $d \leq \lambda / 2$. Зменшення кроку решітки призведе до збільшення елементів в ФР, в наслідок цього збільшиться кількість електронних трактів. [12]

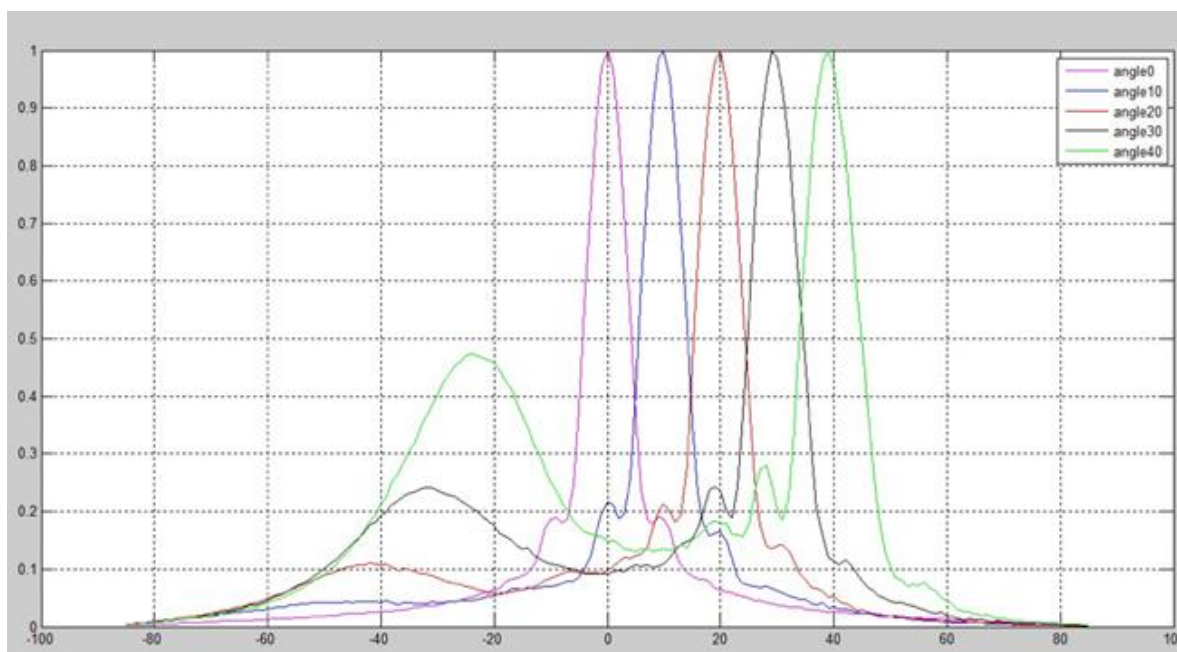


Рис.2.4 Залежність ДН від кута нахилу променю для n=8.

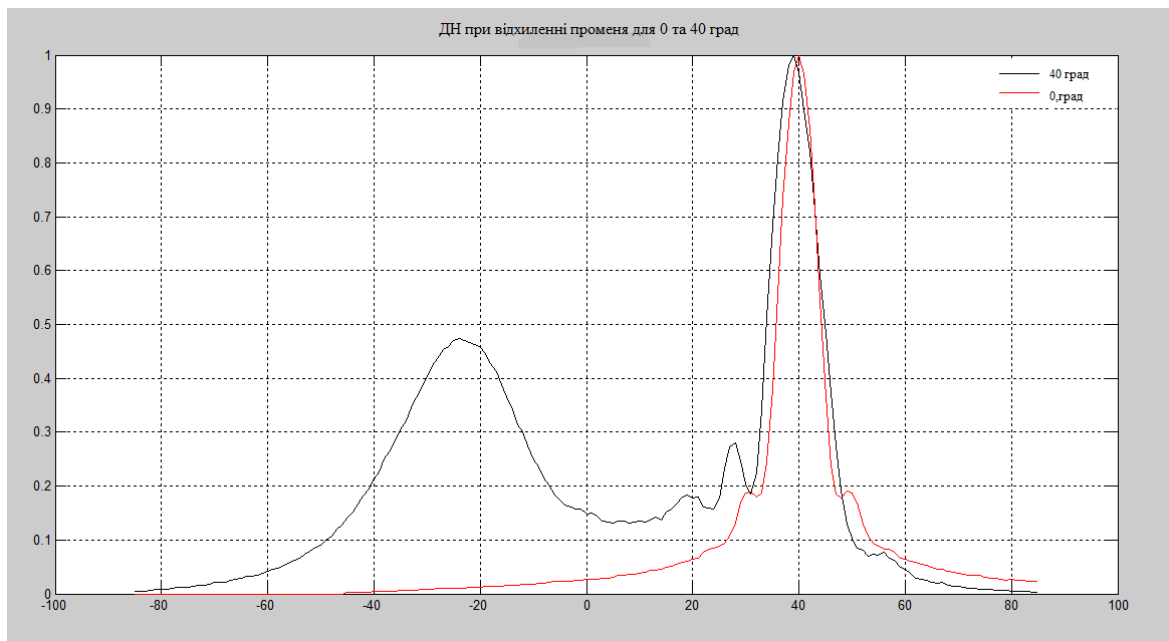


Рис.2.5 Залежність ДН від кута нахилу променю.

Використаємо методи боротьби з побічними ефектами, які були описані раніше. Якщо кожен елемент заданої решітки поділити навпіл, при цьому з'єднати їх електрично, то частота побічних коливань буде відрізнятися від резонансної частоти значним чином. Це призведе до зменшення побічних пелюсток, та зменшить розходження ширина головної пелюстки при відхиленні кута. (рис 2.6).

Таблиця 2.2. Амплітуди бокових пелюсток в залежності від кута нахилу.

A	Кут, °	A	Кут, °
0,01	0	0,19	0
0,02	10	0,19	10
0,12	20	0,21	20
0,07	30	0,2	30
0,18	40	0,225	40

Як видно з таблиці 2.2. амплітуда бокових пелюсток значно зменшилася. На рис 2.7 видно що ширина головної пелюстки відрізняється, набагато менше ніж $n=8$. (рис.2.5)

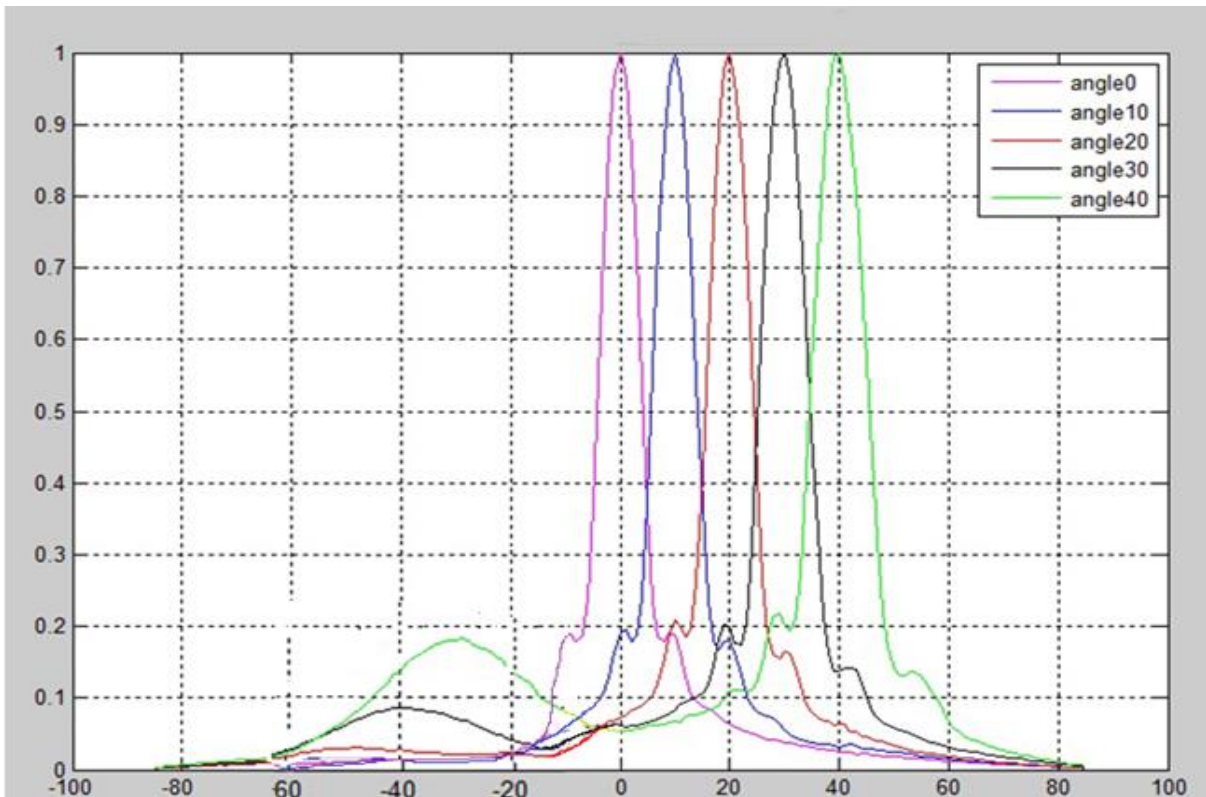


Рис.2.6 Залежність ДН від кута нахилу променя для $n=16$

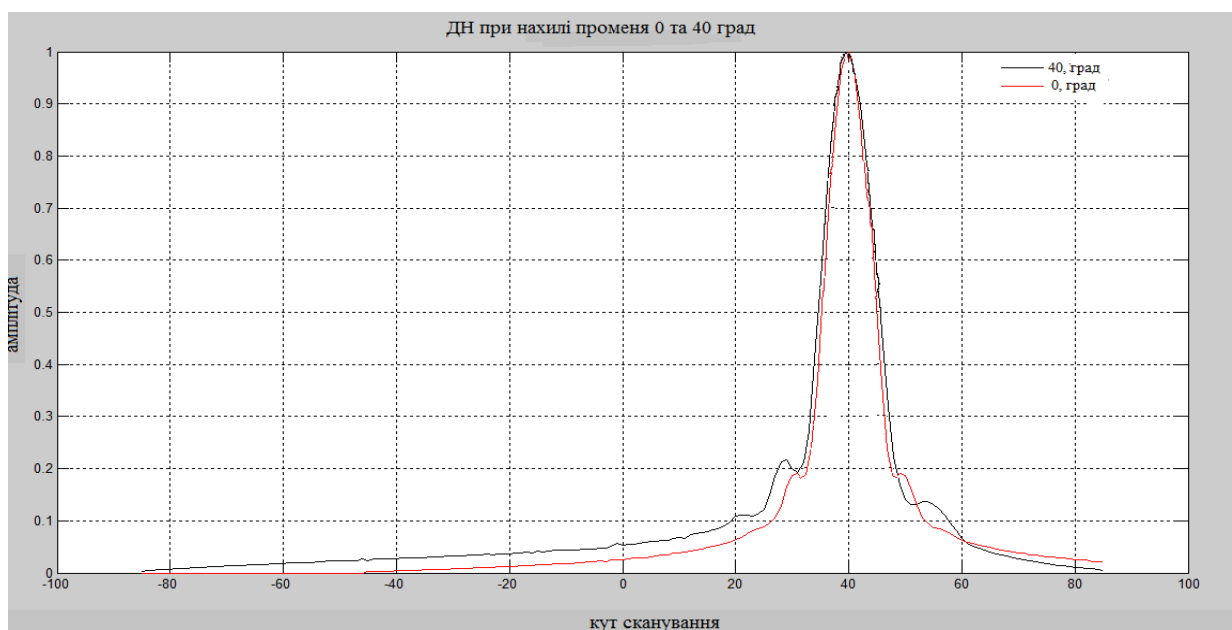


Рис.2.7 Залежність ДН від кута нахилу променя.

Спираючись на отримані дані можна зробити висновок про те що, поділ монолітного перетворювача на окремі елементи значно зменшує побічні пелюстки. При цьому виникає ряд побічних ефектів, один з яких побічні моди коливань перетворювача, що впливають на амплітуду бокових пелюсток та ширину головної пелюстки. Збільшення кількості елементів, призводить до зміни частоти бокових коливань. Якщо проводити контроль при малих кутах нахилу променя, є можливим з'єднувати попарно електронно елементи , це призводить до зменшення електронних трактів в системі, що зменшує складність реалізації, та експлуатації системи.[13]

2.3. Використання програмного забезпечення comsol multiphysics для моделювання акустичного поля перетворювача. Проведення контролю в ближній зоні

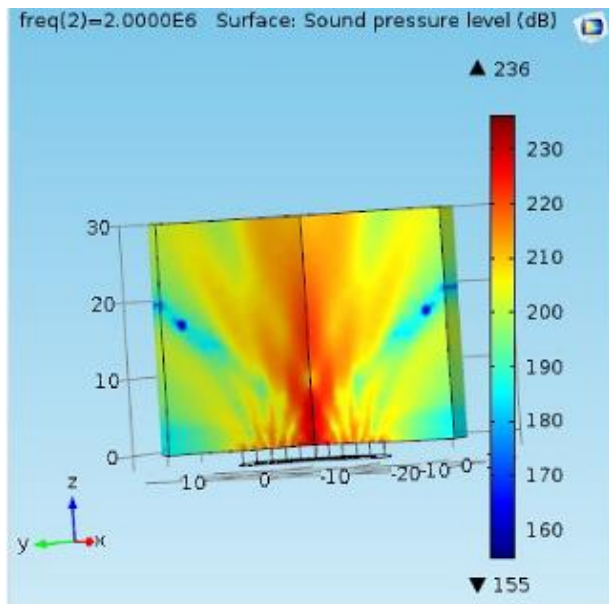
COMSOL Multiphysics - це універсальна програмна платформа для комп'ютерного моделювання фізичних задач. Використання пакету COMSOL Multiphysics дозволяє враховувати пов'язані або «мультифізичні» явища.

Використання COMSOL Multiphysics дозволяє провести моделювання акустичного поля в ОК. Є можливим побачити розподіл та порівняти отримані значення з теоретичними.

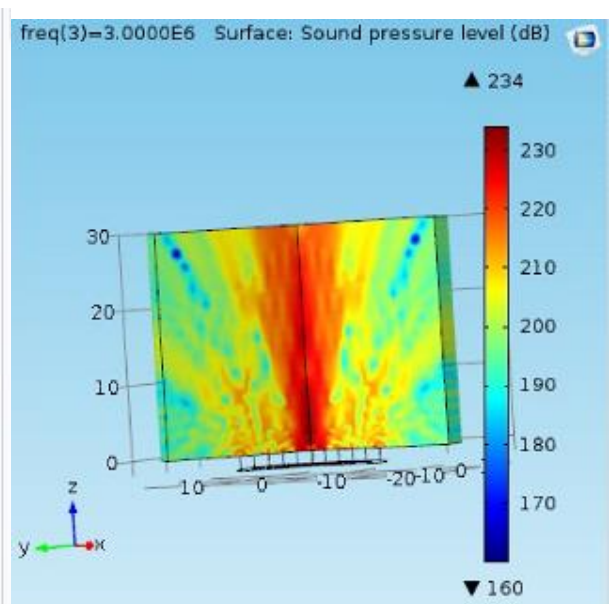
2.3.1. Моделювання розподілу акустичного тиску в ОК

Проведемо моделювання поля, яке створюється ФР, геометричні параметри якої залишилися не змінними з п. 2.2. Змінюємо робочу частоту для перегляду зміни акустичного тиску (рис.2.10).

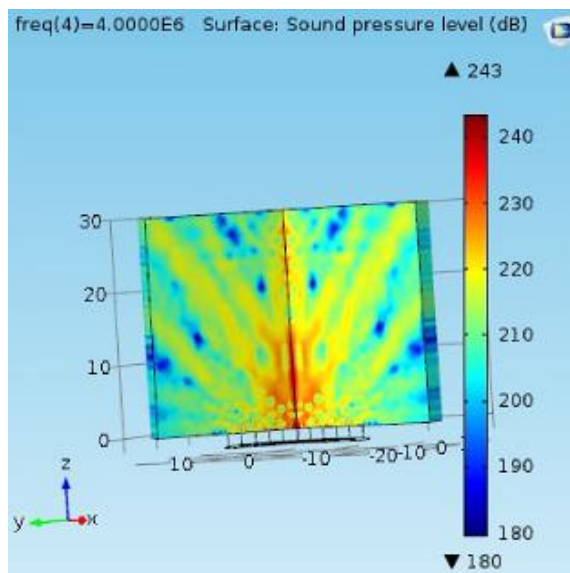
Як видно з рисунку 2.10. при збільшенні робочої частоти перетворювача. Зменшується ближня зона.



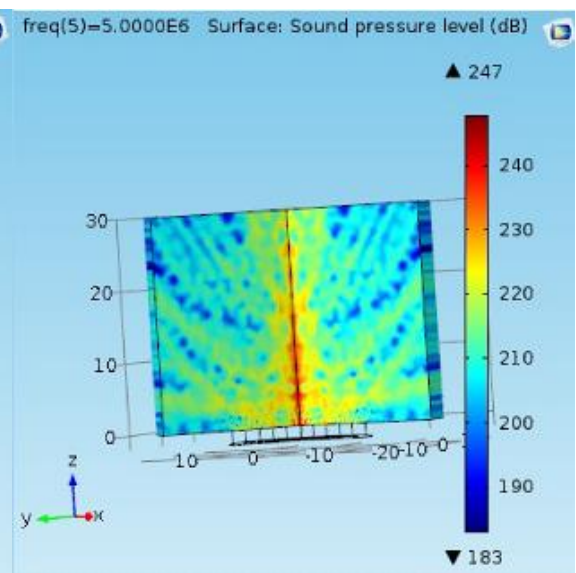
а)



б)



в)



г)

Рис.2.10 Розподіл акустичного тиску в ОК при робочих на частотах:

а) $f= 2\text{МЦ}$, б) $f= 3\text{МЦ}$, в) $f= 4\text{МЦ}$, г) $f= 5\text{МЦ}$.

2.3.2. Моделювання проведення контролю ближній зоні.

Моделювання в COMSOL Multiphysics яке зображено на рис.2.10. було проведено в безперервному режимі. Саме тому бачимо зміну акустичного тиску в ближній зоні. По факту воно відрізняється від теоретично описаного в літературних джерелах. Відсутні явні провали на акустичній осі.

Імпульсне збудження впливає на характер звукового поля. Як показано на рис.2.10. короткі імпульси які досягають точки спостереження від різних місць випромінювання, вже не можуть інтерферувати, якщо вони коротші за різницю в довжині шляху їх проходження.

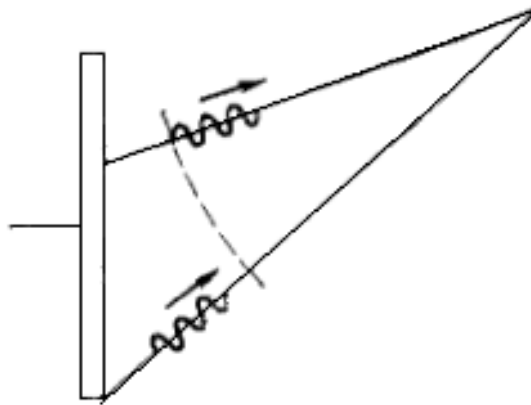


Рис.2.11 При імпульсах з великої різницею ходу інтерференція не можлива

Навіть якщо вони перекриваються з різницею в довжині шляху проходження $\lambda/2$, взаємне погашення залишається не повним. Тому в імпульсних поля вже не має нульових значень, а максимуми тиску виражені не так явно. Зміна екстремумів тиску на акустичній осі в залежності від форми імпульсу показана на рис 2.12. Коливання тиску зменшується сильніше чим коротше імпульс та чим менше відстань від випромінювача. В дальній зоні не відбуваються зміни. [16]

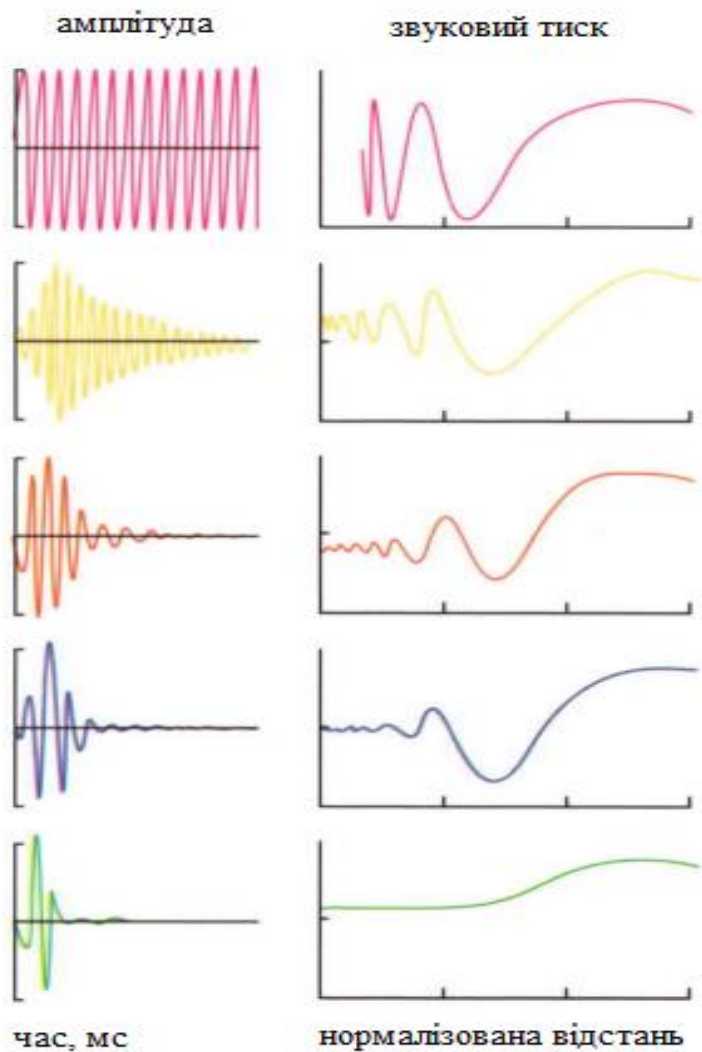


Рис 2.12 Звуковий тиск на випромінювачі в залежності від форми імпульсу.

2.2.3. Рекомендації при контролю в зонах сканування, де виникає трансформація хвиль.

Якщо площинна ультразвукова хвиля падає на межу поділу двох напівнескінчених середовищ, то виникають відбиті й заломлені хвилі. В цьому випадку можуть виникати нові типи хвиль, яких немає в падаючій хвилі. Процес утворення нових типів хвиль на межі поділу називається трансформацією хвиль. Напрями відбитих і заломлених хвиль визначаються згідно із загальним законом відбиття і заломлення (2.5)

$$\frac{\sin \alpha_I}{\sin \alpha_{II}} = \frac{c_I}{c_{II}}, \quad (2.5)$$

де індексами I і II позначено дві довільні хвилі, пов'язані загальним процесом відбиття і заломлення і мають швидкості звуку c_I і c_{II} .

Перший критичний кут. Припустімо, що падаюча хвиля поздовжня і $c_{l1} < c_{l2}$. Тоді зі збільшенням кута падіння β_l заломлена поздовжня хвиля притискається до межі поділу ($\alpha_l \rightarrow \frac{\pi}{2}$). Кут падіння поздовжньої хвилі, для якого промінь заломленої поздовжньої хвилі збігається з межею поділу, називається першим критичним кутом $\beta_{кр.1}$, тобто за першого критичного кута зникає заломлена поздовжня хвиля

$$\beta_{кр.1} = \arcsin \frac{c_{l1}}{c_{l2}}. \quad (2.6)$$

За цього кута падіння в другому середовищі (твердому) виникає головна хвиля.

Другий критичний кут. Якщо $c_{t1} < c_{t2}$, то з подальшим збільшенням кута β_l настає момент, коли промінь заломленої поперечної хвилі буде збігатися з межею поділу ($\alpha_t \rightarrow \frac{\pi}{2}$) і виникає неоднорідна поверхнева хвиля. Цей кут падіння поздовжньої хвилі називається другим критичним кутом $\beta_{кр.2}$:

$$\beta_{кр.2} = \arcsin \frac{c_{l1}}{c_{t2}}. \quad (2.7)$$

За другого критичного кута падіння в другому середовищі зникають об'ємні хвилі.

Для вірного тлумачення результатів необхідно використовувати відмінні характеристики хвиль. Відомо що швидкості повздовжньої та поперечної хвилі різні. (2.8)

$$c_t = c_l \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}} \quad (2.8)$$

де ν – коефіцієнт Пуассона

Таким чином, якщо в зоні де можуть бути дві хвилі, на екрани ми бачимо дві імпульси які відрізняють по швидкості в двічі, можна сказати що ділянка не має дефектів. В разі відсутності імпульсів. Необхідно проводити додаткові дослідження.

Також необхідно використовувати криві залежності інтенсивності від кута нахилу, для перевірки типу хвилі.[17]

2.4 Висновки до розділу

В другому розділі були представлені методи боротьби з побічними модами коливань. Проведено моделювання ДН при різних кутах нахилу променю. Були використані методи для прилічення побічних мод коливань в моделювання ДН. Отримані результати вказують на зменшення амплітуди бокових пелюсток. А ширина головної пелюстки не змінюється з відхиленням променю. Це призводить до покращення роздольної здатності.

Проведено моделювання акустичного поля в COMSOL Multiphysics, показаний розподіл акустичного тиску в ОК при різних частотах.

Надані рекомендації для проведення контролю в зонах трансформації хвиль. Показана необхідність використання дослідницького зразка, для проведення дослідження поведінки хвиль при наявності відомих дефектів.

РОЗДІЛ 3

Аналіз ефективності методів пригнічення побічних ефектів.

Порівняння результатів моделювання

В даному розділі проведено аналіз ефективності методів пригнічення побічних пелюсток. Показана зміна роздільної здатності перетворювачів на базі ФР. Проведено аналіз моделювання в середовищі COMSOL Multiphysics,. Порівняння отриманих результатів з результатами отриманих в середовищі Matlab. Розглянута доцільність проведенням моделювання в COMSOL Multiphysics.

3.1. Розрахунок затримок

Змінюючи тимчасові затримки збуджуючих електричних імпульсів, що подаються на п'єзоперетворювачі ФР, можна здійснювати управління спрямованістю, формою і енергією ультразвукового променя, тобто виробляти сканування і динамічне фокусування в досліджуваному просторі контрольованого об'єкта, а також генерувати поздовжні, поперечні і поверхневі хвилі.

Для забезпечення вводу кутів прозвучування необхідно провести розрахунок затримки для кожного елемента (лінії затримки).[13]

Формула за якою проводиться розрахунок затримки має вигляд:

$$\Delta\tau = \frac{\lambda}{2 \cdot c} \sin\alpha, \quad (5.15)$$

де λ - довжина хвилі в ОК, α - кут розповсюдження хвилі, c - швидкість хвилі в ОК.

Для обрахованих раніше кутів визначимо лінії затримки для елементів. Значення подаємо у вигляді таблиці.

Таблиця 3.1 Значення затримок для обраних кутів

№	$\alpha=20^\circ$	$\alpha=30^\circ$	$\alpha=40^\circ$
	$\Delta\tau, c$		
1	$7,77 \cdot 10^{-8}$	$1,13 \cdot 10^{-7}$	$1,46 \cdot 10^{-7}$
2	$1,55 \cdot 10^{-7}$	$2,27 \cdot 10^{-7}$	$2,92 \cdot 10^{-7}$
3	$2,33 \cdot 10^{-7}$	$3,40 \cdot 10^{-7}$	$4,38 \cdot 10^{-7}$
4	$3,10 \cdot 10^{-7}$	$4,54 \cdot 10^{-7}$	$5,84 \cdot 10^{-7}$
5	$3,88 \cdot 10^{-7}$	$5,68 \cdot 10^{-7}$	$7,30 \cdot 10^{-7}$
6	$4,66 \cdot 10^{-7}$	$6,81 \cdot 10^{-7}$	$8,76 \cdot 10^{-7}$
7	$5,44 \cdot 10^{-7}$	$7,95 \cdot 10^{-7}$	$1,02 \cdot 10^{-6}$
8	$6,21 \cdot 10^{-7}$	$9,09 \cdot 10^{-7}$	$1,16 \cdot 10^{-6}$
9	$6,99 \cdot 10^{-7}$	$1,02 \cdot 10^{-6}$	$1,31 \cdot 10^{-6}$
10	$7,77 \cdot 10^{-7}$	$1,13 \cdot 10^{-6}$	$1,46 \cdot 10^{-6}$
11	$8,55 \cdot 10^{-7}$	$1,25 \cdot 10^{-6}$	$1,60 \cdot 10^{-6}$
12	$9,32 \cdot 10^{-7}$	$1,36 \cdot 10^{-6}$	$1,75 \cdot 10^{-6}$

Також на малюнку 3.1. Зображено форма затримки при для різної довжини фокусу.

Закони затримки для фазованих решіток при відсутності призми, розрахованих на отримання повздовжньої хвилі мають форму параболи. Величина затримки зростає від краю до центру. Якщо фокусна відстань збільшується в два рази, то величина затримки повинна в два рази зменшитися. Зі збільшенням ширина елементів величина необхідної затримки також зростає за лінійним законом.

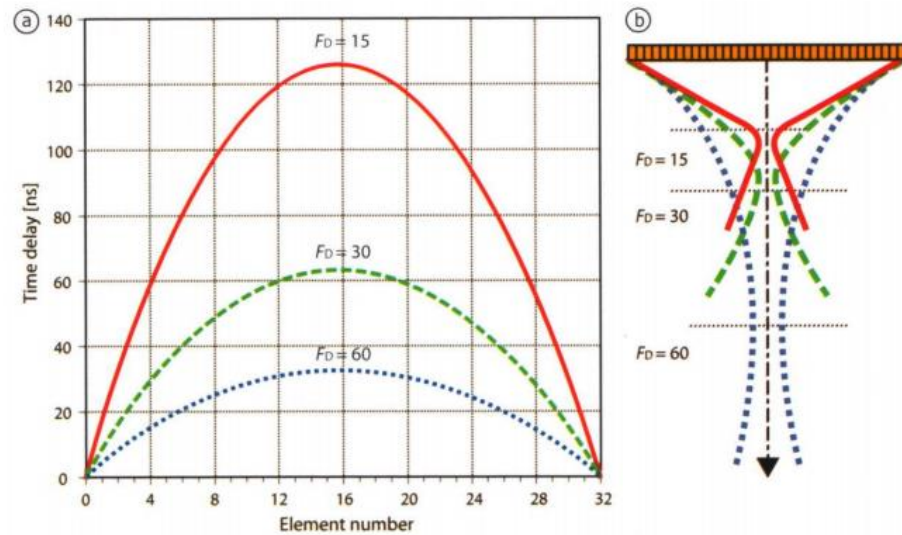


Рис 3.1 Величини часової затримки для різних довжин фокусу

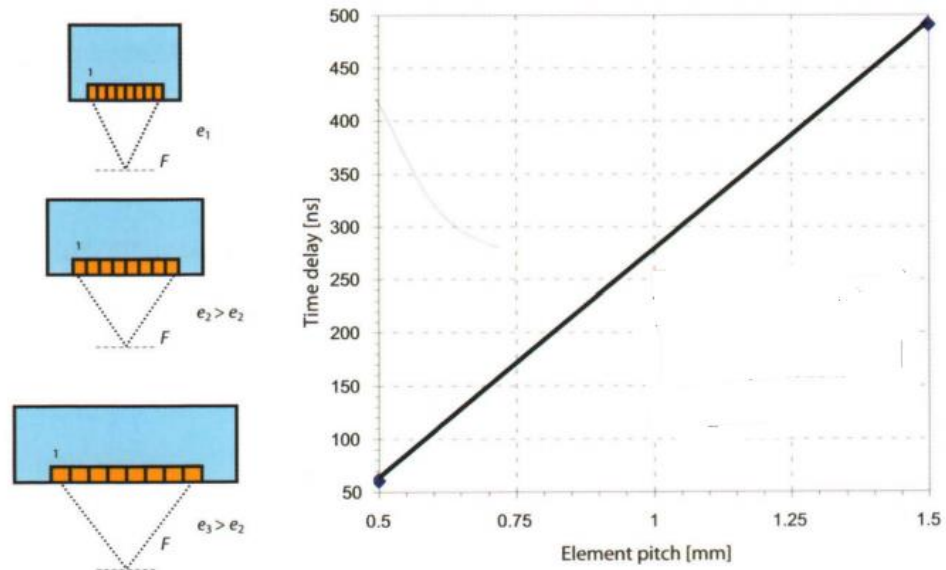


Рис 3.2 Залежність часової затримки від кроку решітки при одноковій фокусній відстані

Якщо проходить сканування ФР без призми (рис 3.3), то затримка на кожному елементі визначається положенням елемента в решітці та потрібним кутом вводу променя. (рис. 3.4). Значення затримки збільшується зі збільшенням кута та номера елемента.

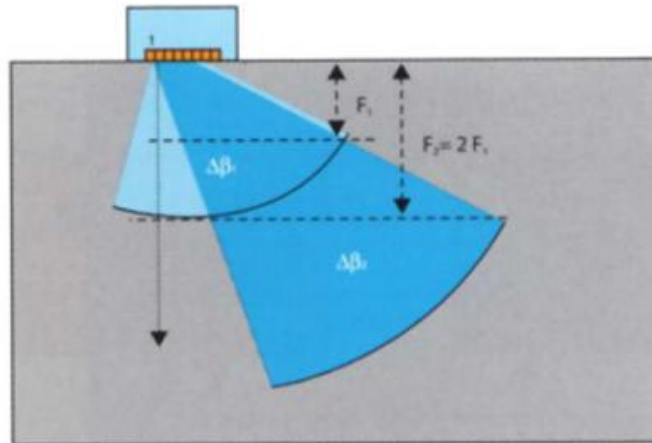


Рис 3.3 Сканування за допомогою фазованої решітки без призми

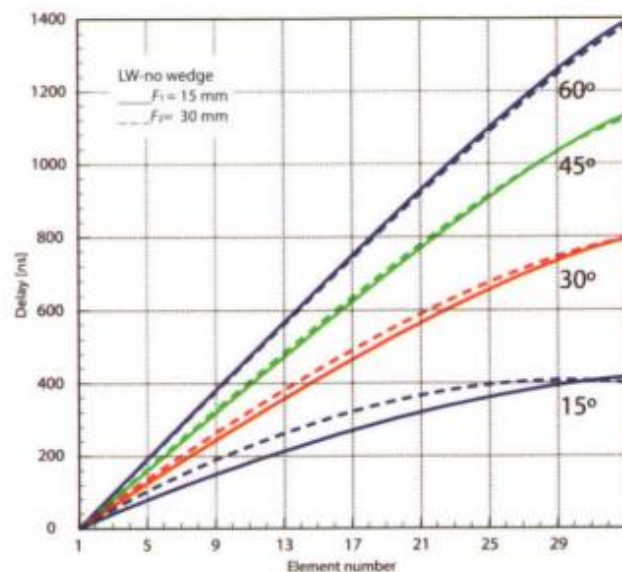


Рис 3.4 Залежність величини затримки від кута вводу, порядкового номера елемента та фокусної відстані.

Фазована решітка встановлена на призму рис 3.5, потребує фокальних закон іншої форми.

Фокальний закон має форму параболи для кута вводу, розрахованого по закону Снеліуса 45 градусів. Для кутів менших ніж розрахований, величина затримки на елементах збільшується від задньої до передньої частини решітки. Для кутів, більших за розрахований затримка повинна бути більша в задній частині фазованої решітки. Затримка повинна бути більша в задній частині решітки, тому що імпульс, який випромінюється в передній частині решітки повинен пройти більшу відстань в призмі, тому передні елементи повинні збуджуватись раніше.

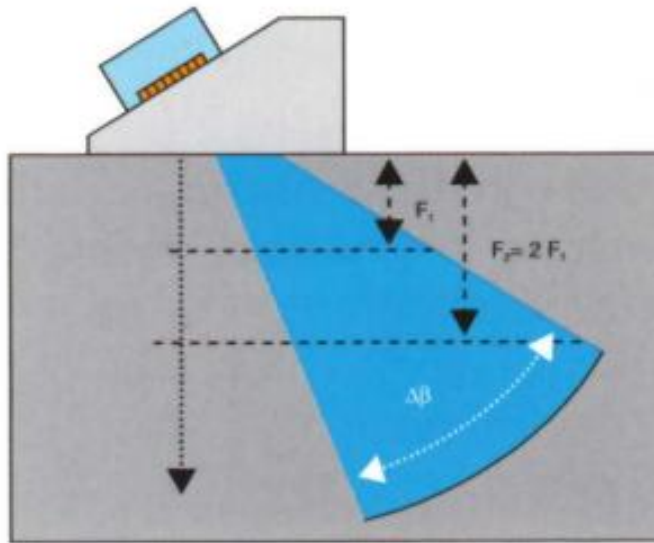


Рис 3.5 Сканування перетворювачем, який встановлений на призму.

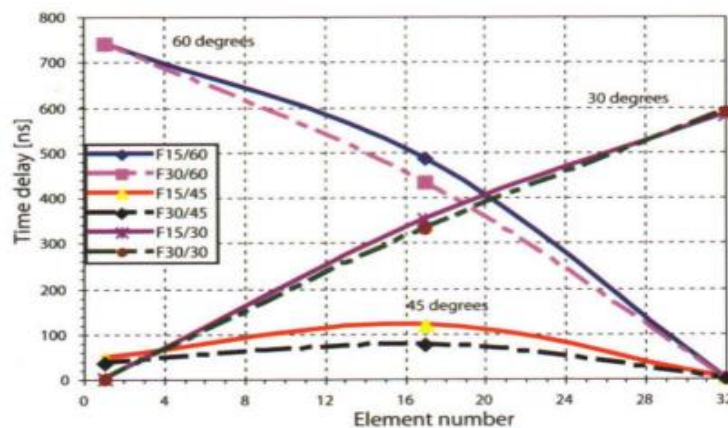


Рис 3.6 Залежність величини затримки від кута вводу, порядкового номера елемента для фазованої решітки встановлену на призмі.

Принцип фокусування променя зображений на рис. 3.7. Саме керуванням лінією затримки ми проводимо розрахунки діаграми направленості.[16]

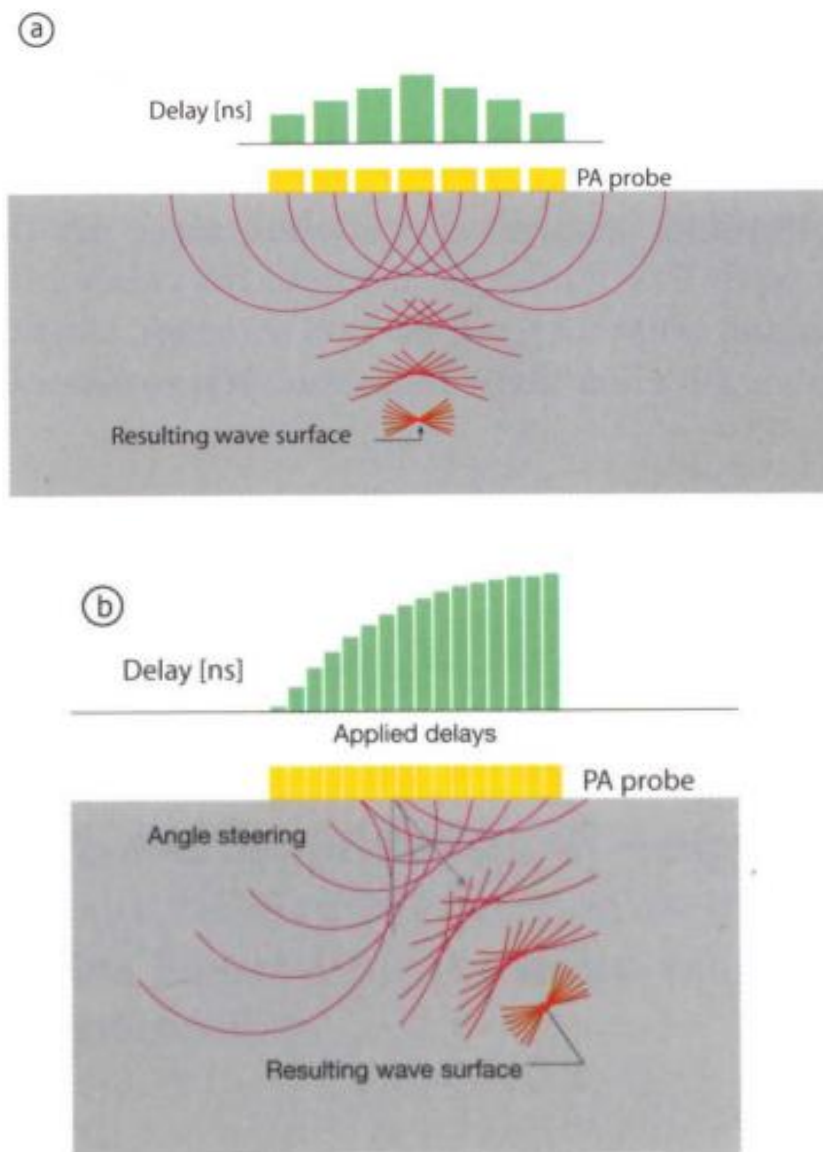


Рис 3.7 Принцип формування фокусування пучка.

3.2 Моделювання роботи фазованої решітки

Було побудовано програму для моделювання роботи фазованої решітки. Результат даного моделювання є діаграма направленості, яка відображає всі характеристики які вносяться як початкові значення при моделювання.

Акустичний сигнал, (Рис. 3.8) та побудований в MatLab

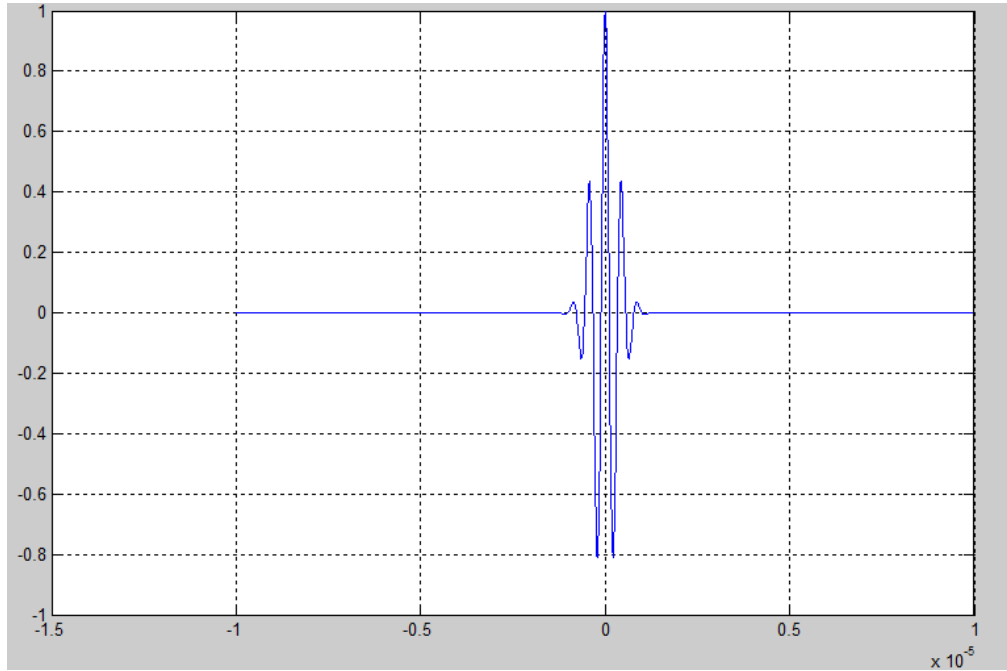


Рис 3.8 Акустичний сигнал

Проведемо моделювання ситуацій, які можуть виникати при контролі.

У дальній зоні формується діаграма направленості, яка визначається здебільшого хвильовим розміром випромінювача (рис. 3.9). У межах головної пелюстки зосереджено близько 85% всієї променевої енергії.[15]

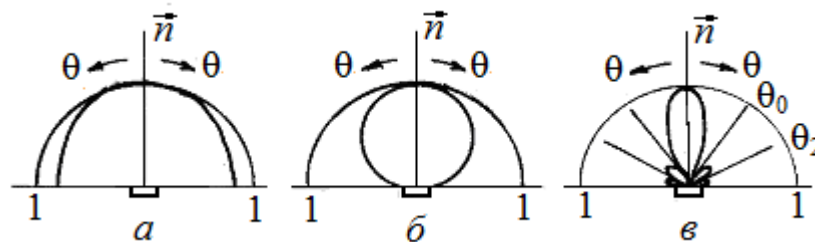


Рис. 3.9 Характер залежності поля випромінювання від хвильового розміру випромінювача : а – $2a \ll \lambda$; б – $2a \approx \lambda$; в – $2a \gg \lambda$

Перший випадок (рис 3.10). Коли d-крок менше довжини хвилі.

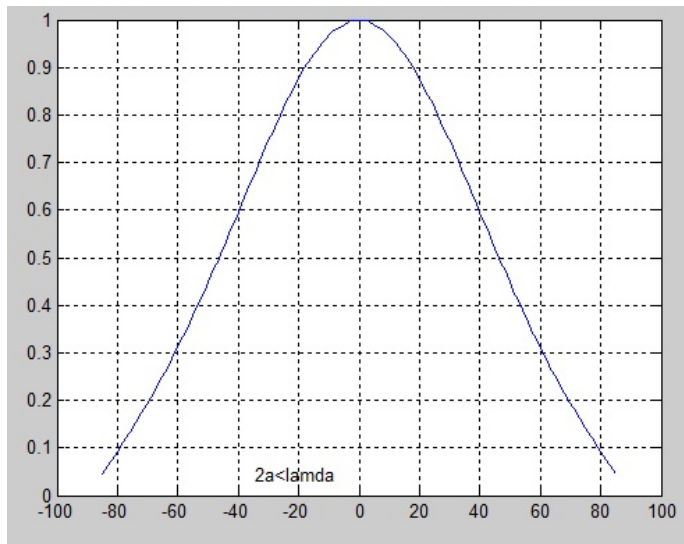


Рис 3.10 Діаграма направленості при d -крок менше довжини хвилі

Бачимо що діаграма направленості має не виражений вигляд. Результат підтверджує теорію, що була викладена раніше. Якщо змінювати крок далі d -крок дорівнює довжини хвилі (рис 3.11). Отримуємо наступний результат, який також збігається з теоретичними даними, така діаграма направленості не є інформативною.

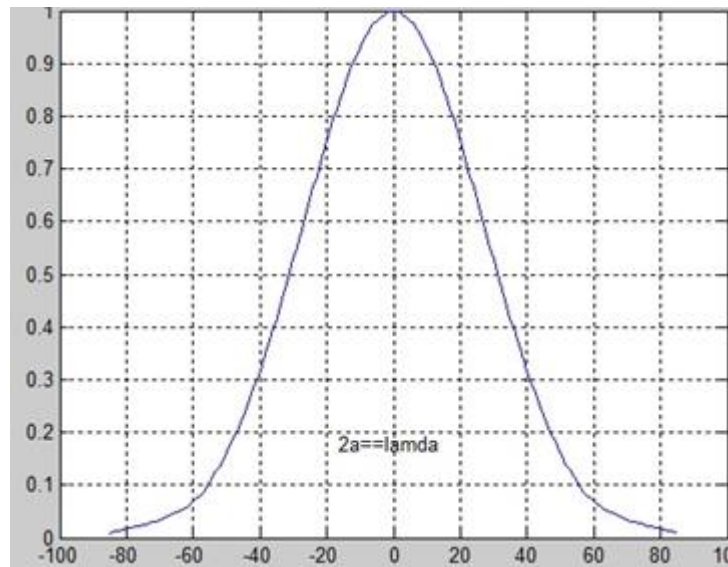


Рис 3.11 Діаграма направленості при d -крок дорівнює довжини хвилі

Задаємо d -крок більший довжини хвилі (рис. 3.12.)

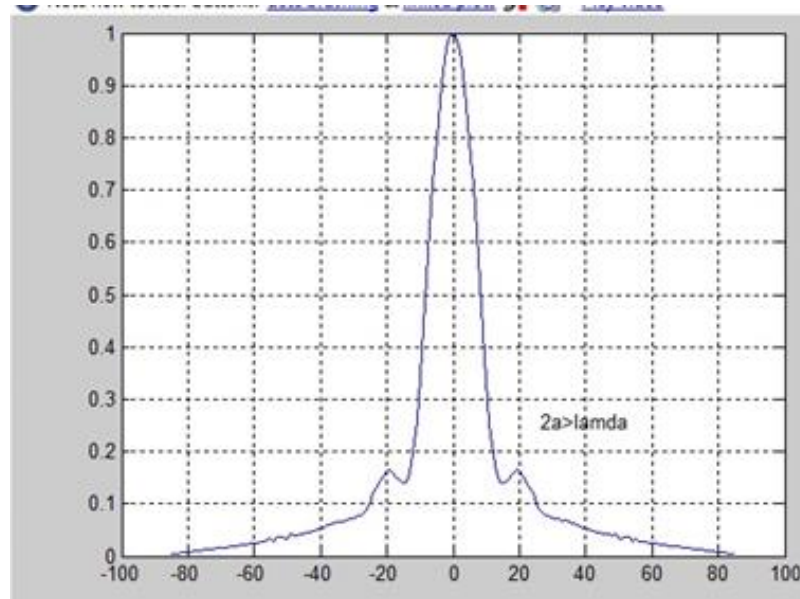


Рис 3.12 Діаграма направленості при d -крок більше довжини хвилі

Та d -крок набагато більший довжини хвилі (рис. 3.13).

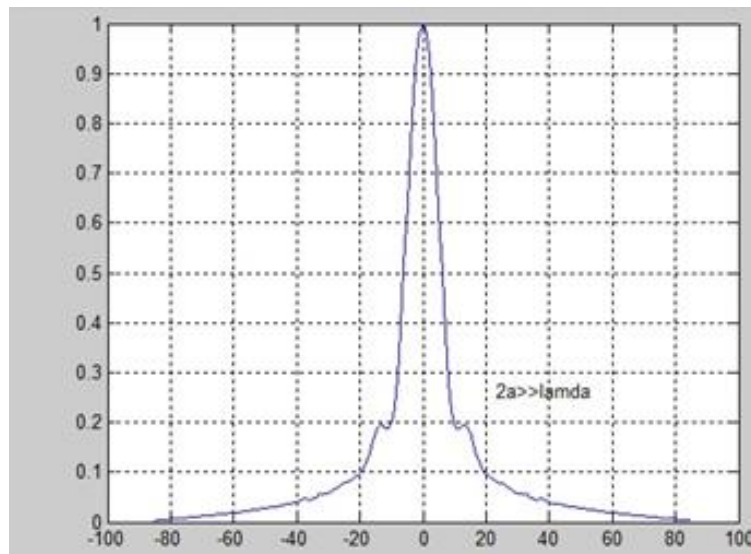


Рис 3.13 Діаграма направленості при d -крок набагато більше довжини хвилі

Бачимо чим більша різниця, там вузла діаграма направленості, тим більше інформації можна отримувати з перетворювача, знаючи точно, що сигнал є відображенням заданих характеристик.

Моделювання ситуацій, які нам відомі з теорії та були описані раніше, коли період ґрадки менший або дорівнює половині довжини хвилі. Доводять що необхідно використовувати рекомендації для отримання діаграми направленості, яка б не відрізнялась від діаграми направленості монолітного перетворювача.

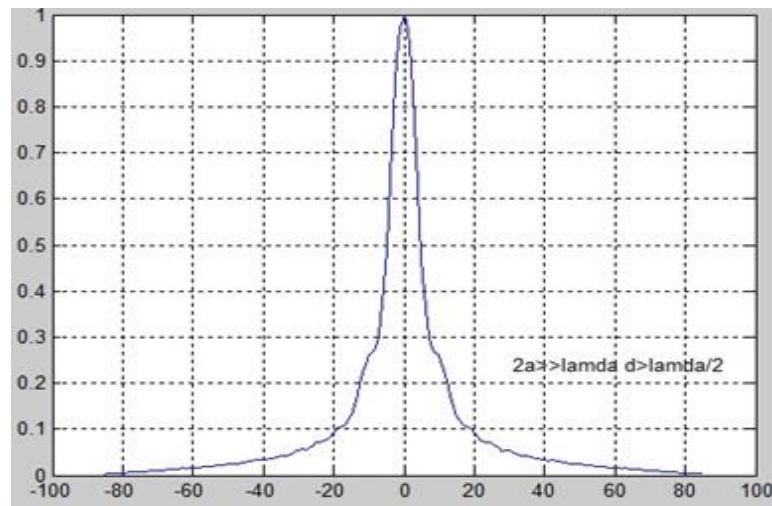


Рис 3.13 Діаграма направленості при $d = \frac{\lambda}{2}$

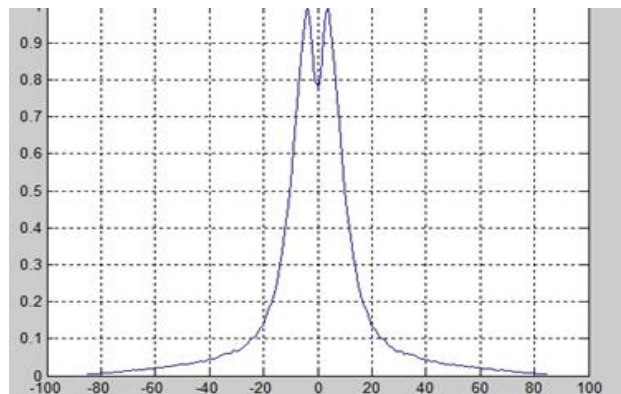


Рис 3.13 Діаграма направленості при $d \geq \lambda \frac{n-1}{n}$

Надалі будуть проведені моделювання інших ситуацій, зроблений пошук більш оптимального задавання характеристик перетворювача для отримання найбільш коректної та повної інформації, в певній ситуації контролю.

3.3 Висновки до розділу

У цьому розділі проведено розрахунки затримок, та проведено моделювання діаграми направленості. Було побудовано програму для моделювання роботи фазованої решітки. Результат даного моделювання є діаграма направленості, яка відображає всі характеристики які вносяться як початкові значення при моделювання.

Бачимо, що коли d -крок набагато більше довжини хвилі, там вужча діаграма направленості, тим більше інформації можна отримувати з перетворювача, знаючи точно, що сигнал є відображенням заданих характеристик.

РОЗДІЛ 4

Розробка стартап-проекту «Ультразвукова система контролю кісток»

4.1. Опис ідеї проекту

В основу ідеї стартап-проекту покладено ультразвукову систему для контролю кісток, яка відрізняється від наявних на ринку меншою вартістю, мобільністю, безпекою для здоров'я людини. В цьому розділі буде проведено аналіз стартап проекту який має на меті визначити чи зможе наш продукт вийти на ринок і конкурувати з продуктами які вже зайняли на ньому своє місце.

У таблиці 4.1 зображено зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів.

Таблиця 4.1. Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Ультразвукова система контролю кісток	Контроль кісток людини	Менша вартість
		Без рентгенівського опромінення
		Мобільність

Далі проводимо аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів:

– визначаємо перелік техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї;

– визначаємо попереднє коло конкурентів (проектів-конкурентів) або товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та проводимо збір інформації щодо значень техніко-економічних показників для ідеї власного проекту та проектів-конкурентів відповідно до визначеного вище переліку;

– проводимо порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначено показники, що мають а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні) (табл. 4.2).

Для більш наочної демонстрації переваг та недоліків даної системи контролю порівняємо параметри системи з деякими її аналогами, наявними на ринку.

Конкурент 1 - Рентгенівська установка Lunar Advance X-Ray Machine

Конкурент 2 - Рентгенівська установка Eclipse

Конкурент 3 - Рентгенівська установка DEDALUS MB IMX-1A 90/90

Таблиця 4.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту.

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент1	Конкурент2	Конкурент3			
1	Вартість	500000	700000	950000	910000	-	-	+
2	Рентгенівське опромінення	-	+	+	+	-	-	+
3	Мобільність	+	-	-	-	-	-	+
4	Остаточний діагноз	Попередній	Остаточний	Остаточний	Остаточний	+	-	-
5	Торгова марка	Немає	Є	Є	Є	+	-	-

У табл. 4.2. визначено перелік слабких, сильних та нейтральних характеристик та властивостей ідеї потенційного товару, що є підґрунтям для формування його конкурентоспроможності.

4.2. Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу проводимо аудит технології (мови програмування), за допомогою якої можна реалізувати ідею створення проекту.

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз складових які вказані в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Ультразвукова система контролю кісток	Виготовлення на замовлення у підприємствах	Наявна	Недоступна
2		Виготовлення самостійно	Наявна	Доступна
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Оптимальна технологія реалізації проекту вибрано виготовлення елементів приладу самостійно.				

Результат технологічної здійсненності ідеї проекту вказує на те, що дану ідею можна реалізувати шляхом використання наявних на ринку технологій, які є доступними.

4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначимо ринкові можливості, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкові загрози, які можуть перешкодити його реалізації.

Це дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Спочатку проведемо аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (таблиця 4.4).

Таблиця 4.4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	5
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	~5000000 грн
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Немає
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Перевірка приладу на стандартних зразках, для підтвердження точності контролю
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	90%

Так як ринок має зростаючу динаміку і хороший попит на запропонований нами продукт робимо висновок що ринок є привабливим для входження за попереднім оцінюванням.

Визначимо потенційні групи клієнтів, їх характеристики, яким можна запропонувати даний прилад (табл. 4.5).

Таблиця 4.5. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Даний прилад надає ринку зменшення опромінення людей рентгеновським опроміненням, мобільність та малу вартість.	Підприємства які мають потребу в мобільній експрес діагностиці кісток людини.	Відносно не дорогі прилади неруйнівного контролю	Простота експлуатації, ефективність, мобільність, економічність, висока якість сервісного обслуговування

В даній таблиці ми визначили сегменти ринку на якому будемо пропонувати наш продукт, визначили фактори продукту які формують поведінку клієнтів відносно нашого продукту та їхні основні вимоги до продукту.

При застосуванні даної технології існують певні загрози. Для попередження таких ситуацій необхідно якісне обладнання, а також працювати з такими програмами повинні висококваліфіковані фахівці. Також, повинно своєчасне технічне обслуговування даного продукту

Подібні прилади неруйнівного контролю не є поширеним за рахунок високої вартості, це може створити проблеми при вводі в нього нового товару. Але даний проект матиме меншу вартість у порівнянні з аналогами, тому це буде сприяти швидкому введенні на ринок.

Проведемо аналіз факторів загроз та можливостей при виведенні товару на ринок (табл 4.6 - 4.7).

Таблиця 4.6. Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Конкуренція	Можливий вихід на ринок іноземних компаній конкурентів	Дослідження продукту конкурента та вдосконалення свого
2	Інфляція	Зміна курсу гривні, за рахунок чого можуть зменшитися продажі	Реалізація продукту в більш стабільній (іноземній) валюті та моніторинг економічної ситуації в країні
3	Наявність локального конфлікту на сході	Може вплинути на коло потенційних покупців	Пошук нових клієнтів на міжнародному ринку
4	Постачання	Проблема з фірмами постачальниками	Зміна політики розповсюдження продукту
5	Технічний	Збої в програмі в зв'язку з неправильним налаштуванням	Спрощення алгоритмів налаштування або впровадження постійної підтримки кваліфікованих техніків

В таблиці 4.6 ми визначили фактори загроз які перешкоджають ринковому впровадженню нашого проекту, а також можливу реакцію на фактор щоб звести до мінімуму його вплив.

Але поряд із колом загроз існують і певні можливості (таблиця 4.7).

Таблиця 4.1. Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Науково-технічні	Зміниться технологія виготовлення товару	Впровадить технологію і змінить вартість товару
2	Попит	Хороші темпи зростання ринку	Збільшення продажів і отже прибутків компанії
3	Економічні	Політика протекціонізму; підтримка інноваційного виробництва.	Підвищення/пониження ціни на продукт; зменшення податкового тиску
4	Політико правові	Може вплинути на купівлю/продаж товару.	Зміна напрямків імпорту
5	Екологія	Підвищення зацікавленості людей екологічними проблемами	Зменшення рентгенівського опромінення людей.

В таблиці 4.7 ми визначили фактори можливостей які сприяють ринковому впровадженню нашого проекту, а вигоди які компанія може отримати відповідно від реакції на той чи інший фактор.

4.4. Аналіз пропозицій ринку

Проведемо аналіз пропозиції ринку, з метою визначення загальної риси конкуренції на ринку (табл. 4.8).

Таблиця 4.8. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Тип конкуренції	Олігополія	Можливість домовленості з іншими олігополістами для отримання взаємної вигоди
2. Рівень конкурентної боротьби	Національний	Вдосконалення продукту і пошук можливості виходу на міжнародний ринок

3. За галузевою ознакою	Міжгалузева	Розширення ринку за рахунок збільшення попиту
4. Конкуренція за видом товарів	Товарно-видова	Вдосконалення та реклама для показу переваг
5. За характером конкурентних переваг	Нецінова	Вдосконалення свого продукту і при цьому невелике зменшення цін відносно конкурентів
6. За інтенсивністю	Не марочна	Розробка бренду і його активна реклама

В даній таблиці ми проаналізували ринок збуту нашого продукту і визначили загальні риси конкуренції на ньому.

Більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі за М. Портером приведений в табл. 4.9.

Таблиця 4.9. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	На даний момент на ринку присутні 3 прямі конкуренти які надають подібні послуги	Потенційними конкурентами є іноземні компанії які згодом можуть вийти на наш ринок. Патенти на продукти. Законодавчі обмеження. Гнучкі ціни.	Постачальниками є інтернет магазини які займаються розповсюдженням. Диференціація витрат. Концентрація постачальників. Значення розміру поставок	Основними клієнтами є клініки та госпіталі. Розмір закупівель. Система інформації. Прибутки. Контроль якості.	Компанія володіє доволі сильною пропозицією, аналогів якій при збереженні якості практично немає
Висновки:	Проводити аналіз конкурентних пропозицій, працювати над зниженням собівартості.	Високий ризик входу нових гравців, адже вхідні бар'єри є не дуже високими. На даний момент потенційних конкурентів немає	Так як концентрація постачальників доволі висока вони не диктують умови роботи на ринку.	Для клієнтів все вагомішим є питання ціни, вони хочуть платити менше. Для задоволення їх потреб потрібно розробляти нові пропозиції і підтримувати якість продукту.	Підтримувати хороші позиції на ринку та конкурентну перевагу, розроблювати нові види товарів

Проаналізувавши таблицю 4.9 робимо висновок що з огляду на конкурентну ситуацію на ринку можливість роботи на ринку присутня. Також ми визначили які характеристики повинен мати проект і які дії має проводити компанія, щоб бути конкурентоспроможною на ринку.

Після всіх аналізів визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності. Поки проект не впроваджено в життя, це важко зробити точно, можна дати лише попередню оцінку конкурентоспроможності.

4.5. Фактори конкурентоспроможності

На основі аналізу конкуренції (табл. 4.9), а також із урахуванням характеристик ідеї проекту (табл. 4.2), вимог споживачів до товару (табл. 4.5) та факторів маркетингового середовища (табл. №№ 4.6-4.7) визначимо перелік факторів конкурентоспроможності. Аналіз факторів приведений в табл. 4.10.

Таблиця 4.10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Велика кількість постачальників	Своєчасна доставка продукту в незалежності від ситуації на ринку постачальників
2	Вартість	Зменшення вартості за рахунок використання ультразвукового методу
3	Рентгенівське опромінення	Використання ультразвуку замість рентгену
4	Мобільність	Невелика вага та невеликі габаритні розміри дають змогу переміщати систему.
5	Висока якість	Висока якість продукту яка дозволяє клієнту бути впевненим в своїй результатів досліджень

В таблиці 4.10 на основі аналізу проведеного в таблиці 4.9 визначили та обґрунтували фактори конкурентоспроможності нашого проекту.

4.6. Аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту

За визначеними факторами конкурентоспроможності (табл. 4.10) проведемо аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту (табл. 4.11).

Таблиця 4.11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «Ультразвукова система контролю кісток»

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з («система контролю кісток»)						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Велика кількість постачальників	12						v	
2	Вартість	15				v			
3	Рентгенівське опромінення	18	v						
4	Мобільність	17	v						
5	Висока якість	16		v					

З таблиць 4.10 та 4.11 бачимо, що фактори конкурентоспроможності суттєві та мають великий позитивний внесок. Основною перевагою та головним досягненням є мобільність, зменшення рентгенівського опромінення та висока якість продукту.

4.7. SWOT-аналіз стартап-проекту

Проведемо SWOT-аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) (табл. 4.12) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (табл. 4.11).

Таблиця 4.12. SWOT-аналіз стартап-проекту

<p>Сильні сторони: За наявності патентів споживач впевнений в якості отриманого продукту. За рахунок хорошої підтримки ми закріплюємо свої позиції на ринку. Завдяки високій якості продукту приваблюються нові клієнти.</p>	<p>Слабкі сторони: Так як на ринку багато постачальників, у клієнтів багатий вибір продукту, компанії необхідно проводити рекламу свого продукту і збільшувати кількість його постачальників. За рахунок високої ціни клієнти обирають більш дешевий продукт, що призводить до втрати потенційного заробітку.</p>
<p>Можливості: Науково-технічні Попит Економічні Політико правові Екологія 1. Вдосконалення продукту через впровадження нових технологій; 2. Збільшення продаж;</p>	<p>Загрози: 1. Цінова конкуренція в зв'язку з появою нових гравців на ринку. 2. Різка зміна курсу гривні може привести до зменшення попиту, особливо з боку малих фірм. 3. Політичні та економічні ризики ведення бізнесу;</p>

3. Отримання державних замовлень на отримання послуг; 4. Розширення ринку за рахунок іноземних замовників; 5. Зменшення податкового тиску, отримання тендерів на послуги.	4. Втрата потенційних клієнтів через недостатню технічну підтримку; 5. Зменшення продажів через несвоєчасне виконання замовлень.
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

В таблиці 4.12 проводимо перелік сильних та слабких сторін проект. А також ринкових загроз та ринкових можливостей який складаємо на основі факторів загроз і можливостей який ми склали раніше. Ринкові загрози та можливості на відміну від факторів ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення.

На основі SWOT-аналізу розробляємо альтернативи ринкової поведінки для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок.

Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів.

4.8. Альтернативи ринкової поведінки

Розробимо альтернативи ринкової поведінки (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок. Та проаналізуємо визначені альтернативи з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл. 4.13).

Таблиця 4.13. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Стратегія нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу	Висока	1,5 роки
2	Стратегія компенсації слабких сторін стартапу наявними ринковими можливостями	Висока	1 рік
3	Стратегія виходу з ринку	Низька	

Проводимо аналіз розроблених нами альтернатив ринкового впровадження і з зазначених альтернатив обираємо ту яка має найбільшу ймовірність отримання ресурсів, а також є найшвидшою в реалізації. Отже обираємо стратегію компенсації слабких сторін стартапу наявними ринковими можливостями.

4.9. Розроблення ринкової стратегії проекту

Здійснимо опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 4.14).

Таблиця 4.14. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Клініки та госпіталі	Висока	90%	80%	Середня
2	Лабораторії	Висока	80%	75%	Середня
Які цільові групи обрано: всі					

За результатами аналізу потенційних груп споживачів ми обрали цільові групи, для яких будемо пропонувати свою ультразвукову систему для контролю кісток та визначили стратегію охоплення ринку: стратегію зростання маркетингу.

Для роботи в обраному сегменті ринку необхідно сформувавши базову стратегію розвитку.

Визначимо базову стратегію розвитку проекту (табл. 4.15).

Таблиця 7.15. Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1	Підсилення сильних сторін стартапу за рахунок ринкових можливостей	Диференційовани й маркетинг	Якісний продукт, до якого прихильні споживачі, постійний зворотній зв'язок з клієнтами.	Стратегія диференціації

В таблиці 4.15 в залежності від обраного нами сегменту ринку обираємо стратегію розвитку нашого проекту на ринку.

Визначимо стратегії конкурентної поведінки (табл. 4.16).

Таблиця 4.16. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1	Ні	Передбачається розвиток ринку	Ні, не буде. Буде утворено унікальну продукцію	Зайняття конкурентної ніші

В таблиці 4.16 проводимо аналіз того як будемо поводити себе в конкурентній боротьбі і в залежності від прийнятих нами рішень обираємо стратегію конкурентної поведінки.

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту, а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки розробимо стратегію позиціонування (табл. 4.17). що полягає у формуванні ринкової позиції, за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку/проект.

Таблиця 4.17. Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувані комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Вдосконалення продукту враховуючи побажання споживачів	Стратегія диференціації	Висока якість продукту. Формування лояльності і прихильності споживачів, підтримка вхідних бар'єрів.	Якість. Ціна. Зворотній зв'язок із виробником.

В даній таблиці формуємо комплекс асоціацій за якими споживачі будуть ідентифікувати наш торгівельний проект.

Результатом даного підрозділу є система рішень щодо ринкової поведінки компанії, вона визначає в якому напрямі буде працювати компанія на ринку

4.10. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Сформуємо маркетингову концепцію товару, який отримає споживач. Для цього у табл. 4.18 підсумуємо результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 4.18. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Мобільність	Можливість швидкого переміщення системи для експрес контролю або попередньої діагностиці.	Малогабаритна, не важка конструкція
2	Зменшення рентгенівського опромінення	Зменшення дози рентгенівського опромінення.	Використання ультразвукового методу.

Результатом аналізу даної таблиці є перелік ключових переваг нашого товару перед конкурентами, а також переваги які потрібно ще створити.

Розробимо трирівневу маркетингову модель товару: уточняється ідея продукту та/або послуги, його фізичні складові, особливості процесу його надання (табл. 4.19).

Таблиця 4.19. Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Ультразвукова система контролю кісток Можна виділити наступні вигоди використання: Мобільність; Зменшення дози рентгенівського опромінення; Підвищення швидкодії.		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1.Довговічність (немає строку давності)	Нм	Тх
	2. Гарантійний термін (довгий термін гарантійного обслуговування)	Нм	Е
	3.Досконалість виробничого виконання (Досконалий дизайн)	Нм	Тл
	4.Вартість обслуговування (Низька системи та її обслуговування)	Нм	Вр
Якість: стандарти, нормативи, параметри тестування тощо Розробка за стандартами, тестування			
Пакування коробка			
Марка: назва організації-розробника + назва товару УЗ система контролю кісток			
III. Товар із підкріпленням	До продажу Гарантія ,доставка		
	Після продажу Після продажне обслуговування		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: свідоцтво на авторське право			

В таблиці 4.19 ми створюємо трьохрівневу модель нашого товару що включає задум товару та його вигоди, основі характеристики готового товару, спосіб його пакування та захисту від копіювання та плагіату.

Визначимо цінові межі, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар, яке передбачає аналіз ціни на товари-аналоги або товари субститути, а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів (табл. 4.20). Аналіз проводиться експертним методом.

Таблиця 4.20. Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	~800000грн	~800000грн	100000 грн	500000/700000 грн

В таблиці 4.20 проаналізовано ринкові ціни на товари аналоги та замітники, а також середній рівень доходів споживачів. За отриманими даними буду встановлена верхня та нижня межа на нашу програму.

Визначимо оптимальну систему збуту, в межах якого приймається рішення (табл. 4.21):

Таблиця 4.21. Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
	По одиночні замовлення Продаж в роздріб	Прямий продаж клієнтам продукції	висока	Проведення збуту власними силами

Було розроблено концепцію маркетингових комунікацій між споживачами та виробниками. В нашому випадку це робота напряму з виробником та реалізації продукту через прямий продаж.

Розробим концепцію маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (табл. 4.22).

Таблиця 4.22. Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Гарантія якості Найсучасніші технології	Тематичні журнали, Інтернет	Ціна - якість Проведення виставок	Акцентувати увагу на якісний товар за помірними цінами, Показати, що товар затребуваний для сучасного ринку.	Ціна-якість

Результатом даного підпункту є ринкова програма яка включає концепцію збуту, просування, аналіз ціноутворення, вона залежить від цінностей та потреб потенційних клієнтів, переваги ідеї, стан ринку на якому

буде впроваджено проект на даний момент та його динаміку, та відповідну обрану альтернативу поведінки на ринку.[18]

4.11 Висновки до розділу

Узагальнюючи проведений аналіз стартап проекту можна зробити висновок що у даного проекту на даний момент є хороша можливість ринкової комерціалізації. У зв'язку з хорошою динамікою ринку на розроблений продукт буде хороший попит у споживачів, і з точки зору рентабельності проект обіцяє бути дуже прибутковим. З огляду на потенційні групи клієнтів перспективи впровадження проекту є дуже високими. Але за рахунок того, що на ринку вже є присутні аналоги продукту який розробляється бар'єр входу на ринок є досить високим. Тому для успішного виходу на нього треба надати нашому продукту властивостей які будуть виділяти його серед конкурентів. На даний момент продукт є конкурентоспроможним але для підвищення довіри споживачів і формування своєї бази клієнтів необхідно:

- Збільшити точність
- Здійснити рекламну компанію
- Працювати над покращенням продукту

Як альтернативний варіант впровадження нашого стартап проекту для ринкової реалізації проекту доцільно обрати початок продаж нашого продукту в мережі інтернет і для якогось одного сегменту ринку, а тільки після закріплення на ринку вже починати шукати клієнтів в інших сегментах і пропонувати їм наш продукт. Також можна зробити висновок що для розширення ринку подальша імплементація проекту є дуже доцільною

Надалі є можливості вивести проект на міжнародний ринок. Це обумовлено тим, що прилад даного типу має меншу вартість та невисоке енергоспоживання за рахунок використання ортогонального методу виміру, який дозволяє реалізувати прилад з невисокою вартістю, в порівнянні з існуючими приладами, але точність якого не поступається серійним рішенням.

Висновок

В магістерській дисертації було проведено дослідження можливостей побудови ультразвукової системи для контролю кісток передпліччя.

Було запропоновано систему, яка включає в себе шість лінійних антенних решіток, причому активні групи лінійних антенних решіток можуть використовуватись як фазовані антенні решітки. Рівень електроніки на сьогоднішній день дозволяє це реалізувати.

Проведено дослідження схем прозвучування зламу. Запропоновані два режими роботи системи, перший це визначення наявності тріщини, другий знаходження розміру зміщення.

В результаті дослідження було виявлено, що найбільш ефективним є дзеркально тіньовий метод, але це значно ускладнює алгоритм роботи системи. Пропонується можливість початкового налаштування системи, а саме зміна кутів випромінювання, можливість безперервного сканування в заданому секторі. Також у даній системі для підвищення достовірності та швидкодії контролю при похилому введені променю пропонується випромінювання в двох напрямках одночасно на різних частотах. Проаналізована сучасна електронна елементна база, яка задовольняє поставленим вимогам системи. В якості ультразвукових перетворювачів передбачаються використання широкополосних композитних датчиків.

Змодельована діаграма направленості, яка дозволила проаналізувати роботу запропонованої ультразвукової системи та визначити оптимальну кількість елементів у антенних решітках. В кожній активній групі використовується 16 елементів. Якщо буде потреба то є можливість використання кожної групи окремо.

Проведено моделювання діаграми направленості при різних режимах відхилення кута. Контроль проводиться в ближній зоні, тому було досліджено можливості усунення точок з низьким тиском по акустичній осі випромінюваного УЗ променю шляхом зменшення довжини імпульсу.

Список використаної літератури

1. Цапенко В. К. Основи ультразвукового неруйнівного контролю: Підручник/ Цапенко В. К., Куц Ю. В. – К.:НТУУ «КПІ». -2010. -448 с.
2. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов. Справочник. - М.: Металлургия, 1991. - 752 с.
3. Гурвич А. К. Неразрушающий контроль / А. К. Гурвич, И. Н. Ермолов, С. Г. Сажин. – М, 1992. – 181 с.
4. Ключев В.В. Неруйнівний контроль і діагностика / Соснін Ф.Р. /Довідник під редакцією Ключева В.В. - Машинобудування 1995 р.
5. Методичні вказівки «Акустичні перетворювачі» / Уклад.: Цапенко В.К.- Київ, 2004.- 86с.
6. Красковский А.П. Исследование побочных мод колебаний в пьезоэлектрических преобразовательных элементах ультразвуковых фазированных антенных решёток / А.П. Красковский // Вісник НТУУ "КПІ". Серія приладобудування. – Київ. – 2010. – Вип. 39. – С. 5-13.
7. Красковский А.П. Измерение пространственно-временных характеристик ультразвуковых фазированных антенных решёток / А.П. Красковский // Вісник НТУУ "КПІ". Серія приладобудування. – Київ. – 2009. – Вип. 38. – С. 51-57
8. Туз Ю.М. Метод вимірювання просторово-часових характеристик фазованої антенної решітки п'єзоелектричних перетворювачів / Ю.М. Туз, О.П. Красковський, О.О. Мосолаб // XI Міжнар. НТК "Приладобудування: стан і перспективи": тези доповідей. – Київ: НТУУ "КПІ", 2012. – С. 215-216.
9. Туз Ю.М. Аналіз похибок системи вимірювання просторово-часових характеристик лінійних фазованих антенних решіток п'єзоелектричних перетворювачів / Ю.М. Туз, О.П. Красковський, О.О. Мосолаб // Електротехнічні та комп'ютерні системи. Науково-технічний журнал. – Київ. – 2012. – № 06(82). – С. 62-66.
10. Сучасні методи та засоби ультразвукового контролю з використанням

статистичної обробки сигналів. Навч. посібник / В.К. Качанов, О.В. Мозговий, О.І. Пітолін, В.П. Попко, Г.Ю. Рябов /за ред. В.П. Бабака. – К.: ІСДО, 1994. – 132 с.

11.«Фазированная антенная решетка» [Електр. ресурс.] – Дата доступа 15.04.18 <http://tofd-pa.ru/fazirovannye-reshetki>

12.«Передовые методы ультразвукового контроля: ToFD и фазированные решетки.» [Електр. ресурс.] – Дата доступа 20.04.18 <http://www.diag.by/catalogue/prepare/centr-obucheniya/ultrazvukovoi-kontrol-tofd/>

13.«Технология применения фазированных решеток – Вводный курс» [Електрон. ресурс]. – Дата доступа 20.04.18: <http://www.olympus-ims.com/ru/ndt-tutorials/phased-array/>

14.Шипулло М.Г. Практическое руководство по ультразвуковой диагностике, Кн. 1/Высшая школа. – Москва, 1995. – 240 с.

15.Сухоруков В.В. Неразрушающий контроль / Высшая школа. – Москва, 1991. – 283 с.

16.Olympus NDT. Introduction to Phased Array Ultrasonic Detection.- USA, Waltham, 2004.

17.Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: A review Bruce W. Drinkwater, Paul D. Wilcox Department of Mechanical Engineering, University of Bristol, University Walk, Bristol, BS3 1TR, UK

18.Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.