

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ
КАФЕДРА АКУСТИЧНИХ ТА МУЛЬТИМЕДІЙНИХ
ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

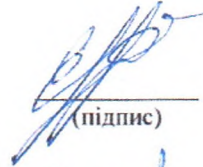
 С.А. Найда

“01” червня 2020р.

Дипломна робота
на здобуття степеня бакалавра

з напрямку підготовки(спеціальності) 171 Електроніка
на тему: Розробка гідроакустичного басейну

Виконав студент IV курсу, групи ДГ-62
Максимець Олена Владиславівна


(підпис)

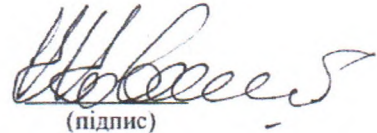
Керівник проф. каф. А та АЕ д.т.н. Коржик О.В.


(підпис)

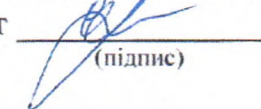
Консультант _____

(підпис)

Рецензент _____


(підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент 
(підпис)

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Факультет (інститут) _____ електроніки _____
(повна назва)

Кафедра _____ акустичних та мультимедійних систем _____
(повна назва)

Освітньо-кваліфікаційний рівень _____ бакалавр _____
(назва ОКР)

Напрямок підготовки _____ 171 Електроніка _____
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Найда С.А.

(підпис)

«09» червня 2020 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Максимець Олені Владиславівні

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи: Розробка гідроакустичного басейну

керівник роботи Коржик Олексій Володимирович д.т.н., проф.,
(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «25» травня 2020 р. № _____

2. Строк подання студентом роботи 10 червня 2020 року

3. Вихідні дані до роботи: басейн має забезпечувати проведення вимірювань, починаючи з 5 кГц, забезпечувати режим вільного поля (якість безеховості), робочий об'єм басейну має бути не гірше 20-25%.

3. Вихідні дані до роботи: басейн має забезпечувати проведення вимірювань, починаючи з 5 кГц, забезпечувати режим вільного поля (якість безеховості), робочий об'єм басейну має бути не гірше 20-25%.

4. Зміст пояснювальної записки: 1. Аналітичний огляд літературних джерел, формулювання мети конструювання гідроакустичних басейнів, розгляд основних задач; 2. Характеристики, необхідні для вимірювання гідроакустичного басейну; 3. Розрахунок вимірювального басейну та аналіз отриманих результатів.

5. Перелік графічного матеріалу Ілюстративний матеріал(презентація в Power Point)

6. Орієнтовний перелік публікацій: «Акустический журнал», 2003, том 49; <http://www.servotechnica.ru/news/index.pl?id=272> («Сервотехніка» - новий вимірвальний басейн);

<https://oborona.ru/includes/periodics/defense/2013/0620/233710977/detail.shtml> (сфери застосування гідро акустики у ХХІ столітті); Прибылов В. П.

Исследование и разработка алгоритмов передачи информации в каналах связи со значительным временем распространения сигналов: дис. ... канд. техн. наук / В. П. Прибылов. Новосибирск, СибГУТИ, 2003. 155 с.; Исаев А.Е. Точная градуировка приемников звукового давления в водной среде в условиях свободного поля. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2008, 369 с.; Исаев А.Е., Поликарпов А.М., Черников И.В. Акустические сигналы и поля для метрологических работ в лабораторном гидроакустическом бассейне. Статья в настоящем номере, с.76-102.; Лопашев Д.З. Исследование звукового поля в большом измерительном бассейне/ Исследования в области акустических и гидроакустических измерений// Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов СССР. Вып. 73(133). М.: Стандартгиз, 1963, с. 31- 40.; Stephen P. Robinson et al. An international key comparison of free-field hydrophone calibrations in the frequency range 1 to 500 kHz// JASA. 2006, vol. 120, № 3, p. 1366 1373.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний огляд літературних джерел, формулювання мети конструювання гідроакустичних басейнів, розгляд основних задач	13.05.2020	<i>Buk</i>
2	Характеристики, необхідні для вимірювання гідроакустичного басейну	20.05.2020	<i>Buk</i>
3	Розрахунок вимірювального басейну та аналіз отриманих результатів	3.06.2020	<i>Buk</i>
4	Оформлення пояснювальної записки до дипломної роботи та ілюстративного матеріалу	10.06.2020	<i>Buk</i>

О.В. Максимець

(підпис)

Керівник роботи

(підпис)



(ініціали, прізвище)

О.В. Коржик

(ініціали, прізвище)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломної роботи першого (бакалаврського) рівня вищої освіти студента
кафедри акустичних та мультимедійних електронних систем факультету
електроніки Національного технічного університету України «Київський
політехнічний інститут імені І.Сікорського»

Максимець Олени Владиславівни

на тему: «Розробка гідроакустичного басейну»

Київ – 2020

РЕФЕРАТ

Розробка гідроакустичного вимірювального басейну // Дипломна робота на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр». Максимець О.В. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Факультет електроніки, кафедра акустичних та мультимедійних електронних систем, група ДГ-62. – К.:НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського», 2020, с. – 63, рис. – 27, табл. – 1.

У цій роботі розглядається можливість побудови та розробка гідроакустичного вимірювального басейну за методами пасивного заглушення при роботі в імпульсних режимах. Досліджено метод оптимізації основних параметрів басейну. Метою є розробка водозаповненого басейну, для вимірювань основних характеристик акустичних приладів в умовах безеховості та низького рівня пошкоджень. Поширення запитів на такі засоби вимірювань як басейни, а також розвиток сучасного морського приладобудування в наш час викликають значний інтерес, що й визначає тему роботи як своєчасну та актуальну.

Ключові слова: гідроакустичні вимірювання, гідроакустичні системи, імпульсний метод, вільне поле, шуми, частотний діапазон, прийнятий та відбитий сигнали.

ABSTRACT

Design of hydroacoustic measuring pool // Thesis for higher education "bachelor". Maksimets OV National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute

named after Igor Sikorsky". Faculty of Electronics, Department of Acoustic and Multimedia Electronic Systems, DG-62 Group. - Kyiv: NTUU "KPI named after I. Sikorsky", 2020,p. – 65, Fig. - 27, table. - 1.

This paper considers the possibility of construction and development of a hydroacoustic measuring pool by passive attenuation methods when working in pulse modes. The method of optimization of the main parameters of the pool is investigated. The purpose is to develop a water-filled pool to measure the main characteristics of acoustic devices in anechoic conditions and low damage. The spread of requests for such measuring instruments as pools, , which defines the topic of work as timely and relevant.

Key words: hydroacoustic measurements, hydroacoustic systems, pulse method, free field, noise, frequency range, received and reflected signals.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ.....	10
ВСТУП.....	11
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ, ФОРМУЛЮВАННЯ МЕТИ КОНСТРУЮВАННЯ ГІДРОАКУСТИЧНИХ БАСЕЙНІВ, РОЗГЛЯД ОСНОВНИХ ЗАДАЧ.....	12
1.1 Задача гідроакустичних вимірювань.....	12
1.2 Дослідження у сфері гідроакустичних вимірювань.....	13
1.3 Сфери застосування гідроакустики.....	22
Висновки по розділу.....	24
РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ, НЕОБХІДНІ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ГІДРОАКУСТИЧНОГО БАСЕЙНУ.....	25
2.1 Умови створення вільного звукового поля.....	25
2.2 Шуми та перешкоди.....	26
2.2.1 Розпізнавання перешкод.....	27
2.2.2 Виключення перешкод.....	35

2.3 Аналіз статистичних характеристик сигналів і завад в гідроакустичних каналах зв'язку.....	38
2.3.1 Стан проблеми.....	38
2.3.2 Методи і результати дослідження.....	39
2.4 Зниження відбиття.....	44
2.4.1 Теоретичне зниження відбиття.....	46
2.4.2 Вимірювання зниження відбиття.....	47
Висновки по розділу.....	51
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ВИМІРЮВАЛЬНОГО БАСЕЙНУ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ.....	52
Висновки по розділу.....	60
ВИСНОВКИ.....	61
ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА.....	62

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ

ПШ – підводний шум

ГАП – гідроакустичний пристрій

ПП – прийомний пристрій

АКМХ – апаратура контролю метрологічних характеристик

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика

ЕУО – енергетична узгоджена обробка

ВБ – вимірювальний басейн

ВЗП – вільне звукове поле

ГДАС – гідроакустична донна автономна станція

ВСТУП

Така область акустики як гідроакустика на сьогоднішній день розвивається дуже стрімко. В ХХ ст. був здійснений грандіозний прорив у розумінні гідроакустичних явищ. Розвиток гідроакустики сформував основу для найширших досліджень та вдалих розробок у наш час. Зараз знання з гідроакустики розвилися до сучасного високого технологічного рівня, почавшись з примітивних філософських і експериментальних досліджень звуку у воді. Так як в наш час сучасне морське приладобудування розвивається, збільшується попит на використання вимірювальних басейнів. У моїй роботі розробка гідроакустичного басейну здійснювалась за допомогою методів пасивного заглушення при роботі в імпульсних режимах. Як видно з результатів, розробка басейну дає можливість проводити вимірювання характеристик акустичних приладів в умовах безеховості.

В першому розділі розглядались види гідроакустичних вимірювань та систем, сфери застосування та основні напрямлення гідроакустики, описані причини необхідності конструювання тих чи інших акустичних систем, наведені

експериментальні результати минулих досліджень та певні особливості побудови вимірювальних басейнів.

В другому розділі було розглянуто характеристики, параметри, необхідні умови і т.д., що є необхідними знаннями при конструюванні гідроакустичного басейну. Таким чином, було описано головну умову для визначення характеристик спрямованості вимірювання шуму – вільне звукове поле; виявлено звукові перешкоди, їхні види, способи для їхнього вимірювання та методи боротьби з ними і, звісно, розглянуто шуми, їхні види, спосіб зменшення шумів; зниження відбиття.

В третьому і завершальному розділі наведено головні вимірювання параметрів басейну, при яких головною метою було забезпечити зменшення шумів та пророблено аналіз отриманих даних.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ, ФОРМУЛЮВАННЯ МЕТИ КОНСТРУЮВАННЯ ГІДРОАКУСТИЧНИХ БАСЕЙНІВ, РОЗГЛЯД ОСНОВНИХ ЗАДАЧ

1.1 Задача гідроакустичних вимірювань

Дослідження гідроакустичних вимірювань – серйозна тема в сфері військових, промислових та наукових цілей. Звісно, фахівцям доводиться зіштовхуватись з проблемами прийому звуку у воді і генерування в ній акустичних сигналів. Загалом, необхідність розробки різноманітних акустичних методів вимірювань з'явилась з розвитком гідроакустичних засобів воєнного призначення для навігації, локації, зв'язку. На сьогоднішній день можна виділити наступні основні напрямлення розвитку в області градування гідроакустичних вимірювальних систем:

- Вимірювання частотної характеристики чутливості на «безперервній» сітці частот
- Використання сигналів зі складним спектром
- Вимірювання частотної характеристики в полосі частот

- Вимірювання частотної характеристики габаритних вимірювальних лабораторних та напівнатурних гідроакустичних басейнів

При конструюванні гідроакустичних систем та басейнів приймаються до уваги особливості, що викликані роботою промислових підприємств і транспорту, тому доводиться приймати міри акустичного захисту для зменшення власних шумів басейну. Зазвичай басейнами є залізні резервуари, які встановлюються на бетонній подушці з урахуванням розташування підйомно-опускних поворотних пристроїв, які забезпечують установку випромінювачів, приймачів та ін. Для реалізації заглушення власних шумів басейну використовують спеціальні клинові пристрої. Вони виготовляються з гуми з повітряними порожнинами, суміші бетону і тирси або з дерева і забезпечують порівняно задовільне поглинання звуку. Та, на жаль, часто при побудові басейну виникає проблема, яка полягає у тому, що розміри клинів досягають до 1 м, а це зменшує робочий об'єм басейну.

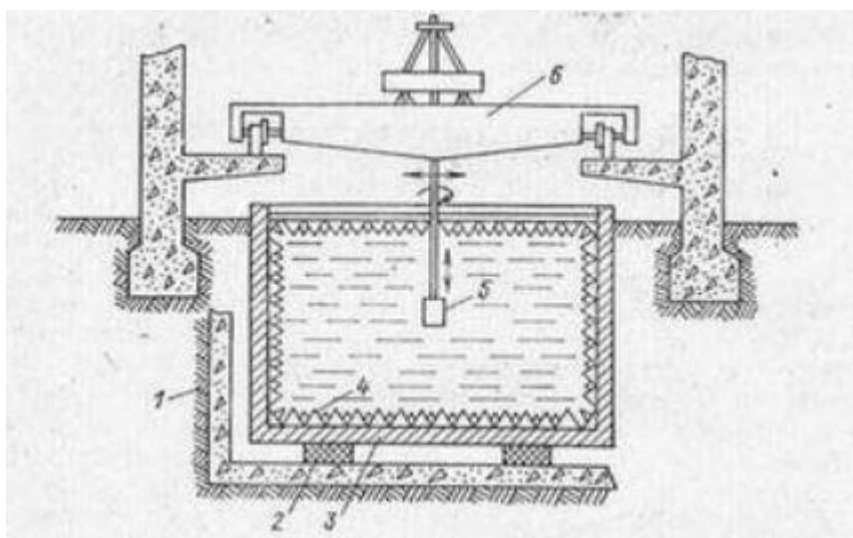


Рис. 1.1 Конструкція типового гідроакустичного басейну

1 – бетонний котлован; 2 – амортизація; 3 – металевий резервуар; 4 – звукопоглинаючі клина; 5 – підйомно-поворотний пристрій; 6 – пересувний міст з візком.

1.2 Дослідження у сфері гідроакустичних вимірювань

В вересні 2012 року на замовлення кафедри акустики «Нижньогородського державного університету ім. М.І.Лобачевського» компанією «Сервотехніка» був заснований план модернізації лабораторного комплексу для створення нової системи – маніпулятора для переміщення прийомно-випромінювальних акустичних приладів в об'ємі лабораторного басейну. Передумовою до виконання всіх цих робіт стало те, що минула система застаріла і не могла справно працювати. Інженери компанії «Сервотехніка» розробили і провели всі необхідні роботи для вводу системи в експлуатацію, представивши наступні технічні показники:

- Централізована система змазки
- Маса корисного навантаження – 2 кг
- Максимальна маса, яку можна переміщувати – 10 кг
- Тип трансмісії – зубчата, рейкова передача, роликові напрямні покачування
- Наявність лазерного далекоміру з похибкою вимірювання не гірше 0,5 мм
- Кількість координат, якими можна керувати – 4
- Конструкцією системи передбачені програмні і електромеханічні засоби по передбаченню аварійного зіткнення
- Діапазон швидкостей обертання відносно осі Z – 0-5 град/с
- Переміщення по лінійним осям X,Y,Z – 0-30 мм/с
- Максимальна швидкість переміщення по лінійним осям X,Y,Z – 220 м/с
- Максимальний кут обертання поворотної вісі - 360°

Інтерфейс оператора реалізований на персональному комп'ютері в сфері Windows, що робить його зручним у використанні і відповідає вимогам модернізації минулої системи.



Рис.1.2 Один з кадрів робочого місця для проведення дослідження

Федеральне державне унітарне підприємство Всеросійський науково-дослідницький інститут фізико-технічних і радіотехнічних вимірювань на основі досвіду експлуатації стаціонарних робочих засобів гідроакустичних вимірювань, створених і встановлених спеціалістами ще в 80-х рр. минулого століття на полігонах, тенденцій розвитку вітчизняного підводного кораблебудування та зарубіжних гідроакустичних систем вимірювання та виявлення, в 2003 році нового покоління визначили, що основними науково-технічними задачами комплексу нових робіт є:

- Забезпечення проведення вимірювань просторових характеристик гідроакустичного поля (ГАП) об'єктів, включаючи вимірювання в горизонтальній площині
- Забезпечення проведення достовірних вимірювань слабких гідроакустичних сигналів (при відношенні сигнал-перешкода менше 1)
- Отримання вихідної інформації, необхідної для пошуку і виявлення джерел підводного шуму (ПШ) об'єктів в степових і ходових режимах
- Розробка вбудованих систем калібрування вимірювальних гідрофонів і трактів передачі інформації
- Зниження систематичної складової інструментальної похибки вимірювань в діапазоні частот від 1 Гц до 100 кГц

- Проведення вимірювань параметрів ГАП об'єктів в реальних режимах експлуатації

Дослідження чутливості і діаграми спрямованості прийомного пристрою (ПП) в зборі в гідроакустичному басейні на спеціально створених в процесі виконання роботи еталонних установках при використанні псевдошумових градуювальних сигналів показали досить малий вплив корпусу ПП на результати вимірювань. Відмінність даних градуювань, отриманих для ПП в зборі і просто для одного гідрофону, що входить до його складу, в ультразвуковому діапазоні частот не перевищує 2-3 дБ, причому ця відмінність може бути врахована як поправка до результатів вимірювань, а не похибка вимірювань.

Випробування ПП в реальних умовах експлуатації показали його високу перешкодозахищеність від завад гідродинамічної природи (течії, турбулентності, вібрації елементів системи в потоці). Після довготривалих безперервних вимірювань середньоквадратичних значень фонових шумів в смугах частот третьоктавних фільтрів 2, 10, 800 і 10 000 Гц було виявлено відсутність впливу припливів-течій на приймальний пристрій. У той же час спостерігається сувора залежність рівнів фонових шумів від погодних умов практично у всьому робочому діапазоні частот за винятком діапазону в районі 10 Гц, рівень в якому залишається незмінним в часі.

Важливим елементом підвищення якості, достовірності та зменшення інструментальної складової похибки вимірювань в створених ПП є включення в їх склад апаратури контролю метрологічних характеристик (АКМХ) вимірювальних гідрофонів і трактів передачі інформації.

АКМХ забезпечує проведення контролю в електричному (ЕК) і акустичному (АК) режимах. У режимі ЕК тестовий сигнал подається на входи досліджуваних вимірювальних трактів послідовно в певні точки. У режимі АК тестовий сигнал через підсилювач потужності подається на випромінювач, встановлений на приймальному модулі РСІ, і далі приймається досліджуваним вимірювальним трактом.

Електричний тестовий сигнал, що подається в режимі ЕК послідовно через чутливий елемент гідрофону, електронну частину приймального модуля, лінію зв'язку і берегові погоджуючі пристрої, дозволяє вимірювати амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) наскрізного електричного тракту системи і контролювати її стабільність у часі. Тестовий сигнал, що подається на вхід системи, може бути двох типів: гармонійний, що генерується вмонтованим в апаратуру приймального модуля цифроаналоговим перетворювачем, і шумовий, що надходить з генератора білого шуму і має нормоване значення спектральної щільності потужності.

Рівні вхідних сигналів, які реально потрібно вимірювати, лежать значно вище власних шумів самої вимірювальної системи, але в ряді випадків «корисний» сигнал дуже зашумлений фоновими перешкодами, що ускладнює проведення достовірних вимірювань слабких гідроакустичних сигналів (при відношенні сигнал / перешкода менше 1).

Було виявлено два підходи до вирішення цієї проблеми. Перший заснований на розробці завадостійких методів, алгоритмів і методик, що використовують традиційну схему вимірів за допомогою одиночного ненаправленого гідрофону, але забезпечують при цьому проведення вимірювань параметрів гідроакустичних сигналів за рівнем, що не перевищують фонові шуми. Даний підхід розвивається вже протягом тривалого часу і має ряд очевидних переваг, а саме, простота технічної реалізації, хороша перешкодозахищеність і широке впровадження в практику гідроакустичних вимірювань. У повному обсязі цей підхід, включаючи розроблені і атестовані методики виконання вимірювань, реалізований в КТС «Тополя», який забезпечує виконання вимірювань рівнів ПШ з нормованими характеристиками як в третьоктавних, так і в вузьких смугах частот при відношенні сигнал / перешкода до -12 дБ і більше.

Однак при вирішенні ряду завдань, включаючи вимірювання параметрів ГАП малошумних об'єктів в горизонтальній площині за допомогою одиночного гідрофону, потенціалу методів енергетичної узгодженої обробки (ЕУО) може

виявитися недостатньо для вимірювання характеристик джерел з малим рівнем випромінювання. У цьому випадку доцільно використовувати другий підхід, заснований на застосуванні вимірювальних систем, що володіють спрямованими властивостями і забезпечують поліпшення відношення сигнал / перешкода вже на виході свого вимірювального каналу, з наступним застосуванням процедур ЕУО або аналогічних.

Одним із зразків вимірювальних комплексів контролю акустичних характеристик морських об'єктів є спеціальна гідроакустична система СГАСУ-496Е, розроблена також у Всеросійському науково-дослідному інституті фізико-технічних і радіотехнічних вимірювань. Головною і найбільш важливою відмінністю СГАСУ-496Е від всіх існуючих за кордоном вимірювальних комплексів є можливість вимірювання рівнів шумовипромінювання підводних човнів при співвідношенні сигнал / перешкода значно менше 1 - до -6 дБ (рис. 1.3). При цьому комплекс заснований на ненапрямлених підводних прийомних системах з поодинокими гідрофонами, що забезпечує повну спадкоємність і порівнянність результатів вимірювань з отриманими раніше даними.

Висока перешкодозахищеність вимірювань забезпечується використанням розроблених у «ВНДІФТРВ» спеціальних підходів до обробки вимірювальної інформації, що враховують певні відмінності фізичних принципів формування сигналів підводного шуму корабля і перешкоди акваторії. Створені методи пройшли широку апробацію при вимірах малошумних морських об'єктів протягом ряду років і показали високу ефективність і стійкість. Була також проведена робота з метрологічної атестації методик виконання вимірювань і отримані відповідні сертифікати.



Рис.1.3

Комплекс СГАСУ-496Е призначений для вирішення наступних основних завдань:

- вимірювання рівнів шумовипромінювання об'єктів в 1/3-октавних частотних смугах на відповідність заданим нормам і вимогам при відношенні сигнал / перешкода до -6 дБ;
- вимірювання рівнів шумовипромінювання об'єктів у вузьких частотних смугах при відношенні сигнал / перешкода до -6 дБ;
- контроль параметрів руху об'єкта в ході виконання вимірювальних проходів;
- отримання інформації, необхідної для пошуку і виявлення джерел підвищеного шуму.

Робота з гідроакустичним сигналом тиску починається з його перетворення в електричний сигнал. Для цього призначені виносні вимірювальні бази (ВБ). Вони забезпечують перетворення гідроакустичного сигналу, що діє в точці розташування гідрофону, в електричний сигнал і передачу його апаратурі обробки.

Корпус ВБ виконаний з звукопрозорого матеріалу і має високу інерційність за рахунок великого, заповненого водою обсягу. Це забезпечує мінімальні спотворення сигналу, і мінімізує рівень власних шумів бази, викликаних коливаннями корпусу на системі підвіски, що особливо необхідно при вимірах

малошумних об'єктів. Застосування звукопрозорості матеріалу обтічника і раціональне розміщення обладнання всередині нього гарантують відсутність спотворень сигналу, що викликаються внутрішніми перевідбиваннями.

У вимірювальній базі застосовується одиночний широкосмуговий гідрофон, що володіє рівномірною амплітудно-частотною характеристикою у всьому робочому діапазоні від 5 Гц до 80000 Гц.

До складу підводного пристрою може входити малогабаритний підйомно-опускний пристрій, який забезпечує установку носія апаратури на необхідну глибину. Зовнішня вимірювальна база може використовуватися в режимі дрейфу (рис. 1.4), а також в режимі постановки на дно акваторії(рис.1.5).



Рис.1.4



Рис.1.5

При цьому забезпечується вирішення завдань вимірювання рівнів підводного шуму морських об'єктів на відповідність нормам шумності і захищеності від виявлення радіогідроакустичних буїв, вимірювання на відповідність нормам шумності і захищеності від мінної зброї, вимірювання для оцінки захищеності від засобів далекого гідроакустичного виявлення і торпедної зброї.

Електричні сигнали з виходів ВБ надходять на вхід апаратури аналізу, що складається з чотирьохканальних 1/3-октавних і вузькосмугових аналізаторів спектрів. Аналізатори спектра забезпечують 1/3-октавний і вузькосмуговий аналіз в широкому діапазоні частот без втрат і пропуску даних з високою точністю, похибка спектрального аналізу не перевищує 0,5 дБ. Апаратура спектрального аналізу побудована по безкомутаційній схемі і виконує

паралельний розрахунок 1/3-октавних поточних спектрів по 4-м незалежним каналам і вузькосмугових поточних спектрів по 8 незалежним каналам по всіх вимірювальних приймачах протягом всього вимірювального проходу. При роботі апаратури проводиться відображення миттєвих спектрів по всіх каналах обробки.

Управління роботою комплексу проводиться з головного командного пульта управління процесом вимірювань, де створюється опис конкретного об'єкта, здійснюється стеження за процесом накопичення даних, виконується обробка накопичених реалізацій при вирішенні задач вимірювання рівнів в 1/3-октавних і вузьких частотних смугах. На даному етапі застосовуються оригінальні перешкодостійкі методи і алгоритми обробки вимірювальної інформації, що забезпечують вимір рівнів при відношенні сигнал / перешкода до мінус 6 дБ. Результати вимірювань автоматично оформляються у вигляді протоколів, що відповідають різним керівним і нормативним документам.

Рішення завдання вимірювання рівнів підводного шуму на ходових режимах неможливо без визначення параметрів руху об'єкта щодо підводної приймальної системи. Для цього використовується апаратура розрахунку координат і параметрів руху, що виконує обробку даних і розрахунок швидкості, мінімальної дистанції на проході і момент часу настання мінімальної дистанції по всіх вхідних каналах. Апаратура призначена для обробки двох основних видів сигналів систем вимірювання дистанцій - імпульсних і тональних сигналів. Імпульсні сигнали дозволяють не тільки виконувати розрахунок параметрів руху, а й відстежувати поточні координати об'єкта, однак призводять до помітних спотворень спектру вимірюваного сигналу в широкому діапазоні частот. Використання тональних сигналів мінімізує спотворення спектра корисного сигналу і дозволяє виконувати розрахунок швидкості і мінімальної дистанції на проході.

До складу апаратури входять блоки генерації сигналів на основі високостабільних кварцових або рубідієвих генераторів для підтримки автономних шкал часу.

Всі вихідні дані і результати розрахунків зберігаються в базі даних і можуть бути використані для подальшого порівняльного аналізу.

Крім того, до складу вимірювального комплексу СГАСУ-496Е входять атестовані методики виконання вимірювань.

Зазвичай в якості вимірювального гідроакустичного судна (носія вимірювального комплексу) використовується спеціально спроектований корабель, оснащений лабораторними приміщеннями, малошумними дизель-генераторами і т.д. Однак створення такого судна є досить складним технічним завданням, а його побудова вимагає значних фінансових коштів. Набагато дешевшим рішенням є дообладнання готового корабля. Тому розроблені варіанти розміщення комплексу СГАСУ-496Е в двох стандартних морських контейнерах, які можуть бути встановлені на відносно невеликому судні.

В одному контейнері розміщується апаратура обробки даних, у другому контейнері знаходяться виносні вимірювальні бази і засоби постановки.

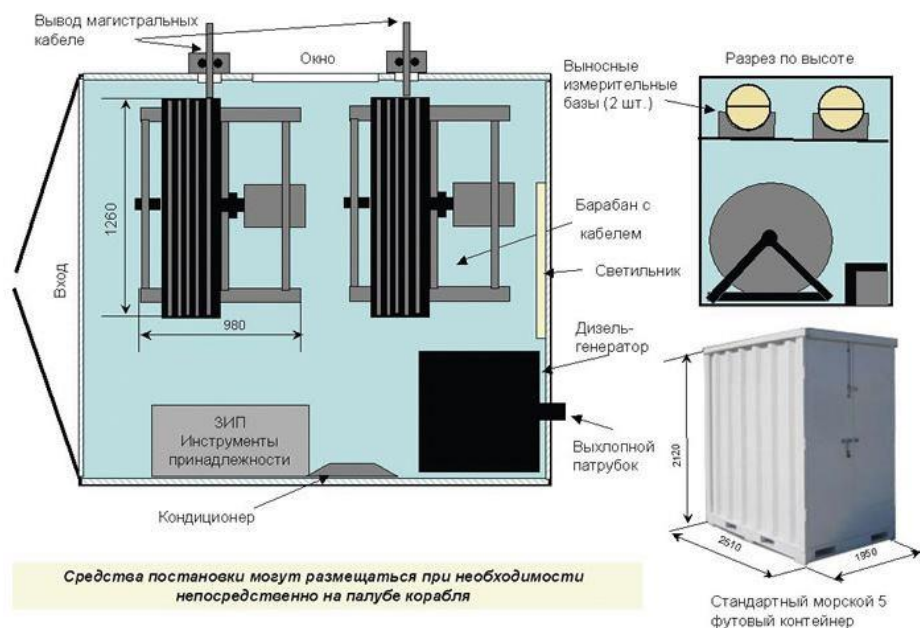


Рис. 1.6 План розміщення підводних пристроїв в стандартному 5-футовому морському контейнері

Таким чином, застосування вимірювального комплексу СГАСУ-496Е, що забезпечує вимірювання при відношенні сигнал / завада менше 1 (коли рівень сигналу об'єкта в два рази слабкіше рівнів шумів акваторії), дозволяє проводити вимірювання рівнів випромінювання самих малошумних об'єктів в короткі терміни і ефективно здійснювати пошук і виявлення джерел. Це забезпечує підтримку високої акустичної якості кораблів і підводних човнів протягом всього терміну експлуатації, мінімізує можливість їх виявлення і знищення мінно-торпедною зброєю, забезпечує виконання поставлених завдань у визначені терміни з високою ефективністю. Крім того, комплекс забезпечує вимірювання підводного шуму цивільних судів, в тому числі і таких досить малошумних, як рибальські та науково-дослідні судна різного призначення.

1.3 Сфери застосування гідроакустики

Найбільш суттєві застосування гідроакустики:

- Для виявлення шумових сигналів і визначення напрямлення на них
- Для випромінювання акустичних сигналів, виявлення відбитих сигналів і визначення координат
- Класифікації виявлених сигналів
- Морська навігація
- Звукопідводний зв'язок
- Рибопошукова розвідка
- Сфери діяльності за освоєнням багатств дна Світового океану
- Тренування морських тварин.

Пріоритетні на сьогоднішній день напрямлення гідроакустики:

- Системи із гнучкими, протяжними буксованими антенами для роботи в широкому діапазоні частот для надводних кораблів і підводних човнів, а також стаціонарні
- Активні, пасивні і активно-пасивні стаціонарні гідроакустичні комплекси для захисту шельфової зони від несанкціонованих проникнень надводних кораблів і підводних човнів

- Гідроакустичні перетворювачі, антени, фазовані антенні решітки складної форми, які мають до декількох тисяч прийомних каналів
- Акустичні екрани і звукопрозорі обтічники
- Системи передачі інформації гідроакустичним каналом
- Адаптивні системи обробки гідроакустичної інформації в умовах складних гідроакустичних та сигнально-перешкодних обставин
- Класифікатори цілей за їх сигнатурами й за тонкою структурою звукового поля
- Вимірювачі швидкості звуку для підводних кораблів та підводних човнів.

Застосування гідроакустичних вимірювань реалізується за допомогою гідроакустичних пристроїв, таких як:

- Гідроакустичні комплекси;
- Ехолоти;
- Гідролокатори;
- Шумопеленгатори.

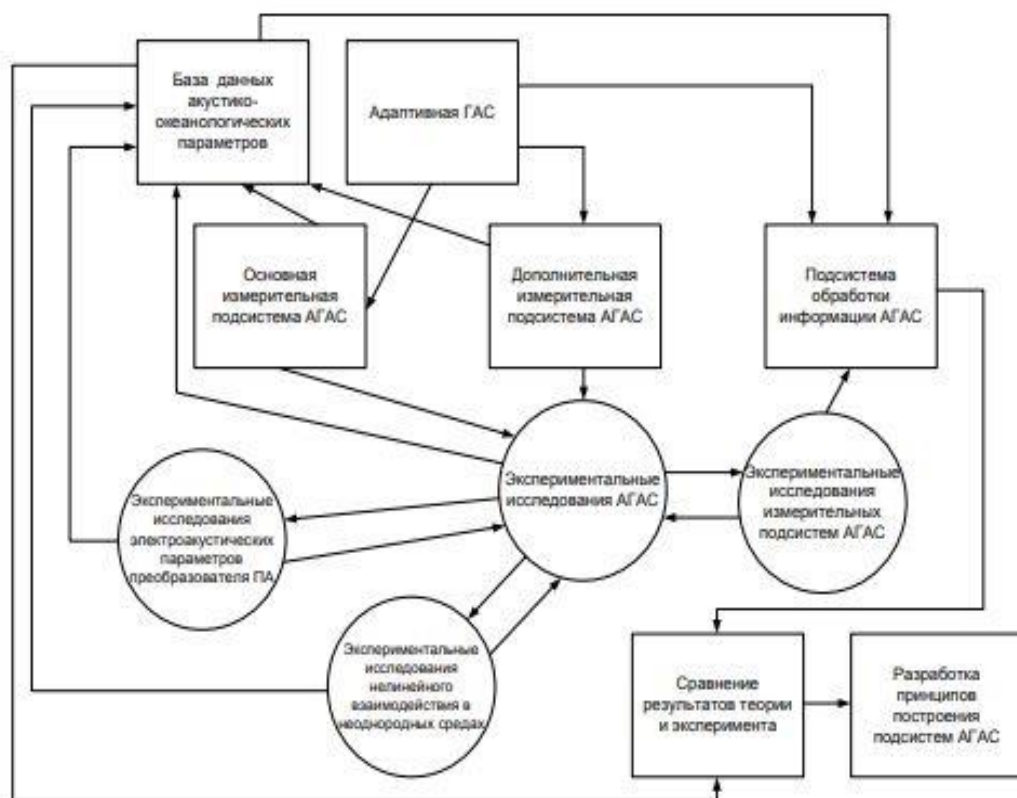


Рис.1.7 Основні напрямлення експериментальних досліджень моделей адаптивних гідроакустичних засобів

Висновки по розділу

В першому розділі:

- досліджено особливості конструювання акустичного басейну;
- описані дослідження у сфері гідроакустичного обладнання та основні напрямлення розвитку гідроакустики;
- розглянуто теоретичну інформацію по темі та певну проблематику реалізації акустичних систем у реальних умовах і зроблені певні висновки з приводу подальшої розробки дипломної роботи.

РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ, НЕОБХІДНІ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ГІДРОАКУСТИЧНОГО БАСЕЙНУ

2.1 Умови створення вільного звукового поля

Вільне звукове поле (ВЗП) – це звукове поле в однорідному ізотропному середовищі, де вплив обмежувальних поверхонь – дуже незначний. Простір, в якому звукові хвилі вільно поширюються, не зустрічаючи відбиваючих поверхонь, у виробничих умовах зустрічаються дуже рідко.

Метод ВЗП використовують у приміщеннях з високим поглинанням, у відкритому просторі, затухаючих камерах або басейнах.

Відповідно до ГОСТ 8.055 – 73 при застосуванні методу ВЗП у камерах, басейнах або на відкритому просторі можна визначати шумові характеристики машин та приладів.

У ВЗП інтенсивність звуку зменшується обернено пропорційно квадрату відстані від джерела, а звуковий тиск - по лінійній зворотній залежності. Якщо немає можливості проводити вимірювання у відкритому просторі, то умови

вільного звукового поля можна створити на території певного підприємства побудовою гідроакустичного басейну, завдяки чому буде поглинатись падаючий звук.

ВЗП є обов'язковою умовою для визначення характеристик спрямованості випромінювання шуму. Метод визначення в відбитому звуковому полі застосовується для вимірювання шуму вище 125 Гц тоді, коли не передбачено визначення спрямованості випромінювання шуму.

В плоскій звуковій хвилі ВЗП інтенсивність і звуковий тиск чисельно збігаються.

За допомогою мікрофонів методом вільного звукового поля вимірюють шуми машин, транспорту, частотні характеристики вимірювальної та мовної апаратури. При цьому мікрофон розташовують в контрольній точці поля або в точках поля, рівномірно розподілених на вимірювальній поверхні. Контроль звукового поля проводять шляхом вимірювання залежності звукового тиску від відстані до акустичного центру джерела і порівняння вимірної залежності з теоретичною.

В результаті вимірювань у ВЗП можна визначити звукову потужність і інтенсивність звуку в кожній точці з наступним усередненням. Якщо усереднювати значення інтенсивності звуку, виміряні в n -точках, і вони відрізнятимуться один від одного менше ніж на 5 дБ, то за середню інтенсивність прийнято брати середнє арифметичне значення.

Присутність фонового шуму при опроміненні імпульсами потребує коригування кривих, однак передбачається той факт, що умови реверберації враховуються кривою б-тривалості (рис.1.8).

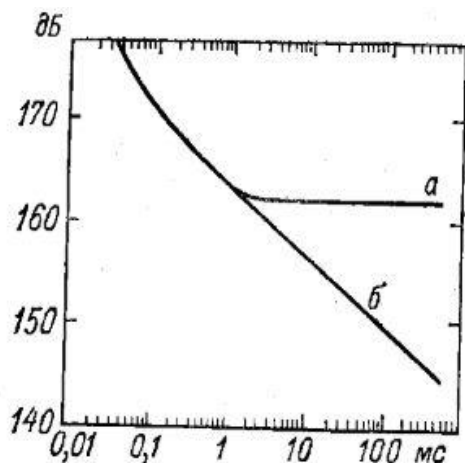


Рис 2.1 Безпечний рівень звукового тиску імпульсів в залежності від тривалості хвилі тиску (крива а) або тривалості огинаючої сигналу (крива б)

Якщо враховувати доцільність складнощів вимірювання імпульсів, особливо з малою відмінністю рівнів імпульс-фон, а також в умовах реверберації, необхідним є використовувати критерії, розроблені для неперервного шуму.

Розповсюдження шуму відбувається за закономірностями ВЗП. Рівень шуму знижується обернено пропорційно відстані r , при цьому слід враховувати, якими є джерела звуку – точковими, лінійними або плоскими.

Випадок зі зниженням рівня відносно розповсюдження шуму від однієї відбиваючої поверхні, яке може відбуватись вільно у всі сторони, зустрічається рідко. При розповсюдженні звуку як у вільному, так і у закритому просторі звукова хвиля втрачає енергію внаслідок поглинання її поверхнями, на які вона падає. В загальному випадку рівень звуку підвищується в результаті відбиття звукових хвиль від твердих перешкод, тому збільшення рівня залежить від взаємного розташування джерела, перешкоди та приймача звуку.

2.2 Шуми та перешкоди

Акустичний шум представляє собою випадковий процес, тому при його вимірюванні використовують такі ж енергетичні величини, як при вимірюванні випадкової вібрації.

В найпростішому випадку вимірюють повний рівень звукового тиску акустичного шуму. Однак таке вимірювання не дає уявлення про розподіл частот шуму. Тому в апаратуру для вимірювання акустичного шуму вводять коригуючі фільтри, частотні характеристики яких позначаються буквами А, В, С і D. Характеристика А в найбільшій степені наближає вимірювання акустичного шуму до сприйняття звуку біологічним створінням.

Характеристика В більш розширена в області низьких частот. Характеристика С в незначній мірі залежить від частоти в звуковому діапазоні. Частотна корекція за допомогою характеристики D призначена для вимірювань авіаційного шуму.

Для того, щоб вимірювати акустичні шуми, використовують вимірювальні мікрофони. Найбільше розповсюдження отримали мікрофони конденсаторної, п'єзоелектричної та динамічної систем.

Дія конденсаторного мікрофону полягає в перетворенні звукового тиску, що поступає на його мембрану, зміні ємності конденсатора, що створений мембраною, нерухомим електродом та повітряним проміжком між ними.

Дія п'єзоелектричного мікрофону полягає у виникненні змінного електричного потенціалу на п'єзоелектричній пластині при впливі на неї звукового тиску. Напруга, що виникає на вихідних затискачах, надходить до входу підсилювача.

За допомогою мікрофонів методом вільного звукового поля вимірюють шуми машин, транспорту, частотні характеристики вимірювальної та мовної апаратури. При цьому мікрофон розташовують в контрольній точці поля або в точках поля, що рівномірно розподілені на вимірювальній поверхні. Контроль звукового поля проводять шляхом вимірювання залежності звукового тиску від відстані до акустичного центру джерела і порівняння вимірної залежності з теоретичною.

Методом дифузного звукового поля вимірюють шуми машин, звукоізоляцію огорожуючи конструкцій, звукопоглинання матеріалів, характеристики акустичної апаратури по дифузному полю. Мікрофон розташовують в кількох точках області дифузного поля і визначають середнє по об'єму значення рівня звукового тиску в октавній або трьох-октавній смугах частот.

2.2.1 Розпізнавання перешкод

По-перше, при вимірюваннях присутні перешкоди від інших джерел періодичних сигналів, таких як силова мережа промислової частоти і її гармоніки. При роботі в діапазоні частот від 500 до 1500 кГц перешкоди можуть створюватись від місцевих радіостанцій. Акустичні експерименти, які проводяться в тому ж або в сусідньому водоймищі, можуть створювати перешкоди одне одному. Такі перешкоди можна виявити по чистоті інтерферуючого сигналу і стабільності його частоти.

По-друге, існують перешкоди від відбиттів, наводок і стоячих хвиль. Перешкоди від відбиттів і стоячих хвиль подібні до таких оптичних явищ, як дифракція, інтерференційні полоси, ефект дзеркал Ллойда. Наводка представляє собою електричний або електромагнітний сигнал, який проникає з тракту випромінення безпосередньо в прийомний такт окрім акустичного шляху розповсюдження. Сигнал хвильової завади проходить шлях, що відрізняється від прямого сигналу по амплітуді і фазі, але завжди має однакову з ним частоту. Завада розпізнається по регулярним періодичним змінам амплітуди в залежності від частоти, що показано на рис. 2.2.

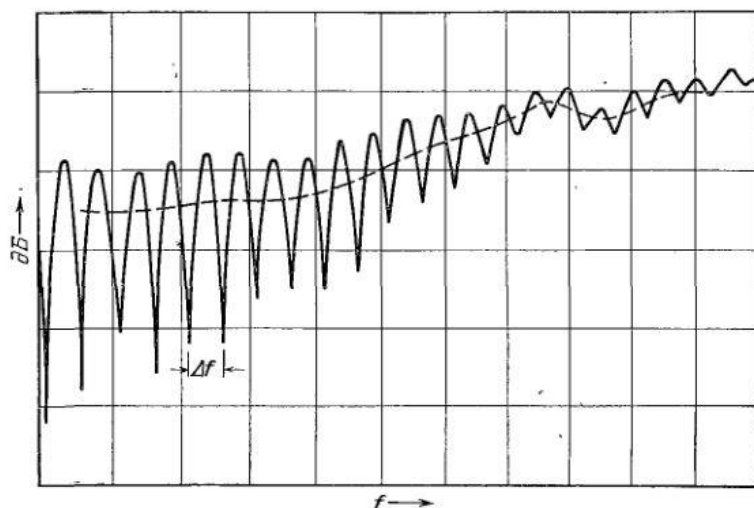


Рис. 2.2 Залежність вихідної напруги гідрофона від частоти, що ілюструє типову осцилюючу картину інтерференційної перешкоди, яка виходить під впливом поверхневих спотворень. Жирною кривою показана виміряна сума прямого та відбитого сигналів, пунктиром – прямий сигнал

Частотний інтервал Δf можна використовувати як засіб допомоги для визначення типу та джерела хвильової перешкоди.

Якщо дві хвилі, які створюються одним і тим самим джерелом, проходять шляхи, які відрізняються одне від одного на Δx , то різниця фаз в кінці шляхів буде дорівнювати $k\Delta x$, або $2\pi f\Delta x/c$, де k, f і c – звичайні позначення хвильового числа, частоти і швидкості звуку. Якщо Δx дорівнює цілому числу хвиль, то хвилі інтерферують конструктивно, або складаються. Якщо Δx складає непарне число на півхвиль, то хвилі інтерферують деструктивно, тобто віднімаються. При зміні частоти хвилі поперемінно складаються і віднімаються, в результаті чого виходять осциляції амплітуди, зображені на рис. 2.2.

Частотний інтервал Δf відповідає зміні величини $2\pi\Delta f\Delta x/c = 2\pi$ (2.1),

$$\Delta x = c/\Delta f \quad (2.2).$$

Після знаходження Δx по виміряному значенню Δf за допомогою рівняння (2.2) його можна порівняти з різноманітними розмірами, які характеризують експеримент, наприклад, з глибиною басейну або з відстанню між перетворювачами. Таким чином виявляється джерело перешкоди і приймаються міри до його усунення. Для наводки час розповсюдження практично рівний нулю, і тому Δx просто дорівнює відстані d між випромінювачем та гідрофоном. При наявності стоячих хвиль муж

випромінювачем і гідрофоном $\Delta x = 2d$. При відбиттях від границь Δx залежить від геометрії басейну і розташування в ньому перетворювача.

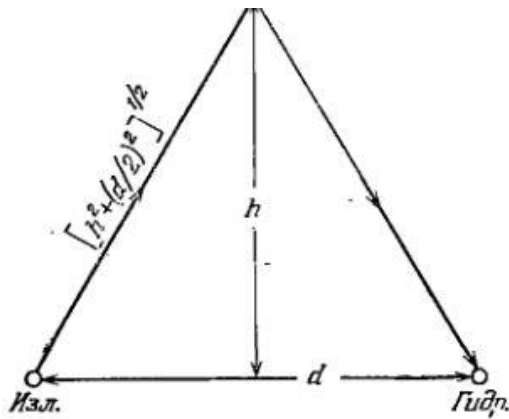


Рис. 2.3 Діаграма для розрахунку різниці ходу Δx для першого відбиття від поверхні

Для першого відбиття від поверхні, що показане на рис 2.3,

$$\Delta x = 2[h^2 + (\frac{d}{2})^2]^{\frac{1}{2}} - d. \quad (2.3)$$

Криві на рис. 2.4 представляють графіки рівняннi 2.3 при $x=d$, $x=2d$. Вони допомагають розпізнавати три розповсюджених типи хвильових перешкод.

Якби шкала по вісі координат на рис. 2.2 була б лінійною, а не логарифмічною, то амплітуда осциляцій мінялася б приблизно синусоїдально. При цьому прямий сигнал дорівнює середньому значенню максимальної і мінімальної амплітуд. Пунктирна крива на рис. 2.2 знайдена шляхом вирахування арифметичного середнього. З рис. 2.2 видно, що інтерференція зменшується зі збільшенням частоти. Це типово для відбиттів від поверхні, оскільки при збільшенні частоти перетворювачі стають більш направленими. Для виникнення стоячих хвиль між двома плоскими перетворювачами їхні хвильові розміри мають бути достатньо великими, щоб вони були хорошими відбивачами, і їхні діафрагми мають бути паралельні між собою з точністю до довжини хвилі.

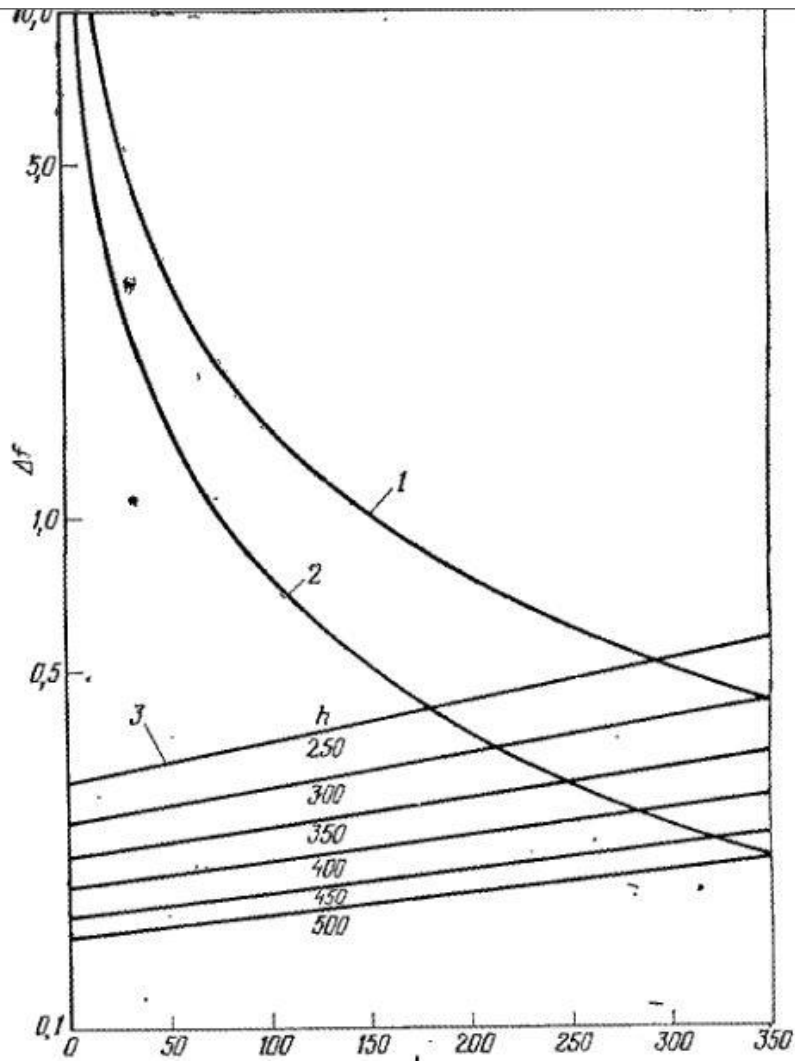


Рис. 2.4 Криві для розпізнавання завад. 1 – наводка: $\Delta f = c/d$ – частотний інтервал, де c – швидкість звуку, d – відстань між перетворювачами. 2 – стоячі хвилі: $\Delta f = c/2d$. 3 – поверхневі відбиття: $\Delta x = 2[h^2 + (\frac{d}{2})^2]^{\frac{1}{2}} - d$, де h – глибина

Звісно, стоячі хвилі зазвичай виникають у верхній частині звукового та у нижній частині ультразвукового діапазонів частот. Сигнал наводки зазвичай не залежить від величини амплітуди акустичного сигналу, тому її присутність більш помітна при малому акустичному сигналі. Наприклад, при градуюванні резонансного гідрофона наводка може бути помітна нижче і вище резонансу, де акустичний сигнал великий і відношення амплітуди наводки до амплітуди сигналу мале.

Описані характеристики перешкод допомагають розпізнавати їх і виключати їхній вплив.

В дрібних озерах є дві відбиваючі границі: дно і поверхня. В цьому випадку інтерференція особливо яскраво виражена, і зазвичай вона визначає нижчу робочу частоту градування. На рис. 2.5 $\Delta f = 200$ Гц.

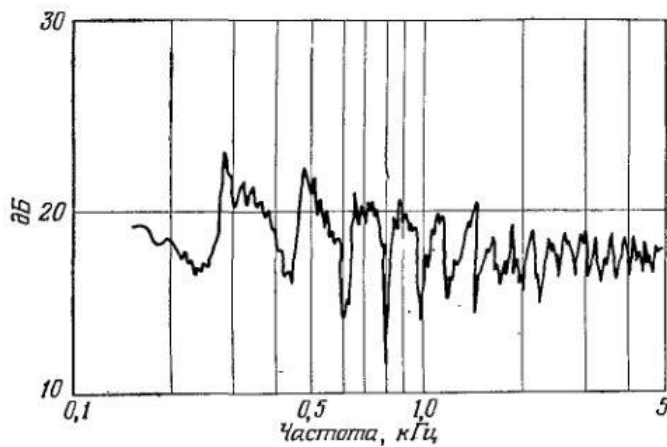


Рис. 2.5 Вихідна напруга гідрофона у випадку, коли випромінювач і гідрофон встановлені на однакових відстанях від поверхні води і дна, покритого бульбашками. Відстань між перетворювачами дорівнює $1/8$ глибини водоймища. Чутливість випромінювача і гідрофона постійні

Амплітуда результуючого сигналу тепер змінюється не синусоїдально, а представляє собою послідовність зубців та піків.

Наступний тип перешкоди зустрічається лише в гідроакустиці. Це резонуючі бульбашки газу. Під бульбашками газу тут розуміються не тільки сферичні бульбашки, які вільно плавають у воді, але й невелика кількість газу, які містяться в отворах, тріщинах, прорізах голівок гвинтів і т.д. Бульбашка, яка збуджується на його резонансній частоті, сильно коливається, пере відбиваючи звукові хвилі і надаючи помітний вплив на площі, приблизно в 20 000 разів більше його поперечного розрізу. Резонансна частота сферичної повітряної бульбашки пропорційна квадратному кореню з абсолютного тиску і обернено пропорційна статичному радіусу. В якості зручного орієнтиру вкажемо, що бульбашка діаметром 1 см, розташований поблизу поверхні, при атмосферному тиску має резонанс на частоті 667 Гц. Знаючи цю частоту і користуючись вказаними вище залежностями, можна вирахувати резонансну частоту менших бульбашок при різних тисках. Бульбашки зазвичай малі в порівнянні з довжиною хвилі і, слідуючи з цього, їхня форма не грає ролі. Тому можна вважати, що резонансна частота бульбашок інших форм приблизно рівна резонансній частоті сферичної бульбашки такого ж об'єму.

Маленькі газові бульбашки можуть бути чіпкими і стійкими.



Рис. 2.6 Типовий ефект газової бульбашки в воді поблизу гідрофона

Тому необхідно уважно досліджувати і перевіряти аномалії на записаних експериментальних кривих для того, щоб впевнитись, чи є ця крива істиною характеристикою перетворювача чи аномалія на ній викликана бульбашкою в середовищі. Оскільки резонансна частота бульбашки залежить від статичного тиску, то при зміні глибини частота аномалії зсунеться. Проте таку перевірку не можна вважати однозначною, оскільки бульбашка може знаходитись всередині чутливого елемента перетворювача, в тому числі в середовищі, яке акустично пов'язує п'єзокристал з водою. Важливо мати уявлення про те, як повітряні бульбашки впливають на результати гідроакустичних вимірювань.

Розглянемо бульбашку з малим радіусом в порівнянні з довжиною звукової хвилі у воді. Бульбашка знаходиться у вільному звуковому полі з тиском p_f . Акустичний імпеданс самої бульбашки складається з гнучкості C заключеного в ньому газу і опору R , який виникає через втрати при стисканнях і розширеннях газу. Маса рухомого газу мала настільки, що нею можна знехтувати. Еквівалентну схему для бульбашки у воді, яка збуджується звуковим тиском, можна скласти на основі теореми Тевеніна. Тиск, що діє на загальмовану бульбашку (або тиск холостого ходу), можна визначити, вважаючи імпеданс бульбашки близьким до нескінченності. Якщо бульбашка маленька, цей тиск рівний тиску у вільному полі. Потім вимикаємо генератор і оцінюємо імпеданс на затискача генератора. Це значить, що ми дивимось на генератор зі сторони навантаження або, якщо говорити мовою акустики, дивимось в середовище з бульбашки і бачимо імпеданс випромінення $R + j\omega m$. Для маленького сферичного випромінювача $\omega m \gg R$. Таким чином, ми отримуємо еквівалентну схему, яка показана на рис. 2.7. Тут u – швидкість зміщення поверхні сферичної бульбашки, і позитивним вважається напрям всередину.

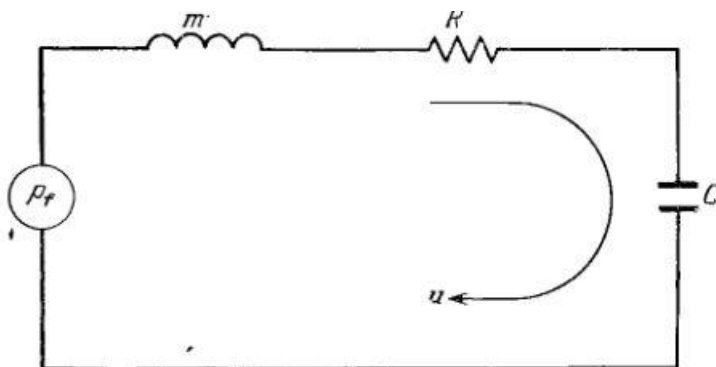


Рис. 2.7 Еквівалентна схема газової бульбашки у воді, яка збуджується тиском вільного поля. p_f , m – під'єднана маса води; R – опір газу в бульбашці і опір випромінювання; C – гнучкість газу в бульбашці; u – лінійна швидкість поверхні бульбашки

Схема на рис. 2.7 є звичайним послідовним резонансним контуром. При постійному p_f відносна амплітуда і фаза u пропорційні адмітансу бульбашки, показане на круговій діаграмі на рис 2.7. Припустимо, що бульбашка і гідрофон розташовані близько одне до одного, так що відстань між ними задовольняє умову $r \ll \lambda$. Нехай бульбашка знаходиться збоку від гідрофона, так що тиск вільного поля в місці їх розташування однакове по амплітуді і фазі. Ця умова відповідає прилипанню бульбашки до чутливого елементу гідрофона. Тоді повний тиск p_H в місці розташування гідрофона і поблизу бульбашки дорівнює сумі p_f і тиску p_r , що випромінюється пульсуючою бульбашкою.

Бульбашка веде себе як точковий сферичний випромінювач, і тиск p_r можна вирахувати по одній з відомих формул, наприклад, $p_r = j\omega p U / r$, де U – об'ємна швидкість. Це значить, що навантаженням випромінювання служить реактивність маси і p_r випереджає на 90° швидкість, направлену назовні. Оскільки за позитивне направлення швидкості ми обрали напрям всередину, то p_r випереджає від'ємну швидкість на 90° або позитивну – на 270° . Тож, годограф p_r відносно p_f є поворотом кола, яке показане на рис. 2.8, на 270° .

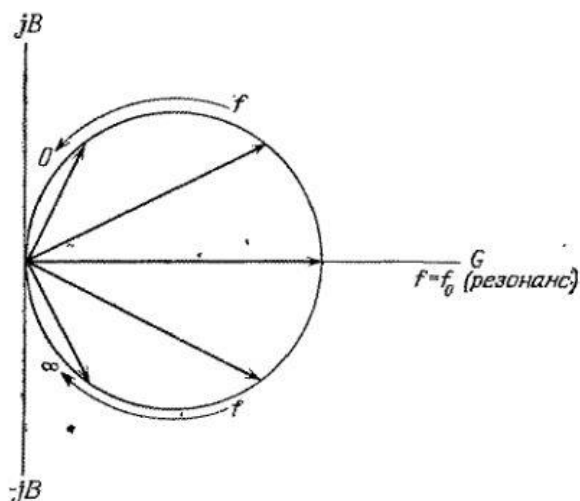


Рис. 2.8 Адмітанс послідовно з'єднаних маси m , опору R і гнучкості C

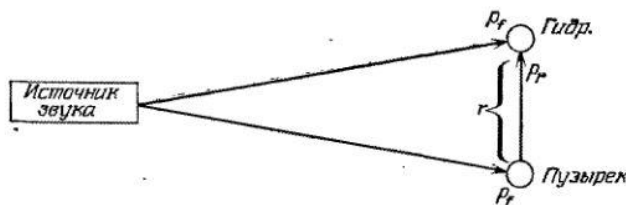


Рис. 1.9 Положення, при якому тиск вільного поля p_f має вплив і на гідрофон, і на газову бульбашку, які знаходяться на відстані r одне від одного. Звуковий тиск p_r , перевідбитий або розсіяний бульбашкою, теж впливає на гідрофон

На резонансній частоті швидкість u залежить від R , і відношення p_r/p_f залежить від Q резонансної системи і відстані r . Отже, сума $p_H = p_f + p_r$ змінюється, як показано на рис. 2.10. З цього рис. видно, що відношення p_H/p_f змінюється з частотою. Якщо r збільшується, то розмір кола зменшується і фаза p_r зміниться. Фазовий кут p_r дорівнює $-kr$ рад. Збільшення відстані призводить до більшого негативного кута або до повороту векторів p_r по часовій стрілці на рис. 2.10.

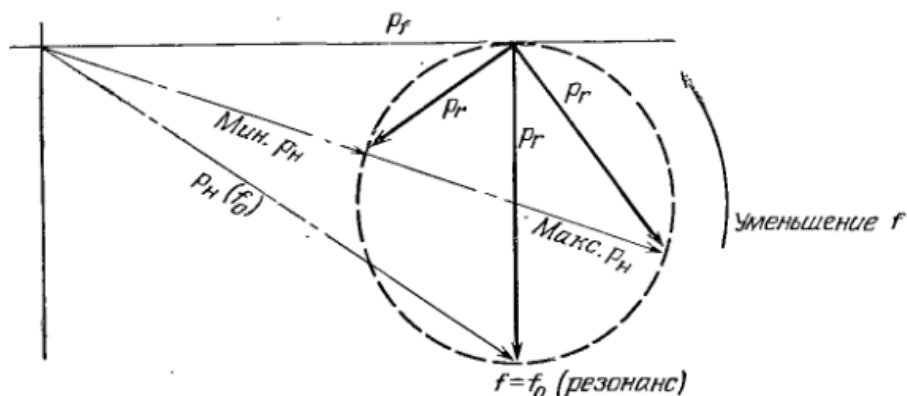


Рис. 2.10 Фазова діаграма залежності $p_H = p_f + p_r$ від частоти для розташування гідрофона і бульбашки

Так само зміниться фаза, якщо бульбашка знаходиться позаду гідрофона. Якщо бульбашка знаходиться перед гідрофоном, то вектор p_r буде обертатись проти годинної стрілки.

Вплив положення бульбашки на величину p_H ілюструє рис. 2.11.

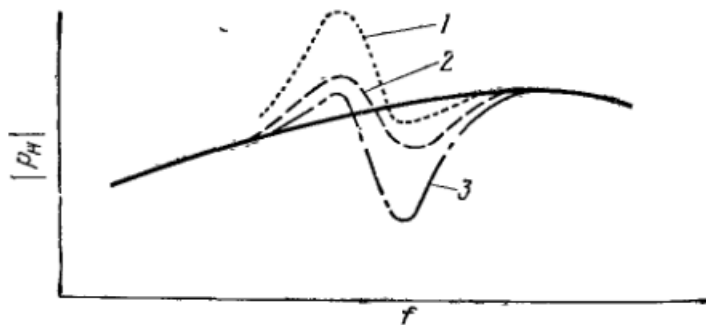


Рис. 2.11 Модуль тиску на гідрофоні в залежності від частоти при різних положеннях повітряної бульбашки. 1 – бульбашка перед гідрофоном; 2 – бульбашка збоку від гідрофона або близько до нього; 3 – бульбашка позаду гідрофона або далеко від нього

Якщо зсув фаз, обумовлений положенням бульбашки дорівнює $\pi/2$, то вийде дзеркальне відображення кривої на рис. 2.11. Звісно, можлива велика кількість різних аномалій, проте рис.2.11 є типовим для більшості розповсюджених завад та бульбашок.

2.2.2 Виключення перешкод

Для виключення перешкод різного роду є різноманітні засоби. Вони несумісні, і тому при наявності завад декількох типів потрібно йти на компроміси. Не від всіх перешкод можна захиститись. Наприклад, через граничні умови абсолютно неможливо проводити вимірювання в умовах вільного поля в маленькому басейні на інфразвукових частотах. Тому доводиться використовувати інший метод градуювання, наприклад малу камеру.

Перешкоди від шуму і паразитних сигналів усуваються або зменшуються за допомогою вузькополосних фільтрів. Звісно, цей спосіб можна використовувати лише по відношенню до неперервних сигналів. Перешкоди від відбиттів і наводок краще за все усуваються за допомогою імпульсної техніки.

Стоячі хвилі усуваються шляхом повороту одного або двох перетворювачів на декілька градусів. При цьому порушується плоскопаралельність перетворювачів, а чутливість змінюється мало. Збільшення відстані між перетворювачами також призводить до зменшення завад від стоячих хвиль, але при цьому можуть вирости перешкоди від відбиттів.

Для усунення бульбашок потрібно ретельно очищувати перетворювачі миючими засобами, проводити температурну стабілізацію перетворювачів, правильно конструювати перетворювачі, кронштейни та інші підводні

кріплення, контролювати наявність морських організмів, видаляти газоподібні органічні речовини з дна вимірювального басейну.

Якщо для усунення відбиттів неможливо застосувати імпульсну техніку, то можна прийняти інші міри, хоча в більшості випадково вони вирішують задачу лише частково. Відстань між перетворювачами слід обирати мінімальну, а відстань до відбиваючих границь – підтримувати максимальною, аби дійти до більшого відношення прямого сигналу до відбитого. Якщо є можливість, слід використовувати направлені перетворювачі; щоб зменшити чутливість в напрямленнях дій відбиттів.

Відбиваючі границі можна покривати звукопоглинаючими матеріалами. Для затримки відбиттів і відхилення їх в потрібних напрямленнях можна застосовувати екрани. Однак техніка екранування не така проста й доцільна, як може здаватись. Хороші жорсткі відбивачі були б дуже важкими та громіздкими, хороші «м'які» відбивачі неміцні та чутливі до статичного тиску. Окрім того, на краях екранів звукові хвилі розсіюються і дифрагують, створюючи вторинні джерела завад.

Необхідно обирати вигідне розташування перетворювачів відносно відбиваючої границі. Якщо один перетворювач нечутливий в якомусь напрямлення (наприклад, ззаду), то його потрібно орієнтувати так, щоб відбиваюча поверхня знаходилась за перетворювачем, тобто основна пелюстка діаграми направленості перетворювача має бути направлена до границі. Але оптимальне розташування не обов'язково має бути однаковим при градуюванні перетворювачів та при вимірюванні діаграми направленості, коли гідрофон, який досліджується, обертається. Це ілюструє рис. 2.12, де показано вимірювання характеристик направленного випромінювача за допомогою ненаправленного гідрофона.

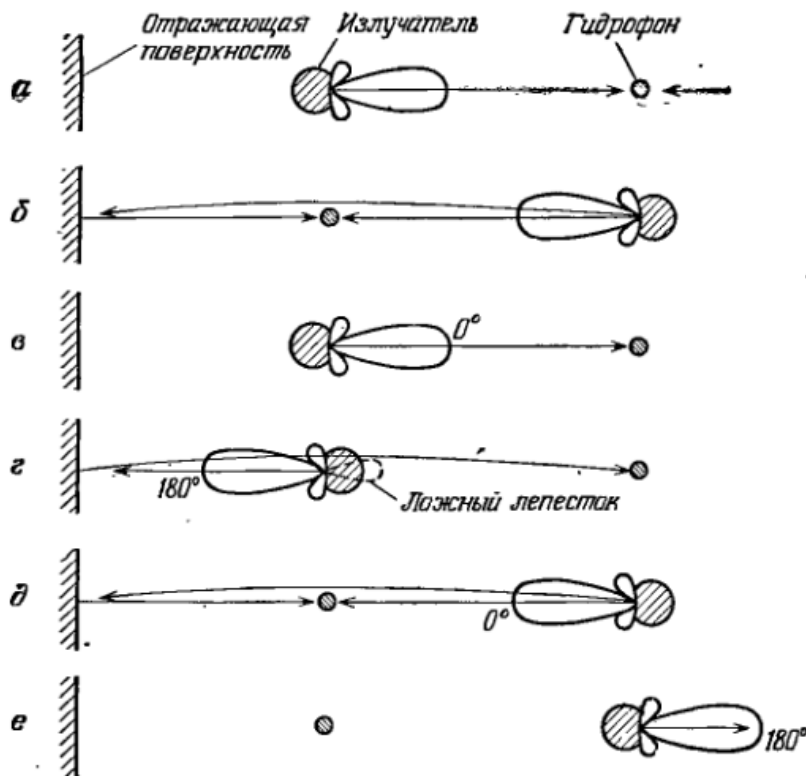


Рис. 2.12 Різне розташування направленої випромінювача і ненаправленого гідрофона відносно відбиваючої границі. Випадок (а) є переважнішим (б) при вимірюванні чутливості випромінювача; (д) і (е) переважніше, ніж (в) і (з), при вимірюванні діаграм направленості

Схема розташування перетворювачів на рис. 2.12, а оптимальна для градування гідрофона, оскільки нульова чутливість при 180° або ззаду у випромінювача дозволяє уникнути відбиттів від границі, тоді як при розташуванні, показаному на рис. 2.12, б, на гідрофон попадають і прямий, і відбитий сигнали. Якщо розташувати перетворювачі як на рис. 2.12, а, при вимірюванні діаграми направленості, то, як видно з рис. 2.12, в і з, рівень діаграми при 0° не спотворений відбиттями, але при цьому при 180° сигнал цілком складається з відбиттів, що призводить до появи хибної пелюстки на 180° . Якщо перетворювачі поміняти місцями, то рівень при 0° (рис. 2.12, д) піддається впливу відбиттів, а при 180° (рис. 2.12, е) – ні. Тому вибір оптимального розташування перетворювачів зводиться до оцінки помилки у випадках (з) і (д). Помітимо, що інтерферуючий відбитий сигнал в обох випадках однаковий, а прямий сигнал дорівнює нулю у випадку (з) і максимальний у випадку (д). Значить, перешкода надасть набагато більший вплив у випадку (з), ніж у випадку (д), що робить розташування (д) вдалішим.

Проілюструємо це на прикладі. Припустимо, що відбитий сигнал проходить в 10 разів більший шлях, ніж прямий.



Рис. 2.13 Виключення завади від поверхневого відбиття шляхом орієнтації нуля діаграми направленості гідрофона в напрямленні приходу відбиття

Тоді хибна бокова пелюстка при 180° у випадку (з) виявиться на 20 дБ менше, ніж основна пелюстка, тобто відношення фронт-тил буде дорівнювати рівно 20 дБ замість безкінечності. У випадку (д) основна пелюстка при 0° буде визначена з помилкою $20 \lg(1 \pm 0,1)$, тобто приблизно ± 1 дБ, щл є відносно малою помилкою. Помилки вимірювання діаграми направленості оцінюються у відносній різниці рівнів при значних кутах, в цьому прикладі навіть ця маленька помилка виключена, так як, якою б не була помилка у випадку (д), вона буде однаковою для всіх кутів, і, відповідно, форма діаграми не спотвориться.

Спеціальний вибір розташування перетворювачів допомагає усунути вплив відбиттів від вертикальних границь, але мало допомагає для зменшення відбиттів від дна і поверхні. Випадково може опинитись, що відбиття потрапляє на гідрофон в напрямленні нульової чутливості, як показано на рис. 2.13 і не впливає на його вихідний сигнал. Проте, оскільки напрямлення нульової чутливості змінюється з частотою, ця можливість обмежена однією частотою або вузькою полосою частот.

Поки мова йде про пасивні перешкоди типу відбиттів, неважливо, чим служить перетворювач – приймачем або випромінювачем. Принцип взаємності можна застосовувати як до прямих сигналів, так і до відбитих. Однак якщо десь є активне джерело перешкод, то система перестає бути пасивною і принцип взаємності не виконується. Візьмемо, наприклад, випадок, показаний на рис. 2.14, де присутній один ненаправлений перетворювач та один гостро направлений, у якого чутливість при 180° дорівнює нулю. Тоді, якщо до джерела завади звернена задня сторона направленного перетворювача, який служить гідрофоном, то завада не справить жодного впливу, тобто гідрофон буде сприймати лише сигнал від випромінювача.

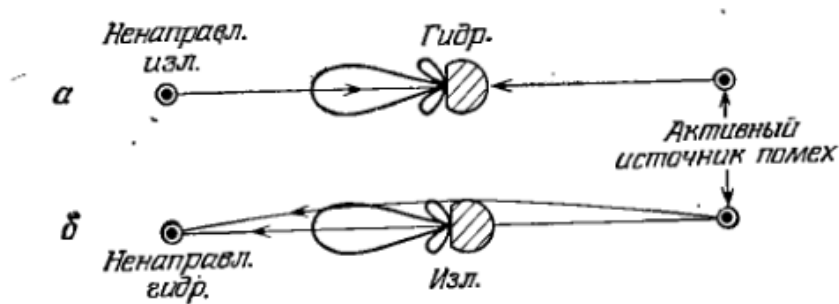


Рис. 2.14 Ефект зміни напрямлення, по якому приходить сигнал. Сигнал завади не сприймається гідрофоном в положенні (а), але приймається в положенні (б)

Якщо напрям сигналу змінити на зворотній і гостро направлений перетворювач використати в якості випромінювача, то ненаправлений гідрофон буде приймати звук і від випромінювача, і від джерела перешкод.

Метод, в якому вимірюється середнє значення сигналу в полосі частот, дозволив би ефективно усунути вплив відбиттів. Можливі такі два методи. В одному використовується полоса шуму, центрована на частоті вимірювання. В другому – виючий тон або частотно-модульований сигнал. Жоден з цих методів не використовується широко в гідроакустичних вимірюваннях, так як частотний дозвіл чутливості, отриманий при усередненні, зазвичай занадто мало.

2.3 Аналіз статистичних характеристик сигналів і завад в гідроакустичних каналах зв'язку

2.3.1 Стан проблеми

Статистичні характеристики гідроакустичних сигналів і завад мають складний, часто нестаціонарний характер. Їхні параметри залежать від стану океану: температура води, солоності, глибини, наявності течій, погоди на його поверхні, дна, чисельності біологічних об'єктів, інтенсивності суднобудування і т.д. Визначальне значення мають протяжність і орієнтація передбачуваної лінії зв'язку між джерелом та приймачем акустичних сигналів. З врахуванням просторової орієнтації прийнято поділяти гідроакустичні канали на вертикальні, похилі і горизонтальні:

- вертикальні – лінія зв'язку, що поєднує джерело та приймач, знаходиться в секторі кутів 15° відносно вертикалі
- похилі – лінія зв'язку, що поєднує джерело та приймач, знаходиться в секторі кутів $10^\circ - 35^\circ$ відносно горизонталі
- горизонтальні – лінія зв'язку, що поєднує джерело та приймач, знаходиться в секторі кутів менше 15° відносно горизонталі

Сигнали в процесі розповсюдження зазнають багатократні відбиття від границь середовища і мають в точці прийому багатопроменевий характер.

Траєкторії променів залишаються прямолінійними при найбільших перепадах середнього значення швидкості звуку по глибині, якщо кути виходу променів з джерела сигналів не перевищують 80° по вертикалі. Відмічається слабкий прояв багатопроменевості і завмирань; вказується, що сигнали, які розповсюджуються від джерела до приймача по траєкторіях, які знаходяться в межах кутів 15° від вертикалі, не мають зазнавати значних (більше ніж 3-5%) змін амплітуди і фази сигналу.

У відповідності до приведеної класифікації досліджуваний канал відноситиметься до класу гідроакустичних каналів зв'язку вертикальної орієнтації.

2.3.2 Методи і результати дослідження

В процесі розповсюдження гідроакустичного сигналу спостерігаються зміни його структури, які можуть розділятися на амплітудні та фазові. Якщо говорити про зміну амплітуди, слід враховувати зміну рівня сигналу зі збільшенням відстані від джерела і флуктуації рівня сигналу через вплив багатопроменевості і випадкових змін коефіцієнта передачі середовища.

Зміна рівня зі збільшенням відстані від джерела сигналу пов'язане з розширенням фронту і різноманітного виду втратами. Відмітимо, що основними причинами втрат акустичної енергії є релаксаційні процеси, здвигне тертя шарів води і розсіювання. Врахування цих втрат здійснюється при проведенні енергетичного розрахунку відповідної лінії зв'язку.

Флуктуації рівня і фази гідроакустичних сигналів пов'язані зі статистичною неоднорідністю водного середовища і є наслідком випадкової зміни коефіцієнту передачі середовища і впливу багатопроменевості. Часто ці флуктуації називають завмираннями сигналу і відносять їх до завад.

Перешкоди в гідроакустичних лініях зв'язку по своєму характеру розділяють на три основні класи: адиптивні перешкоди, мультиплікативні і доплерівський зсув частоти. В свою чергу, адиптивні перешкоди класифікуються по статистичній структурі і характеру походження.

По статистичній структурі адиптивні перешкоди розділяють на три групи: флуктуаційні, імпульсні і гармонійні.

По походженню адиптивні перешкоди розділяють на природні та технічні. Серед адиптивних перешкод природного походження виділяють:

- динамічні шуми, виникнення яких пов'язане з динамічними процесами, які відбуваються в океані – тепловим рухом молекул; шумами прибою; зхлопуванням повітряних бульбашок, які утворюються в верхньому проти поверхневому шарі води при обрушенні гребенів хвиль; ударами крапель дощу по поверхні;
- шуми льодового походження, обумовлені вітром, що обтікає нерівності поверхні льоду; розтріскуванням льодового покриття; обтіканням течією нерівностей нижньої границі;
- біологічні шуми, пов'язані своїм походженням з життєдіяльністю трьох основних груп тварин: безхребетних, риб і ссавців;
- сейсмічні шуми, обумовлені тектонічними процесами в надрах Землі.

Перешкоди технічного походження розділяють на власні; шуми носія; шуми сторонніх суден; морських бурових установок; трубопроводів; сигнали сторонніх гідроакустичних систем (гідромаяки, ехолоти, гідролокатори, системи гідроакустичного зв'язку і т.д.)

Шум в океані представляє собою сукупність полів більшості окремих незалежних джерел, причому розповсюдження звуку від цих джерел до точки вимірювань пов'язане з безліччю незалежних і випадкових спотворень. Це дозволяє часто характеризувати шуми океану нормальним (гауссовим) розподілом.

Мультиплікативні перешкоди (завмирання сигналу) проявляються у випадковій зміні амплітуди і фази гідроакустичного сигналу. З точки зору прийому сигналів завмирання еквівалентні збільшенню потужності перешкоди. Вони призводять до зниження співвідношення сигнал-шум на вході приймача. Однак особливість завмирань заключається у тому, що їхній вплив, на відміну від адитивних перешкод, не може бути скомпенсоване збільшенням потужності передачі. Внаслідок цього, для оцінки реальної завадо захищеності прийому сигналів і оцінки пропускну здатності гідроакустичної системи зв'язку необхідно знати закони розподілу миттєвих значень рівня і вази сигналу на вході приймача.

Відомі роботи, в яких описані експериментальні і теоретичні дослідження флуктуацій амплітуди і вази гідроакустичних сигналів. У більшості випадків було відмічено, що значення амплітуди сигналу розподіленні по нормальному закону, законом Релея, Релея-Райса, причому параметри розподілів істотно залежать від структури і умов створення гідроакустичного каналу: орієнтації відносно дна і поверхні, дистанції між джерелом сигналу і точкою вимірювань, діаграм направленості.

Специфічним видом перешкод є ті, що пов'язані з проявом Доплера. В гідроакустичній системі зв'язку ефект Доплера обумовлений взаємним переміщенням випромінюючої і прийомної антен, що викликає появу відмінностей частоти прийнятого сигналу від частоти сигналу, який ми передаємо, призводить до зміщення всього спектру частот на величину f_d і до зміни ширини його спектру і тривалості сигналу. При цьому у точці прийому значення миттєвої частоти f сигналу, ширини його спектру $2\Delta f$ і тривалості T відповідно рівні:

$$f = f_0 \frac{c}{c + |\vec{V}_x| \sin \alpha + |\vec{V}_y| \cos \alpha} \quad (2.4),$$

$$2\Delta f = 2f_0 \frac{c}{c + |\vec{V}_x| \sin \alpha + |\vec{V}_y| \cos \alpha} \quad (2.5),$$

$$T = T_0 \frac{c}{c + |\vec{V}_x| \sin \alpha + |\vec{V}_y| \cos \alpha} \quad (2.6),$$

Де c - швидкість звуку у воді, $\vec{V}_x$ і $\vec{V}_y$ - горизонтальна і вертикальна складові швидкості взаємного переміщення випромінюючої та приймальної антени; f_0 , $2\Delta f_0$, T_0 - миттєва частота, ширина спектру і тривалість випроміненого сигналу відповідно.

В реальних умовах величини швидкостей $\vec{V}_x$ і $\vec{V}_y$ малі в порівнянні зі швидкістю звуку c , абсолютне значення доплерівського зсуву частоти $f_d = f_0 - f$ буде незначним (не більше десятків Гц). Виникаюче при цьому зміщення спектру частот може бути враховане при виборі полоси пропускання приймача її збільшенням на величину $2\Delta f_d$. Відповідні зміни миттєвої частоти і тривалості сигналів через ефект Доплера зводиться до зниження завадостійкості прийому за рахунок введення деякої еквівалентної перешкоди, викликаній розширенням полоси пропускання приймача і роботою системи синхронізації.

Великий об'єм експериментальних досліджень статистичних характеристик сигналів і перешкод в гідроакустичних каналах вертикальної орієнтації в діапазоні від 28 до 32 кГц і від 47 до 50 кГц виконаний в Сибірській державній академії телекомунікацій і інформатики.

Дослідження проводились в Тихому океані, в районі, прилеглому до Курильської гряди і пристані Вугільної (на глибинах до 1,5 км), на Чорному морі, в його глибоководній частині (на глибинах 1800-2000 м), в Середземному морі і в Атлантичному океані (на глибинах до 5400 м).

В результаті досліджень отримані оцінки наступних ймовірностей характеристик і параметрів сигналів і перешкод:

- одновимірна функція щільності ймовірностей рівня шуму $W(U)$, оцінки математичного очікування m_U і дисперсії шуму σ_U^2
- одновимірна функція щільності ймовірностей гідроакустичного приймального сигналу $W(E)$, оцінки їхнього математичного очікування m_E і дисперсії σ_E^2
- одновимірна функція щільності ймовірностей приймальних гідроакустичних сигналів $W(\varphi)$, оцінки їх математичного очікування m_φ , дисперсії σ_φ^2
- нормована кореляційна функція амплітуди сигналу $R(\tau)$ і інтервал кореляції τ_0

Відповідно до результатів вимірювань, затухання сигналу в каналі зв'язку, в залежності від протяжності лінії зв'язку, вимірюється за законом, близьким до квадратичного, що відповідає теоретичним моделям.

Аналіз даних вимірювань характеристик гідроакустичних сигналів дозволяє стверджувати, що відповідні випадкові процеси можуть бути описані на основі нормального розподілу і пов'язаних з ним розподілами Релея, Релея-Райса і логарифмічно нормальним. При цьому нормальний розподіл зустрічається найбільш часто.

Дані найбільш характерних вимірювань приведені на рис. 1.9

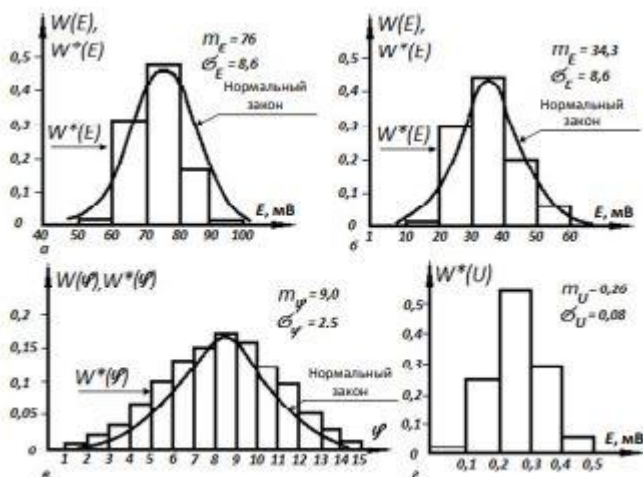


Рис. 2.3 Функція щільності ймовірностей в гідроакустичному каналі вертикальної орієнтації: а,б – рівнів сигналу; в – фази сигналу; г – рівня шуму

Результати апроксимації експериментальних функцій щільності ймовірностей показані цілковитими лініями. Погодження теоретичних функцій щільності ймовірностей і експериментальних даних $W^*(x)$ оцінювалось за допомогою критерію згідно Пірсона; на рівні значимості 0,005 теоретичні функції щільності ймовірності, приведені на рис. 1.9, не суперечать експериментальним.

Аналіз експериментальних функцій щільності ймовірності рівня сигналу $W^*(U)$ дозволяє зробити висновок про те, що в точці прийому сигнал істотно перевищує рівень шумів. При глибині занурення джерела сигналу 2000 м і електричній потужності сигналу, що підводиться до передаючої антени, рівній 0,7 Вт, відношення середнього рівня сигналу до середнього рівня шуму m_E/m_U мінялось на порядок в межах від 150(при роботі в центрі зони зв'язку) до 15(на краю зони зв'язку), що вказує на наявний запас потужності сигналу. Середній рівень шумів m_E на виході вимірювального підсилювача з коефіцієнтом передачі $K_{yc} = 250$ при вертикальній орієнтації приймальної антени був стабільним і не перевищував 0,5 мВ; типова гістограма рівнів шуму приведена на рис. 1.9(г).

Дослідження підтвердили припущення про те, що застосування направлених гідроакустичних антен з екрануванням тильного напрямлення дозволяє значно послабити вплив на прийом сигналів ревербераційної перешкоди, викликаной зворотнім розсіюванням звуку на границях вода-повітря, вода-дно. Непрямим підтвердженням цього слугує той факт, що в процесі проведення натурних досліджень апаратури, на судні стійко фіксувались відбиті від дна, на глибині 2000 м, сигнали команд управління з рівнем достатнім для їхнього прийому. Останнє передбачає, по-перше, застосування спеціальних мір для надійного розрізнення сигналів відповіді гідроакустичної автономної донної станції (ГДАС) від сигналів команд керування, відбитих від дна; по-друге, можливість погіршення завадової обстановки в каналі зв'язку при необґрунтованому збільшенні потужності передачі сигналів.

Застосування направлених антен виявило залежність параметрів розподілу рівня і фази від степені хвилювання моря. Флуктуації рівня і фази сигналів обумовлені качкою судна і зміною просторової орієнтації гідроакустичних антен, що з нього опускаються. У всіх випадках при хвилюванні моря до 5 балів відношення середнього рівня сигналу до його середньоквадратичного відхилення $\frac{m_E}{\sigma_E} > 3,9$.

На рис 2.3 приведена функція кореляції однієї з найбільш характерних вибірок сигналу. Видно, що суттєві зміни сигналу спостерігаються на інтервалі > 1 с.

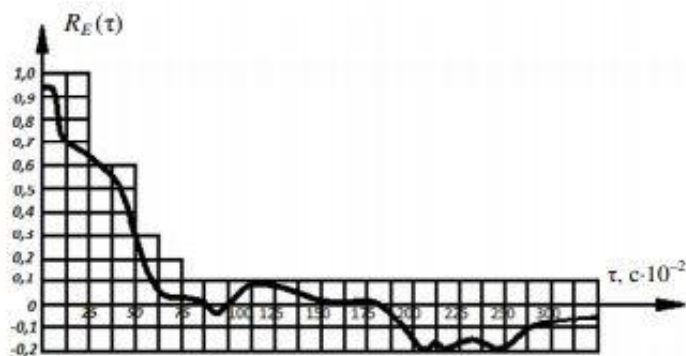


Рис 2.4 Функція кореляції сигналу

В ході рейсу науково-дослідницького судна «Дмитрий Менделєєв» були отримані оцінки впливу ефекту Доплера на роботу апаратури гідроакустичного каналу зв'язку. При обміні сигналами між ГДАС та судном, що рухаються по поверхні зі швидкістю до 2 вузлів при хвилюванні моря до 5 балів, зсув частоти приймального сигналу відповідав 10^{-3} від номінального значення несучої.

2.4 Зниження відбиття

Зниження відбиття є важливим параметром відбивачів та поглинальних покриттів. Воно характеризує зменшення рівня падаючого звукового тиску після відбиття.

Зниження відбиття залежить від неузгодженості акустичних імпедансів на відбитій границі. В свою чергу, акустичний імпеданс залежить від самого матеріалу, його товщини і, як правило, від того, до чого і як матеріал прикріплений.

Є два типи вимірювань зниження відбиття: на зразках і на конкретних конструкціях виробу.

Поглинаючі покриття на відміну від вікон, екранів та відбивачів не завжди робляться з однорідного матеріалу. Для вікон, екранів або відбивачів необхідно лише хороше узгодження або неузгодження імпедансів з водою. Поглинаючі покриття виконують складнішу функцію: завдяки ним хороші відбивачі мають одночасно здаватись акустично прозорими. Для цього, по-перше, покриття повинне мати хороше узгодження з водою, щоб звукова енергія не відбивалась.

По-друге, увійшовши, в покриття, звукова енергія має бути поглинена, інакше вона відіб'ється від якої-небудь границі, наприклад, від стінки або корпусу корабля, до яких прикріплюється покриття. Таким чином, і звукоізоляція, і зниження відбиття мають бути великими.

Важко створити тонке однорідне поглинальне покриття з характеристиками поглинання, що не залежать від частоти. Поглинаюче покриття зазвичай складається з шару гуми або гумоподібного матеріалу з низькоімпедансними повітряними прошарками або з високоімпедансними металічними включеннями. Основною метою є створення поперечних зміщень в гумі, а не просто стискання і розширення її. Матеріал, який знаходиться за покриттям, є його невід'ємною частиною; товщина сталевий пластинки, до якої зазвичай прикріплюється покриття, і середовище (вода або повітря), що знаходиться за сталлю, впливають на характеристики поглинання. За рахунок того, що покриття неоднорідне, воно зазвичай резонує. Це проявляється у збільшенні амплітуд коливань і в великому зниженні відбиття у вузькій смузі частот.

Відбивачі виготовляються з однорідного матеріалу або з дуже низьким акустичним імпедансом (пробка, корпрен, повітряний сандвіч) або з дуже високим акустичним імпедансом (сталь, нікель, вольфрам). В деяких випадках для отримання високоімпедансних границь використовувались різні типи систем чверть-хвильових відрізків падаючих ліній, або резонансних інерційно-пружних систем, які налаштовуються. Такі пристрої можна застосовувати тільки у вузькій смузі частот.

Якщо кут падіння звуку міняється, то зниження відбивання потребує подальшого уточнення – в обліку кута відбиття. Іноді основний інтерес представляють дзеркальні відбиття (матеріал для трьох площинного імітатора мішені або акустичного дзеркала); в інших випадках більша частина звуку може відбитись, але не обов'язково дзеркально (неплоска поверхня). Ця двозначність проявляється у всіх вимірюваннях відбиттів; тому необхідно знати передбачуване призначення матеріалу і вимірювати відповідний вид відбиттів.

В цьому зв'язку використовуються терміни «моностатичний» та «біостатичний». Моностатичним є вимірювання в одній і тій самій точці, тобто випромінювач і приймач знаходяться в одній і тій же точці, тобто випромінювач орієнтований під одним кутом, а приймач – під іншим. Дзеркальне відбиття є приватним випадком бістатичного відбиття, коли кут відбиття рівний куту падіння.

2.4.1 Теоретичне зниження відбиття

Теоретично зниження відбиття легше за все вирахувати при нормальному падінні звука на однорідну пластинку з непоглинаючого матеріалу, що занурена у воду.

Теоретичне зниження відбиття для непоглинаючого однорідного матеріалу у воді визначається формулою:

$$\text{Зниження відбиття} = 10 \lg \left[\frac{4 m^2}{(1-m^2)^2 \sin^2 kx} + 1 \right] \quad (2.7).$$

m можна замінити на $1/m$ без зміни виду рівняння. Зі зростанням частоти величина зниження відбиття поступово падає, поки товщина пластини не буде дорівнювати $\frac{1}{4}$ довжини хвилі, а потім збільшується, до тих пір поки товщина не досягає $\frac{1}{2}$ довжини хвилі. Коли kx в рівнянні 2.7 набуває значення $\pi/2$, $3\pi/2$, $5\pi/2$ і т.д., тобто коли товщина кратна непарному числу чвертей довжини хвилі, зниження відбиття мінімальне. І для великих, і для малих значень m зниження відбиття близьке до нуля, але теоретично його ніколи не досягає. Коли $kx=0$, π , 2π і т.д., синус у рівнянні 2.7 стає рівним нулю і зниження відбиття стає безкінечним при будь-якому кінцевому значенні m . Це означає, що будь-який непоглинаючий матеріал ідеально прозорий, коли його товщина кратна половині довжини хвилі. Очевидно, що зниження відбиття безкінечне і при $m=1$.

2.4.2 Вимірювання зниження відбиття

Зниження відбиття зазвичай вимірюють за допомогою установки. Падаючий і відбитий звуки (звукові тиски) вимірюються зондовим гідрофоном, який переміщується поблизу зразка матеріалу. Для розділення цих двох вимірюваних сигналів використовують два способи. Використовуючи імпульсний режим, можна розділити падаючий і відбитий звукові імпульси на проміжок часу, який потрібен імпульсу, щоб пройти шлях від гідрофона до зразка і назад. При використанні інтерферометричного методу обидва сигнали перекриваються і їхні рівні вираховуються по інтерференційним максимум і мінімумам, які обумовлені конструктивною та деструктивною інтерференцією. Основні труднощі пов'язані з відбиттями і дифракцією. Дифракційні Ефекти у цьому випадку не обмежуються звичайною дифракцією на краях перешкоди. Якщо плоска хвиля падає нормально на відбиваючу пластинку, то відбиваюча хвиля не відрізнятиметься від тієї, яку випромінювала б сама пластинка, якби вона слугувала випромінювачем. Зонд, розташований поблизу пластинки, знаходиться в ближньому полі або в зоні Френеля. Відбитий звук можна розглядати як комбінацію двох хвиль: 1) плоскої хвилі з тією ж амплітудою і фазою, які були б при відбитті від нескінченно протяжної пластинки і 2) дифрагованої хвилі, яка здається тією, що виходить із краю пластинки і аналогічна дифрагованій хвилі, яка «обходить» пластинку у випадку вимірювання звукоізоляції.

Коли використовують короткі імпульси і падаюча, і відбита хвилі розділяються в часі, необхідно також розділити відбиті і дифраговані імпульси. Ці дві вимоги про розділення сигналів пред'являють суперечливі вимоги до вибору відстані від зонду до зразка. Збільшення цієї відстані покращує розділення падаючого і відбитого імпульсів, але погіршує розділення відбитого та дифрагованого. Зменшення цієї відстані призводить до зворотнього ефекту. На практиці використовують найменші відстані і мінімальні довжини імпульсів. Однак довжину імпульсу неможливо зробити коротшою, ніж приблизно два періоди, що і обумовлює низькочастотну межу вимірювань. Для резонансних відбивачів

необхідно використовувати довші імпульси. Імпульсні вимірювання відбиттів у воді в загальному вдало використовувати тоді, коли довжина і ширина зразка, яка перевершує довжину хвилі в п'ять або більше разів.

Дифракційні ефекти можна звести до мінімуму асиметричним розташуванням перетворювачів.

Вимірювання імпульсу, що відбитий від резонансного покриття, ускладнюється тим, що таке покриття діє як ежекторний фільтр. Основна частота на резонансній частоті покриття послабляється набагато сильніше, ніж бокові частоти в спектрі імпульсу; тому більше зниження відбиття на резонансі маскується малою його величиною на бокових частотах. Щоб отримати істинне зниження відбиття поблизу резонансної частоти, на виході зондового гідрофона необхідно мати дуже вузькополосний фільтр.

На низьких частотах, де короткі імпульси отримати не можна, використовується інтерференційний метод. Зондовий гідрофон поміщається поблизу зразка, де він одночасно приймає прямий сигнал від видаленого випромінювача і сигнал, відбитий від зразка. Можна використовувати неперервний сигнал або довгі імпульси. Довгий імпульс, з однієї сторони, допускає перекриття прямого і відбитого сигналів, а з другої – ще достатньо короткий, щоб «відрізати» дифракцію, поверхневі відбиття і т.д. Зонд вимірює із врахуванням фаз суму падаючого і відбитого звукових тисків. При неперервній зміні частоти в деякому діапазоні різниця фаз між падаючим і відбитим сигналами буде неперервно змінюватись. Величина сумарних сигналів буде коливатись між станами складання в фазі і протифазі, які нагадують за характером зміни картину, яка створюється при градуваннях поверхневими відбиттями, стоячими хвилями або наводкою. Насправді, ми спеціально створюємо стоячі хвилі. Зонд має відстояти по меншій мірі на $\frac{1}{4}$ довжини хвилі від відбиваючої поверхні, а ще краще на декілька довжин хвиль. Якщо зонд розташований занадто близько, то частотний інтервал між піками(або нулями) на зареєстрованій кривій великий і її важко розшифрувати.

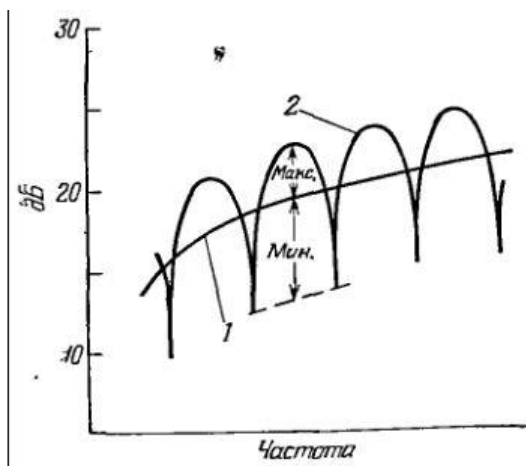


Рис. 2.5 Вплив інтерференції на прямий сигнал. 1 – тільки прямий сигнал, 2 – прямий сигнал + завада

На рис. 2.5 приклад, в якому інтерферуючий відбитий сигнал рівний половині прямого сигналу, і показано, як відносні амплітуди двох інтерферуючих сигналів можна знайти за допомогою рис. 2.5. Прямий сигнал можна отримати лише шляхом видалення зразка, тоді відношення рівнів сигналу завади до прямого сигналу можна знайти як числове відношення або в децибелах по одній з трьох вимірених величин на рис. 2.5. Оскільки вимірювання глибини гострих нулів більш піддаються помилкам, аніж висота закруглених максимумів, то вимірювання максимумів, показані на рис., більш надійні. Інтерференційний метод подібний до методу вимірювання імпедансу на границі, що замикає трубу, який має застосування у повітряній акустиці.

На практиці звукові хвилі, які падають на зразок-відбивач, не є плоскими. Як правило, це впливає на виміри, якщо не збуджується поперечний хвильовий рух. В деякій мірі це навіть допомагає вимірам, так як створює ефект «затінення»; іншими словами, якщо розглядати пластинку як випромінювач, що коливається, то амплітуди коливання на краях будуть трохи менше, ніж в центрі і будуть зсунуті по фазі.

Табл. 2.1

Амплітуда інтерференції (D – прямий сигнал, I – сигнал завади)

I/D		Макс. $(D+I)/D$		Мин. $(D-I)/D$		Размах Макс. + Мин.
– дБ	отношение	+ дБ	отношение	– дБ	отношение	+ дБ
0,0	1,000	6,0	2,000	∞	0,000	∞
0,5	0,944	5,8	1,944	25,0	0,056	30,8
1,0	0,891	5,5	1,891	19,9	0,109	25,4
1,5	0,841	5,3	1,841	16,0	0,159	21,3
2	0,794	5,1	1,794	13,7	0,206	18,8
3	0,708	4,7	1,708	10,7	0,292	15,4
4	0,631	4,3	1,631	8,7	0,369	13,0
5	0,562	3,9	1,562	7,2	0,438	11,2
6	0,501	3,5	1,501	6,1	0,499	9,6
7	0,477	3,2	1,447	5,1	0,553	8,3
8	0,398	2,9	1,398	4,4	0,602	7,3
9	0,355	2,6	1,355	3,8	0,645	6,4
10	0,316	2,4	1,316	3,3	0,684	5,7
12	0,251	2,0	1,251	2,5	0,749	4,5
14	0,200	1,6	1,200	1,9	0,800	3,5
16	0,159	1,3	1,159	1,5	0,841	2,8
18	0,126	1,0	1,126	1,2	0,874	2,2
20	0,100	0,8	1,100	0,9	0,900	1,7
25	0,056	0,5	1,056	0,5	0,944	1,0
30	0,032	0,3	1,032	0,3	0,968	0,6
35	0,018	0,2	1,018	0,2	0,982	0,4
40	0,010	0,1	1,012	0,1	0,990	0,2

«Затінення» знижує осциляції тиску в ближньому полі. Але наявність втрат на розходження означає, що в виміряне відношення рівня відбитого сигналу до рівня прямого сигналу потрібно вводити поправку на втрати з відстанню. Коли звук падає на матеріал під кутом, що відрізняється від нормального, в матеріалі можуть збудитися поперечні хвилі. Останні можуть взаємодіяти з повздовжніми хвилями, допускається, що вони несуть всю звукову енергію. Тож умови вимірювань мають відповідати умовам ідеально плоскої

повздовжньої хвилі, навіть якщо можливе виникнення поперечного хвильового руху.

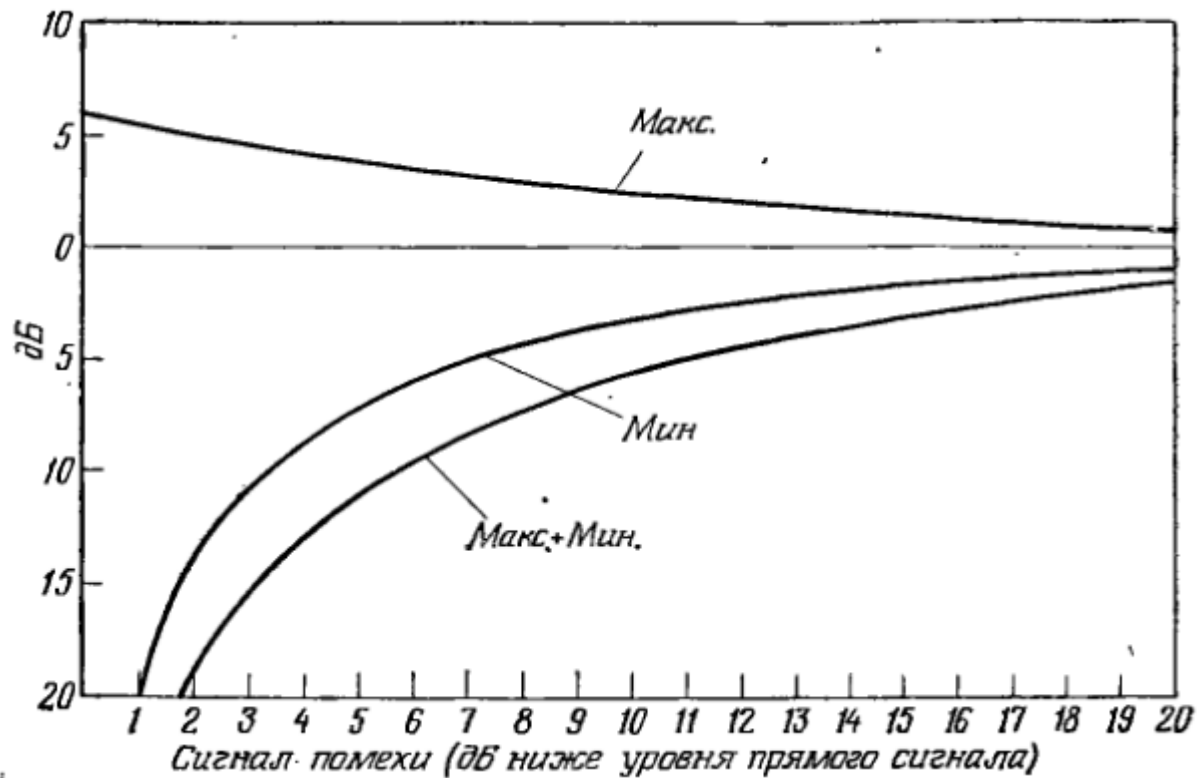


Рис. 2.6 Амплітуда інтерференційних сигналів

$$\text{Макс.} = +20\lg\left(\frac{D+I}{D}\right), \quad \text{Мін.} = -20\lg\left(\frac{D-I}{D}\right),$$

де D – прямий сигнал, I – сигнал завади.

Висновки по розділу

В другому розділі:

розглянуті умови створення вільного поля для акустичних вимірювань;

- описані види завад в гідроакустиці та методи боротьби з ними;
- досліджені характеристики зниження відбиття, його важливість для відбивачів та поглинальних покриттів;
- здійснений розгляд основних характеристик та підготовка до розрахунків.

РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ВИМІРЮВАЛЬНОГО БАСЕЙНУ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Основним питанням при конструюванні та використанні басейну є його частотний діапазон. Необхідний розмір басейну пропорційний довжині хвилі акустичного сигналу. Розмір басейну залежить від тривалості імпульсів, частоти їх повторення та відстані від гідрофону. При використанні імпульсного режиму роботи обмежувальним фактором є відстань до поверхні, що відбиває, найближчій до шляху розповсюдження прямого акустичного сигналу від випромінювача до гідрофона.

Імпульсна методика роботи заснована на тому, щоб різниця шляхів розповсюдження першого прямого та першого відбиваючого імпульсів більше, ніж довжина імпульсу. Це означає, що гідрофон повинен встигнути прийняти початкову частину прямого імпульсу до того, як передній фронт відбиваючого імпульсу досягне гідрофона. Мінімальна різниця шляхів складає до тих пір τ секунд або $c\tau$ метрів, де c – швидкість звуку у воді в м/с. Мінімальну довжину L та ширину (або глибину) W басейна можливо розрахувати за рисунком 3.1:

$$L = d + c\tau, \quad (3.1)$$

$$W = [(d + c\tau)^2 - d^2]^{1/2} = (2dc\tau + c^2\tau^2)^{1/2} \quad (3.2)$$

де d – потрібна відстань між перетворювачами.

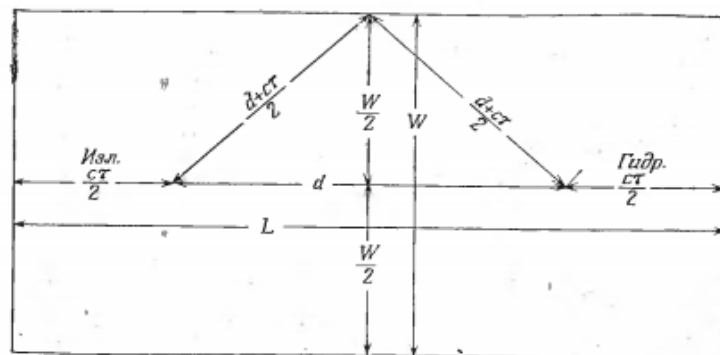


Рисунок 3.1 – Шляхи прямого та відбиваючого сигналів в басейні

Для того, щоб імпульс досяг потрібного стану, необхідно Q періодів, де Q характеризує весь тракт випромінювання, а не тільки випромінювач. Через що можна припустити, що мінімальна потрібна довжина імпульсу становить Q періодів або $Q\lambda$ метрів, в тих випадках, якщо розміри діафрагми перетворювача

нескінченно малі у напрямку розповсюдження звуку. Можемо припустити, що максимально можлива відстань між перетворювачами розраховується за формулою:

$$d = \frac{2D^2}{\lambda}, \quad (3.3)$$

де λ – довжина хвилі, $\lambda = \frac{c}{f_0} = 0,3$ м.

D – найбільший розмір перетворювача, $D = 1,5$ м.

З цього слідує наступне:

$$c\tau = Q\lambda + 2\frac{1}{2}\lambda = \left(Q + 2\frac{1}{2}\right)\lambda. \quad (3.4)$$

Об'єднавши вищевказані формули з рівняннями, отримуємо формули для розрахунку довжини та глибини басейну:

$$L = (27,5 + Q)\lambda, \quad (3.5)$$

$$W = \left[50 \left(Q + 2\frac{1}{2} \right) + \left(Q + 2\frac{1}{2} \right)^2 \right]^{1/2} \lambda. \quad (3.6)$$

Імпульси повторюються через регулярні інтервали. Частота повторень імпульсів має бути достатньо низькою для того щоб, відбиття згасли між імпульсами. З іншого боку, частота повторень має бути достатньо високою, для того щоб вимірювач працювали без вібрації. Із початкових даних слідує, що початкова частота дорівнює $f_0 = 5$ кГц, кількість імпульсів при вимірюванні дорівнює 5.

На першому етапі розрахунків необхідно дослідити початкову частоту. Для цього розраховуємо τ_i – тривалість імпульсу за формулою:

$$\tau_i = 5T, \quad (3.7)$$

де T – період повторення імпульсів.

Період повторення імпульсів залежить від частоти повторень імпульсів, тому:

$$T = \frac{1}{f_0} \quad (3.8)$$

Розрахунок:

$$\tau_i = 5 \cdot 0,0002 = 10 \text{ мс.}$$

Імпульсний режим дозволяє усунути інтерференційний ефект, зумовлений відображеннями, електричною наводкою та коливаннями води. Усі поверхні елемента гідрофона досягли режим до кінця імпульсу. З цією умовою та вказаною періодичністю необхідно розрахувати різницю шляхів розповсюдження першого прямого та першого відбиваючого імпульсів r за формулою:

$$r = c\tau_i \quad (3.9)$$

де c — швидкість звуку у воді в м/с.

$$r = 1500 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 1,5 \text{ м.}$$

Максимально можлива відстань між перетворювачами дорівнює:

$$d = \frac{2 \cdot 1,5^2}{0,3} = 15 \text{ м;}$$

Далі з формули різниці хода для першого відбиття від поверхні за теоремою Піфагора розраховували глибину басейну:

$$h = \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - r^2}$$
$$h = \sqrt{(15/2)^2 - 1,5^2} = 7,348 \text{ м.}$$

Визначимо частотний інтервал для отримання τ_i

$$\Delta f_{\text{пов.відб.}} = \frac{c}{\left[2 \cdot \left(h^2 + \frac{d^2}{4}\right)^{1/2} - d\right]} = \frac{1500}{\left[2 \cdot \left(7,348^2 + \frac{15^2}{4}\right)^{1/2} - 15\right]} = 15,6 \text{ Гц.}$$

$$\Delta T_{\text{наводка}} = \frac{1}{100} = 0,01;$$

$$\Delta T_{\text{ст.хвилі}} = \frac{1}{50} = 0,02;$$

$$\Delta T_{\text{пов.відб.}} = \frac{1}{15,625} = 0,064.$$

Визначаємо час прийнятого, затриманого та відбиваючого імпульсу.

$$\tau_{\text{пов.відб.}} = 5 \cdot 0,064 = 0,32 \text{ мс.}$$

Визначаємо відстань прийнятого, затриманого та відбиваючого імпульсу.

$$r_{\text{пов.відб.}} = 1500 \cdot 0,32 \cdot 10^{-3} = 0,48 \text{ м.}$$

$$\sum r = 0,075 + 0,15 + 0,48 = 0,705 \text{ м.}$$

Загальна довжина імпульсу враховуючи довжину хвилі:

$$L = 0,3 + 0,705 + 0,3 = 1,305 \text{ м.}$$

Різниця між подаючими та відбиваючими сигналами становить:

$$r_{\Pi} = \left(\frac{0,48 - 0,075}{2}\right) - 0,15 = 0,053 \text{ м.}$$

Визначення об'єму робочого для басейну:

Розраховуємо тиск поглиначів за формулою:

$$P = \rho c u \left(\frac{\pi a^2}{\lambda r} \right),$$

де ρ – щільність води, c – швидкість звуку, u – швидкість поршня, a – радіус поршня.

$$P_{\text{прийн}} = 997 \cdot 1500 \cdot 100 \cdot 10^{-3} \left(\frac{3,14 \cdot 0,1^2}{0,3 \cdot 0,075} \right) = 20,9 \text{ МПа};$$

$$P_{\text{відб}} = 997 \cdot 1500 \cdot 100 \cdot 10^{-3} \left(\frac{3,14 \cdot 0,1^2}{0,3 \cdot 0,48} \right) = 32,6 \text{ МПа}.$$

$$\sum P = 20,9 + 32,6 = 53,5 \text{ МПа}.$$

Згідно з досліджень Ямада, для двох прямокутових поглиначів, приводить наступні критерії мінімальної відстані для сферичної хвилі:

$$l = \frac{\pi}{6} \cdot \frac{L^2}{\lambda}$$

$$l = \frac{3,14}{6} \cdot \frac{1,305^2}{0,3} = 2,95 \text{ м}.$$

Розрахунок геометричних параметрів:

$$L = (27,5 + 5) \cdot 0,3 = 9,75 \text{ м};$$

$$W = \left[50 \left(5 + 2 \frac{1}{2} \right) + \left(5 + 2 \frac{1}{2} \right)^2 \right]^{1/2} \cdot 0,3 = 1,367 \text{ м}.$$

Графік залежності часу від частоти представлено на графіку 3.1.

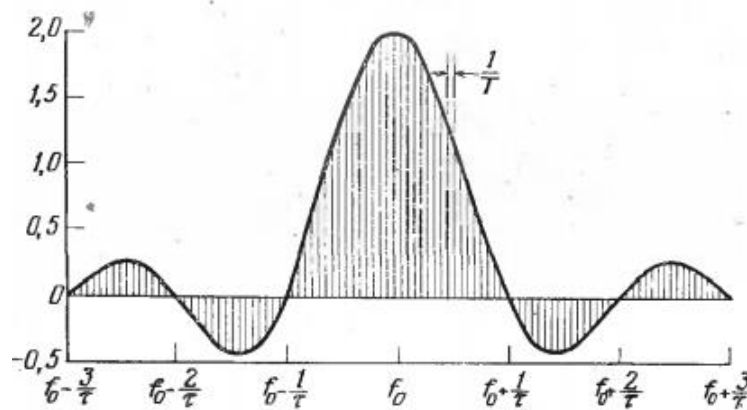
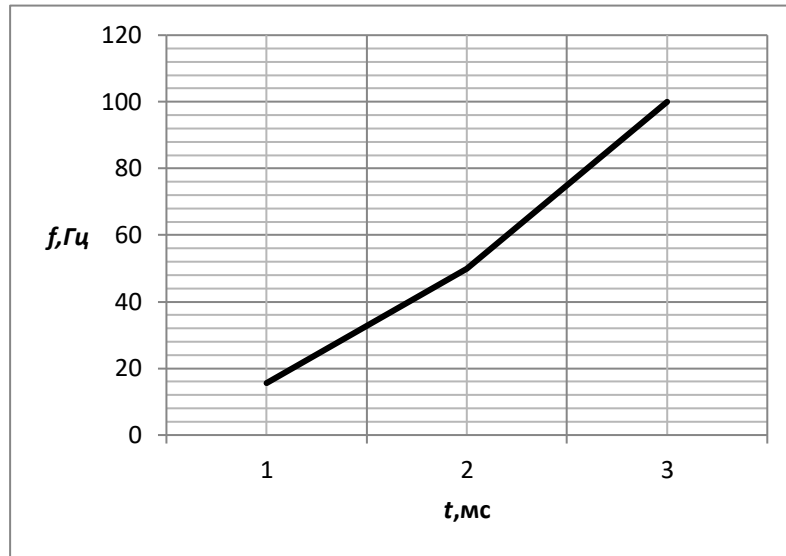


Рисунок 3.3 – Спектр імпульсного сигналу.

Для створення умов вільного звукового поля по техніко-економічним міркуванням доцільно будувати спеціальні заглушені басейни.

В басейні з великим поглинанням нерівномірність звукового поля має бути розрахована приблизно за формулою:

$$\pm \Delta L = 10 \lg \left[1 + \frac{16\pi r^2}{S |\ln(1 - \alpha)|} \right],$$

де r – відстань від центра випромінювання до точки вимірювання, м;

S – площа заглушеної поверхні басейну, м^2 $S = 2 \cdot \frac{9,75}{2} \cdot 1,367 = 13,3$;

α – коефіцієнт звукопоглинання, $\alpha = 0,8$.

$$\pm\Delta L = 10\lg \left[1 + \frac{16 \cdot 3,14 \cdot 4,9^2}{13,3|\ln(1 - 0,8)|} \right] = 17,59\text{дБ}$$

В замкнутих басейнах звукове поле можливо вважати вільним до відстані, рівних:

$$d = \frac{1}{10}V, \text{ м}$$

d – відстань між контуром машини та точкою вимірювання, м;

V – об'єм приміщення, м^3 .

$$d = \frac{1}{10} \cdot 57,2 = 5,72 \text{ м.}$$

При умові, що шум проникає в заглушений басейн зі сміжного з ним приміщення, необхідну звукоізолюючу здатність її огорожень, яка розраховується за формулою:

де сумарний рівень звукової потужності всіх джерел шуму, які знаходяться в сміжному з заглушеним басейном приміщення, октавної смузі, дБ. $L_{\Pi} = 60$ дБ.

$$10^6 + 2 \cdot 10^{0,1L_x} = 10^{6,5}$$

$$L_x = 60 + 10 \lg \left(\frac{10^{0,5} - 1}{2} \right) \approx 60\text{дБ}$$

$B_{\text{ш}}$ – стала сміжного приміщення в октавній смузі, м^2 .

S – площа поверхні заглушеного басейну, через яку проникає шум, м^2 .

m — кількість огорожень басейну, через яку проникає шум;

допустимий рівень звукового тиску в заглушеному басейні октавної полоси, дБ.

$$B_{\text{ш}} = B_{5000}\mu$$

Якщо шум проникає в заглушений басейн з навколишньої атмосфери, звукоізолюючу властивість її огорожень:

де сумарний рівень звукової потужності всіх джерел шуму на відстані 2м від зовнішньої огорожуючої конструкції басейну, дБ;

Стала $B_{\text{ш}}$ сміжного приміщення в октавній смузі, визначається по формулі:

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i + \sum_{i=1}^m A_k n_k (\text{м})^2;$$

$$\bar{\alpha} = \frac{A}{\sum_{i=1}^n S_i},$$

$$A = 1,0 \cdot 13,3 = 13,3 (\text{м})^2$$

де A — загальна еквівалентна площа, звукопоглинання приміщення, м^2 .

S_i — коефіцієнти звукопоглинання та площі відокремлених поверхонь приміщення відповідно, 1,25.

A_k, n_k – еквівалентні площі звукопоглинання та кількість відокремлених, штучних звукопоглиначів відповідно;

$\bar{\alpha}$ – середній коефіцієнт звукопоглинання приміщення, 1,0;

$\sum_{i=1}^n S_i$ – загальна площа всіх огорожень поверхонь приміщення, м².

Звукоізолюючу здатність огорожень басейну розраховуються:

середній рівень звукового тиску в октавній смузі в приміщенні, дБ.

Ефективність звукопоглинаючого облицювання оцінюються коефіцієнтом звукопоглинання, який дорівнює відношення енергії поглиненої до енергії падаючої:

$$\alpha = \frac{I_{\text{пад}} - I_{\text{отр}}}{I_{\text{пад}}} = \frac{I_{\text{погл}}}{I_{\text{пад}}};$$

$$\alpha = 1 - \frac{I_{\text{отр}}}{I_{\text{пад}}} = 1 - \left(\frac{P_{\text{отр}}}{P_{\text{пад}}}\right)^2;$$

$$\beta = \frac{P_{\text{отр}}}{P_{\text{пад}}};$$

$$\alpha = 1 - \beta^2.$$

$$\alpha = 1 - \left(\frac{20,9}{32,6}\right)^2 = 0,6.$$

Висновки по розділу:

В третьому розділі:

- зменшено шуми в басейні та скорочено число перешкод, які виникають під час виконання гідроакустичних вимірювань, за допомогою розрахунку геометричних і якісних показників;

- за розрахунками визначено довжину, глибину басейну та робочий об'єм, що відповідає нормам якості;
- ефективність звукопоглинального облицювання виражена коефіцієнтом 0,6, а звукопоглинальна здатність – 63 дБ. З огляду на те, що облицювання складається з гуми, можна припустити, що здатність звуковідбиття підвищилася, відповідно, шум і число перешкод знижено.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання роботи було:

- забезпечено огляд великого об'єму теоретичних даних, які виявились необхідними для наступних розрахунків у практичній частині;
- описані особливості конструювання гідроакустичних вимірювальних басейнів;
- розглянуто основні параметри;
- виконана розрахункова частина, результатом якої є:
 - визначення оптимально зручних геометричних розмірів басейну, які відповідають нормам побудови;
 - забезпечена відповідність вимог до вихідних даних: вимірювання проводяться починаючи з 5 кГц, забезпечується режим безеховості та робочий об'єм не гірше 20-25%;
 - за допомогою розрахунків та проведення коригування певних даних забезпечено зменшення шумів, що і є найголовнішою задачею.

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике.- М.: Наука, 1974.- С.942.
2. Горелик Г.С. Колебания.- М.: Государственное издательство технико-теоретическое издательство, 1950.- С.551.

3. Урик Р. Д. Основы гидроакустики / Р. Д. Урик. Л.: Судостроение, 1978. 448 с.
4. Беранек Л., Акустические измерения, пер. с англ., М., 1952; Блинова Л. П., Колесников А. Е., Ланганс Л. Б., Акустические измерения, М., 1971.
5. Евтютов А. П. Примеры инженерных расчетов в гидроакустике / А. П. Евтютов, В. Б. Митько. Л.: Судостроение, 1981. 256 с.
6. Разработка принципов и устройств передачи геофизической информации по гидроакустическому каналу связи: отчет о НИР / НЭИС им. Н. Д. Псурцева; рук. Макаров А. А., Чиненков Л. А. Новосибирск, 1982. 76 с. № ГР 81019632. Инв. N 02830014986.
7. Криволапов Г. И. Результаты испытания аппаратуры двусторонней гидроакустической связи для автономных донных станций / Г. И. Криволапов, Л. А. Потеряева, Г. А. Чернецкий // Методика и техника сейсмоакустических и вибросейсмических исследований на акваториях: сб науч. тр. под ред. В. И. Добринского. Новосибирск, ВЦ СО АН СССР, 1988. С. 10–16.
8. Прибылов В. П. Исследование и разработка алгоритмов передачи информации в каналах связи со значительным временем распространения сигналов: дис. ... канд. техн. наук / В. П. Прибылов. Новосибирск, СибГУТИ, 2003. 155 с.
9. Исаев А.Е. Точная градуировка приемников звукового давления в водной среде в условиях свободного поля. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2008, 369 с.
10. Исаев А.Е., Поликарпов А.М., Черников И.В. Акустические сигналы и поля для метрологических работ в лабораторном гидроакустическом бассейне. Статья в настоящем номере, с.76-102.
11. Исаев А.Е., Матвеев А.Н., Поликарпов А.М., Щерблюк Н.Г. Измерение фазочастотной характеристики чувствительности гидрофона по полю методом взаимности// Измерительная техника. 2013, № 6, с. 56-58.

12. Лопашев Д.З. Исследование звукового поля в большом измерительном бассейне/ Исследования в области акустических и гидроакустических измерений// Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов СССР. Вып. 73(133). М.: Стандартгиз, 1963, с. 31- 40.
13. Stephen P. Robinson et al. An international key comparison of free-field hydrophone calibrations in the frequency range 1 to 500 kHz// JASA. 2006, vol. 120, № 3, p. 1366 1373.
14. Назначение и классификация гидроакустических средств [Электронный ресурс]. – Режим доступа: refac.ru/naznachenie-iklassifikaciya-gidroakusticheskix-sredstv.
15. Бурдик, В. С. Анализ гидроакустических систем [Текст] / В. С. Бурдик. – Л. : Судостроение, 1988. – 392 с.
16. Простаков, А. Л. Гидроакустика и корабль [Текст] / А. Л. Простаков.– Л. : Судостроение, 1967. – 129 с.
17. Зарайский, В. А. Теория гидролокации [Текст] / В. А. Зарайский, А. М. Тюрин. – Л. : ВМОЛУА, 1975. – 605 с.
18. Болгов, В. М. Акустические шумы и помехи на судах [Текст] / В. М. Болгов, Д. Д. Плахов, В. Е. Яковлев. – Л. : Судостроение, 1984. – 192 с.
19. <https://cyberleninka.ru/article/n/zavod-priboy-i-gidroakustika-trtu>
20. <http://www.servotechnica.ru/news/index.pl?id=272>
21. <http://mbsz.ru/?p=10100>
22. <https://oborona.ru/includes/periodics/defense/2013/0620/233710977/detail.shtml>
23. <https://bigenc.ru/physics/text/2358000>
24. Горелик Г.С. Колебания.- М.: Государственное технико-теоретическое издательство, 1950.- С.551.

25. «ННГАСУ» издание газеты «Строитель» и приложения «Студенческий вестник»
26. Бобылев, В.Н. О звукоизоляции однослойных ограждений в области частот ниже граничной частоты диффузности звукового поля
27. Рекомендации «по расчету и проектированию акустических камер» НИИСФ Госстроя СССР. Москва 1987. Л.Г. Бальян
28. Митько В. Б. Гидроакустические средства связи и наблюдения / В. Б. Митько, А. П. Евтюнов, С. Е. Гущин. Л.: Судостроение, 1982. 200 с.
29. Исаев А.Е., Матвеев А.Н., Некрич Г.С. Поликарпов А.М. Градуировка приемника градиента давления по полю в отражающем бассейне с применением ЛЧМ сигнала// Акустический журнал, 2013, Т. 59, № 6, с. 773-781.
30. Исаев А.Е. Патент № 2509441, Российская Федерация, С1.
Кл. Н04R 29/00. Способ определения фазового угла комплексной чувствительности гидрофона методом взаимности/ Опубликовано 10.03.2014, БИ № 7.
31. Nayman G., Robinson S. Phase calibration of hydrophones by the free-field reciprocity method / Proc. of the 11th European Conference on Underwater Acoustics // Edinburgh, 2012, p. 1437-1444.
32. Пичугин, С. Состояние и перспективы развития систем гидроакустического наблюдения ВМС США/ С. Пичугин // ЗВО № 6, 2010. – С. 61-70
33. Дерепя, А. В. Обтічники конструкцій гідроакустичних антен [Текст] / А. В. Дерепя, О. Г. Лейко // Системи обробки інформації. – Вип. 6 (104). – Харків : ХУПС, 2012. – С. 13–16.
34. Гулега, Л. Г. Активное гашение звука. Особенности технической реализации [Текст] / Л. Г. Гулега, Н. С. Лейко, А. Г. Лейко [и др.] // Актуальные аспекты физико-математических исследований. Акустика и волны. – К. : Наук. думка, 2007. – 343 с.