

Титульний аркуш магістерської дисертації
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет електроніки
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра акустики та акустоелектроніки
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК 534.134

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри

Дідковський В.С.
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ” 20 р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності (спеціалізації) 171. Електроніка
(код і назва спеціальності)

на тему: Акустичне моделювання повітряних каналів слухової системи

Виконав : студент б курсу, групи ДГ-61м
(шифр групи)

Морозко Павло Вадимович
(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник доц. каф. А та АЕ к.ф.-м.н. Луньова С.А.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант _____
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент доц. каф. З та РІ к.т.н. Трапезон К.О.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.
Студент _____
(підпис)

Київ – 2018 року

Завдання на магістерську дисертацію
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»

Інститут/факультет _____ Факультет електроніки
(повна назва)

Кафедра _____ Акустики та акустoeлектроніки
(повна назва)

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

Спеціальність (спеціалізація) _____ 171. Електроніка
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Дідковський В.С.
(підпис) (ініціали, прізвище)

« ___ » _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Морозку Павлу Вадимовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Акустичне моделювання повітряних каналів слухової системи

науковий керівник дисертації Луцьова С.А., канд.фіз.-мат.наук, доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « 09 » 02 2018 р. № 691-с

2. Строк подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження Частотна залежність сприйняття звуку зовнішнім слуховим каналом людини

4. Предмет дослідження (Вихідні дані – для магістерської дисертації за освітньо-професійною програмою) Вхідний акустичний опір та коефіцієнт підсилення звукового тиску зовнішнього слухового каналу людини

5. Перелік завдань, які потрібно розробити

а) Проаналізувати можливість моделювання зовнішнього слухового каналу у вигляді поєднання рупора та вузької труби.

б) Розглянути строгі та наближені підходи до знаходження звукового поля в рупорах різних форм.

в) Побудувати електроакустичну схему зовнішнього слухового каналу та розрахувати її елементи.

г) Дослідити роботу математичної моделі та провести аналіз отриманих результатів.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу

а) Рисунки електроакустичних схем.

б) Графіки результатів дослідження

7. Орієнтовний перелік публікацій

а) Морозко П.В., Луньова С.А., Замша К.С. , Можливості моделювання повітряного каналу слухової системи.. - ISSN 2524-2725 Електронна та акустична інженерія. 2018. Том.2. – 6с.

б) A. Prodeus, K. Bukhta, P. Morozko, O. Serhienko, I. Kotvytskyi, I. Shherbenko, Automated System for Subjective Evaluation of the Ukrainian Speech Intelligibility - 2018 IEEE 38th International Conference on ELECTRONICS AND NANOTECHNOLOGY (ELNANO). pp. 533-538.

в) Морозко П.В. “Объективная оценка субъективного восприятия качества звучания,” електроніка-2016 збірник статей, Київ.: Кафедра, с. 28-31.

8. Дата видачі завдання _____ 03.11.2016 _____.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1,	Аналіз літературних джерел. Вибір матеріалу аналітичного огляду.	20.02.2017	
2,	Побудова математичної моделі зовнішнього слухового каналу	23.05.2017	
3	Розрахунок елементів математичної моделі	11.09.2017	
4,	Обробка результатів роботи мат моделі	05.12.2017	
5	Аналіз результатів роботи мат. моделі	15.03.2018	
6	Оформлення пояснювальної записки	10.05.2018	

Студент

(підпис)

Морозко П.В.

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

Луцьова С.А.

(ініціали, прізвище)

Реферат

Магістерська дисертація: **91 с., 24 рис., 21 табл., 3 додатки, 17 джерел**

Актуальність теми: Акустичне моделювання слухових функцій людини потребує створення математичної моделі сприйняття звуку зовнішнім відділом слухової системи, яка є невід'ємною частиною слухового апарату. На сьогоднішній день акустичне моделювання зовнішнього вуха не розглядалося, оскільки увага приділялася тільки проходженню звуку через зовнішній слуховий канал, а роль вушної раковини у сприйнятті звуку вважалася несуттєвою.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Робота виконується на замовлення виробничого об'єднання «Фонтек–С» з ціллю впровадження у подальші розробки звукових сигналізаційних пристроїв.

Мета і задачі дослідження. Розробити математичну модель зовнішнього вуха у вигляді поєднання приймального рупора з вузькою трубою із жорсткими стінками.

Для досягнення мети необхідно виконати наступні завдання:

- розробити математичну модель зовнішнього вуха;
- виконати огляд строгих та наближених підходів до розрахунків звукового поля в рупорах різних форм;
- розрахувати елементи математичної моделі;
- дослідити роботу математичної моделі;
- виконати аналіз отриманих результатів;

Об'єкт дослідження. Частотна залежність процесу сприйняття звуку зовнішнім слуховим каналом.

Предмет дослідження. Вхідний опір та коефіцієнт підсилення звукового тиску зовнішнім вухом.

Методи дослідження. Теоретичні, емпіричні, методи математичної обробки результатів дослідження.

Наукова новизна одержаних результатів. Створення математичної моделі зовнішнього вуха у вигляді поєднання приймального рупора та вузької жорсткої труби.

Практичне значення одержаних результатів. Поєднання запропонованої електроакустичної схеми зовнішнього вуха з відомими моделями середнього та внутрішнього вуха дозволить створити повну математичну модель слухової системи.

Апробація результатів дисертації. Частково матеріали виконаних досліджень викладені в статті «Можливості моделювання повітряного каналу слухової системи, прийнятої до публікації в журналі «Електронна та акустична інженерія» .

Публікації:

- Морозко П.В., Луньова С.А., Замша К.С. , Можливості моделювання повітряного каналу слухової системи.. - ISSN 2524-2725 Електронна та акустична інженерія. 2018. Том.2. – 6с.

- A. Prodeus, K. Bukhta, P. Morozko, O. Serhiienko, I. Kotvytskyi, I. Shherbenko, Automated System for Subjective Evaluation of the Ukrainian Speech Intelligibility - 2018 IEEE 38th International Conference on ELECTRONICS AND NANOTECHNOLOGY (ELNANO). pp. 533-538.

- Морозко П.В. “Объективная оценка субъективного восприятия качества звучания,” електроніка-2016 збірник статей, Київ.: Кафедра, с. 28-31.

Ключові слова: зовнішнє вуха, вушна раковина, зовнішній слуховий канал, вузька жорстка труба, експоненційний, катеноїдний, конічний, рупор, математична модель, електроакустична схема.

Abstract

Master's dissertation: 91 pp., 24 pp., 21 tables, 3 packs, 17 sources.

Relevance of the topic: Acoustic modeling of auditory functions of a person requires the creation of a mathematical model for the perception of sound by the external department of the auditory system, which is an integral part of the auditory apparatus. Today, the acoustic modeling of the external ear has not been considered, since attention was paid only to the passage of sound through the external auditory canal, and the role of the ear bowl in the perception of sound was considered insignificant.

Relationship of work with scientific programs, plans, themes

The work is carried out on request of the production association "Fontec-C" for the purpose of further development of sound signaling devices.

The purpose and tasks of the study. Develop a mathematical model of the external ear in the form of a combination of a horn with a narrow tube with rigid walls.

To achieve the goal, you must accomplish the following tasks:

- develop a mathematical model of the external ear;
- to perform a review of strict and close approaches to the calculation of the sound field in the horns of various forms;
- calculate the elements of the mathematical model;
- to study the work of mathematical model;
- to analyze the results obtained;

Object of study. Frequency dependence of the process of perception of sound by external auditory channel.

Subject of study. Input impedance and the sound pressure gain of the external ear.

Research methods. Theoretical, empirical, methods of mathematical processing of research results.

Scientific novelty of the obtained results. Creation of a mathematical model of the external ear in the form of a combination of a receiver and a narrow rigid tube.

The practical value of the results. The combination of the proposed electroacoustic scheme of the external ear with known models of the middle and inner ear will create a complete mathematical model of the auditory system.

Approbation of the results of the dissertation. Partly the materials of the performed research are described in the article "Possibilities of air channel modeling of the auditory system adopted for publication in the journal" Electronic and acoustic engineering ".

Publications:

- P. Morozko, S. Lunyova , K. Zamsha , "Mozhlyvosti modeliuвання povitrianoho kanalu slukhovoї systemy [Opportunities for modeling the air channel of the auditory system]." - ISSN 2524-2725 Electronic and acoustic engineering. 2018. Volume.2. - 6s

- A. Prodeus, K. Bukhta, P. Morozko, O. Serhiyenko, I. Kotvytskyi, I. Shherbenko, Automated System for Subjective Evaluation of Ukrainian Speech Intelligibility - 2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). pp. 533-538.

- Morozko P.V. " Obektyvnaia otsenka subektyvnoho vospriiatyia kachestva zvuchanyia [Objective assessment of subjective perception of sound quality]," electronics-2016 collection of articles, Kyiv .: Department, p. 28-31

Key words: external ear, ear canal, external auditory canal, narrow rigid tube, exponential, catenoid, conical, horn, mathematical model, electroacoustic scheme.

зміст

ВСТУП	11
РОЗДІЛ 1 ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ РУПОРІВ ДЛЯ АКУСТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЗОВНІШНЬОГО ВУХА.....	13
1.1. Будова зовнішнього вуха	13
1.2. Наближене одномірне хвильове рівняння для рупора	15
1.3. Електроакустичне моделювання рупорів.....	27
РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК РУПОРІВ МЕТОДАМИ ХВИЛЬОВОЇ ТЕОРІЇ ТА ЕЛЕКТРОАКУСТИЧНИХ АНАЛОГІЙ	34
2.1. Теорія приймального рупора	34
2.2. Випромінювальний рупор.....	37
2.3. Коефіцієнт підсилення рупору	43
2.4. Моделювання рупорів різних форм методом електроакустичних аналогій	47
2.4.1. Розрахунок елементів електроакустичної схеми експоненційного рупору.....	48
2.4.2. Розрахунок елементів електроакустичної схеми конічного рупору	50
2.4.3. Розрахунок елементів електроакустичної схеми катеноїдного рупору	53
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ЗОВНІШНЬОГО ВУХА ЗА ДОПОМОГОЮ РУПОРІВ ТА ТРУБ.....	57
3.1. Розрахунок приймального рупору, що відповідає заглибленню вушної раковини.....	58
3.1.1. Експоненційний рупор	58
3.1.2. Катеноїдний рупор.....	59
3.1.3. Конічний рупор	59
3.2 Вхідний опір рупору	60
3.2.1. Закритий рупор.....	60
3.2.2. Відкритий рупор	62
3.3. Коефіцієнт підсилення рупора.....	63

3.4. Моделювання зовнішнього слухового каналу у вигляді вузької труби.....	65
3.4.1. Частотна характеристика зовнішнього слухового каналу.....	68
3.5. Моделювання системи зовнішнього вуха	70
3.5.1. Вхідний опір	70
3.5.2. Коефіцієнт підсилення системи зовнішнього вуха	73
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП ПРОЕКТУ	75
4.1. Опис ідеї проекту	75
4.2. Технологічний аудит ідеї проекту.....	77
4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску старпат-проекту.....	77
4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту	81
4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	82
4.6. Висновки	84
ВИСНОВКИ.....	85
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	87
ДОДАТОК А. До еквівалентних схем акустичних резонаторів та рупорів.....	89
ДОДАТОК Б. До еквівалентних схем акустичних резонаторів та рупорів	90
ДОДАТОК В. До теорії рупору	91

ВСТУП

Розуміння процесу сприйняття звуку людиною необхідне для вирішення багатьох задач, як медичного, так і іншого характеру, зокрема, для тестування електроакустичної апаратури, оцінки акустики приміщень, захисту від шумів та завад, тощо.

Крім того, близько 10% всієї інформації людина сприймає через слух, тому надзвичайно важливим є підтримання у здоровому стані слухового апарату людини.

Людське вухо представляє складний механізм, який складається з багатьох елементів, а за своїми функціями поділяється на зовнішнє, середнє та внутрішнє вухо.

Для прогнозування основних слухових характеристик застосовують математичне моделювання слухової системи, виходячи з особливостей процесу сприйняття звуку. Моделюванню середнього та внутрішнього вуха присвячена значна кількість наукових робіт, в той час як для зовнішнього вуха така задача не ставилася.

Справа в тому, що розглядали тільки проходження звуку через зовнішній слуховий прохід, представляючи його вузькою трубою із жорсткими стінками. Що стосується вушної раковини, то ще наприкінці минулого століття їй традиційно відводили роль воронкоподібного збирача звуків, що потім потрапляють у зовнішній слуховий канал. Вважалося, що слухова чутливість не зміниться, якщо вушну раковину виключити з системи проведення звуків, тобто концентрація звукової енергії вушною раковиною у людини не відіграє вирішальної ролі. Її роль, скоріш за все, зводилася до поліпшення локалізації звуків.

В більш пізніх роботах показано, що вушна раковина і зовнішній слуховий прохід мають власні резонансні частоти. Так, зовнішній слуховий

прохід у дорослих має частоту резонансу приблизно 2500 Гц, а вушна раковина – 5 – 5,5 кГц. Це забезпечує підсилення звуків кожного з цих структур на їх резонансній частоті до 10-12 дБ. Основні функції зовнішнього вуха розширили до захисної, підсилення високочастотних звуків, локалізації джерела звуку та визначення зміщення джерела звуку у вертикальній площині.

Але, на сьогоднішній день питання моделювання зовнішнього слухового каналу залишається відкритим. В роботі пропонується математична модель зовнішнього слухового каналу у вигляді приймального рупору, який відповідає вушній раковині, поєднаного з вузькою трубою, що імітує зовнішній слуховий прохід.

Створення такої моделі дозволить одержати повну електроакустичну схему слухової системи людини для подальших розрахунків характеристик слухового сприйняття.

РОЗДІЛ 1 ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ РУПОРІВ ДЛЯ АКУСТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЗОВНІШНЬОГО ВУХА

1.1. Будова зовнішнього вуха

Зовнішнє вухо — частина вуха, до якої належать вушна раковина і зовнішній слуховий прохід (рис.1.1). Вушна раковина утворена еластичним хрящем. Вона має характерні завитки, що спрямовують звукові коливання у зовнішній слуховий прохід. Знизу вушної раковини міститься сережка вуха.

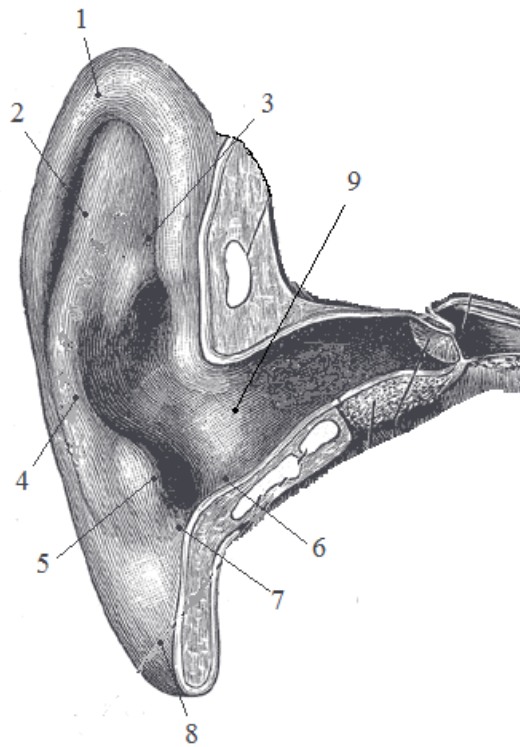


Рис. 1.1. Зовнішнє вухо (1 – завиток; 2 – човноподібна ямка; 3 – трикутна ямка; 4 – протизавиток; 5 – козелок; 6 – раковина вуха; 7 – протикозелок; 8 – сережка, 9- зовнішній слуховий канал).

Зовнішній слуховий прохід [1] являє собою природне продовження внутрішньої порожнини. У дорослої людини його довжина дорівнює приблизно 2,5 см. Протягом життя його діаметр може варіюватися. Форма вушної

раковини округла. Зовнішня частина складається з хрящової тканини, а внутрішня область з кісткової. Хочеться відзначити і той факт, що більшу частину, приблизно $2/3$, займає саме хрящова тканина, а все інше відноситься до кісткової. Кісткова тканина з'єднується з хрящовою, за допомогою фіброзної тканини.

По суті, зовнішнє вухо можна представити вушною раковиною і зовнішнім слуховим проходом. Вушна раковина являє собою досить гнучкий хрящ, який покритий епітеліальною тканиною. У нижньому відділі вушної раковини розташовується мочка. Дана шкірна складка складається в основному з жирової тканини і епітелію. Саме зовнішнє вухо дуже схильне до різних травм і пошкоджень. Ось чому, наприклад, у спортсменів, які займаються боротьбою, дана область часто буває деформована.

Хрящова тканина вушної раковини має товщину близько 1 мм, додатково вона покрита шаром надхрящниці і шкірою. Мочка хрящової тканини не має. Сама раковина увігнута, а по її краю розташовується завиток, а у внутрішній частині - протизавиток. Один від одного їх відокремлює невелике заглиблення, яке називають турою. Далі слідує порожнина, яка виглядає більш поглибленою. Попереду неї знаходиться козелок.

Система роботи досить складна. Спочатку звук відбивається від складок раковини вуха і направляється безпосередньо в слуховий прохід. Його довжина становить 30 мм. У початковій частині він представлений хрящем, за своєю формою нагадує жолоб. Саме в цьому відділі розташовуються невеликі щілини, які тісно межують зі слинною залозою.

Поступово хрящовий відділ переходить в кістковий, який трохи вигнутий. У середині вушний прохід покритий сірчаними і сальними залозами. Саме вони і виробляють так звану вушну сірку. Ця липка речовина знаходиться тут не просто так, вона виконує важливу задачу. Саме сірка здатна затримувати пил і

перешкоджатиме потраплянню різних мікроорганізмів у внутрішній слуховий прохід. Поступово сірка видаляється. Як правило, це відбувається під час жування, коли стінки проходу коливаються.

Слуховий прохід закінчується барабанною перетинкою, яка власне і замикає його.

1.2. Наближене одномірне хвильове рівняння для рупора

Труба є малоефективним випромінювачем звуку, якщо відкритий кінець її має діаметр, менший за довжину хвилі випромінюваного звуку [2]. Таку ситуацію бажано створити в органних трубах та інших духових інструментах, оскільки в них частина хвилі повинна відбиватися від відкритого кінця назад в трубу, для створення сприятливих умов для виникнення різкого резонансу.

Мала ефективність випромінювання невеликих отворів (або малих мембран) є вкрай не вигідною в гучномовцях, тому що гучномовець не повинен мати різко виражених резонансних частот [2]. Зазвичай, при побудові гучномовця вживають два способи, щоб отримати достатньо сильне випромінювання звуку. Один спосіб полягає в тому, що діафрагму, яка коливається і випромінює звук, роблять великою, щоб отримати достатнє випромінювання (такого типу випромінювачі використовуються в диффузорних динаміках). В цьому випадку гучномовці мають перевагу компактності, проте в них застосовуються порівняно важкі рухомі частини, що створює істотні недоліки. Інший спосіб полягає в тому, що використовують малу діафрагму, але збільшують ефективність її випромінювання, використовуючи рупор. Призначення рупора гучномовця полягає в тому, щоб поширити хвилі, збуджені діафрагмою і сконцентровані на малій площі, на велику площу, в результаті чого вони можуть виходити безперешкодно з гирла, лише в дуже малому ступені відбиваючись назад до діафрагми. У цій системі можна вживати дуже легку діафрагму і в той же час отримати гарну акустичну ефективність. Інше важливе призначення рупора полягає в тому, щоб

концентрувати звук в формі спрямованого пучка променів так, щоб більша частина випромінюваної енергії поширювалася в певному напрямку.

Рупор не повинен розширюватися дуже різко, оскільки інакше хвилі не будуть «стелитися» по внутрішніх стінках, розходячись рівномірно на всю площу поперечного перерізу; випромінювання звуку буде відбуватися з площі малої діафрагми як би у вільний простір і тому буде малоефективним. Тому, з огляду на те, що гирло має бути великого діаметру, рупор необхідно робити довгим.

Якщо рупор розширюється не надто швидко, то можна вважати, що хвиля при поширенні розходить рівномірно по всьому перетину рупора, і для задовільного вирішення завдання вжити наближені методи розрахунку.

Форма внутрішньої поверхні рупора впливає, звичайно, на форму хвилі, і так як поперечний переріз змінний, то, крім координати x , слід очікувати залежності також і від координат, перпендикулярних x . Тому справжньої плоскої хвилі в рупорі існувати не може. Слід з'ясувати умови, при яких хвиля поводить себе приблизно, як плоска, а також вивести критерій для оцінки, коли ці умови виконуються.

Плоска хвиля, що розповсюджується в позитивному напрямку по осі x , має одну і ту ж фазу по всій площині, перпендикулярній x . У звичайному запису хвильового руху в експоненційній формі

$$p = Ae^{i\varphi - i\omega t} \quad (1.1)$$

Величина A є амплітудою хвилі і може вважатися дійсною величиною. Величина φ , також дійсна і являє собою фазу хвилі. У випадку плоскої хвилі

$\varphi = \left(\frac{\omega}{c}\right)(x - x_0)$, так що в площині, перпендикулярній до осі x , наприклад, при $x = a$, φ є постійною. У плоскій хвилі поверхнями постійної фази є площини, перпендикулярні до осі x і рухомі уздовж x зі швидкістю c .

Інші хвилі можуть бути представлені в такому ж загальному вигляді, як (1.1), але поверхні рівної фази у них не плоскі, а їх амплітуди - не постійні. Амплітуда сферичної хвилі обернено пропорційна відстані r від джерела, а фаза φ -прямо пропорційна r . Тому поверхнями постійної фази в даному випадку являються сфери, що розширюються в міру віддалення від джерела. Амплітуда і фаза сферичної хвилі, як і у плоскій, є функціями лише однієї координати.

Наближене хвильове рівняння. Якщо виявиться, що одномірне рішення для деякої форми рупора приблизно придатне, то ми можна скористатися наближеним одновимірним хвильовим рівнянням, з якого легко отримати наближене рішення. Виведення і поводження з наближеним рівнянням простіше, ніж з точним.

Замість того щоб розглядати плоский шар між x і $x + dx$, розглянемо тонкий шар повітря між двома сусідніми поверхнями постійної фази (з фазами, що лежать між φ і $\varphi + d\varphi$). Якщо одномірна хвиля є хорошим наближенням для точного рішення, то цей шар майже еквівалентний шару між координатними поверхнями μ і $\mu + d\mu$. Повну площу координатної поверхні μ , що знаходиться всередині рупора, позначимо через S ; вона є функцією тільки μ (S пропорційна площі того перетину рупора, яке торкається поверхні μ). Тому обсяг газу в шарі дорівнює $Sd\mu$ (або приблизно Sdx , так як $x = \mu$ уздовж осі рупора).

При проходженні хвилі поверхні повітря, що мали спочатку координату μ , зміщуються в положення $\mu + \xi$, і новий обсяг повітря в шарі буде дорівнювати:

$$Sdx + dx \frac{\partial}{\partial x} (S\xi)$$

Відносна зміна обсягу шару дорівнюватиме $(\frac{1}{S}) \frac{\partial}{\partial x}(S\xi)$, що узгоджується з рівнянням $p = -\rho \frac{c^2}{S} \frac{\partial}{\partial x}(S\xi)$, яке пов'язує тиск і зміщення частинок. Повна сила, що діє на шар повітря, буде всюди перпендикулярна до поверхні μ (якщо наближення досить добре), і тому рівняння $\rho \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \rho \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x}$ має силу, оскільки диференціювання по μ еквівалентне диференціюванню по x уздовж осі рупора. Продиференціювавши двічі по часу вищенаведене рівняння для p і підставивши $\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$, отримаємо остаточно:

$$\frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial x} (S \frac{\partial p}{\partial x}) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}; \quad \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}; \quad (1.2.)$$

де, як і раніше, $c^2 = (\frac{P_0 \gamma_c}{\rho})$ і де u - величина швидкості частинок (напрямок цієї швидкості перпендикулярний до поверхні μ і паралельний координаті ϑ). Якщо хвилі гармонічні в часі, то між u і p існує співвідношення:

$$u = \frac{1}{i\omega\rho} \frac{\partial p}{\partial x}.$$

Форми рупора. Якщо наближене рівняння для даної форми рупора придатне, то з тим же ступенем наближення можна очікувати, що пряма хвиля в рупорі буде представлена виразом (1.1). Понад те, з тієї ж точністю слід очікувати, що амплітуда A буде обернено пропорційна кореню квадратному з S , так як інтенсивність звуку пропорційна A^2 , а повний потік енергії, що виходить з рупора, дорівнює добутку $A^2 S$, який не залежить від x (оскільки має місце збереження енергії).

Покладемо $S(x) = \pi [y(x)^2]$, де y - ефективний радіус поперечного перетину рупора на відстані x від вузького кінця. Підставляючи вираз

$$p = \left(\frac{B}{y}\right) e^{i\varphi - i\omega t}$$

в рівняння (1.2), отримаємо:

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)^2 + \frac{1}{y} \left(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}\right) - \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 - i \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = 0$$

Дійсна і уявна частини цього виразу повинні бути рівними нулю окремо, оскільки y і φ - дійсні. Рівність нулю уявної частини показує, що $\frac{\partial y}{\partial x}$ має

бути постійною величиною; позначимо її $\left(\frac{\tau \omega}{c}\right)$.

Для того щоб попередні наближення мали місце, дійсна частина рівняння також повинна дорівнювати нулю; це означає, що ефективний радіус поперечного перерізу рупору повинен задовільнити умову:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 (1 - \tau^2) y = 0;$$

Рішення цього рівняння, в яке введені постійні інтегрування, виражається у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} y &= y_0 \left(ch \frac{x}{h} + Tsh \frac{x}{h} \right) \\ S &= S_0 \left(ch \frac{x}{h} + Tsh \frac{x}{h} \right) \\ \tau^2 &= 1 - \left(\frac{c}{\omega h}\right)^2 = 1 - \left(\frac{\lambda}{2\pi h}\right)^2 \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

Відповідне наближене рішення для плоскої хвилі, яка розповсюджується в позитивному напрямку, буде:

$$p \approx \frac{B}{y} e^{\frac{i\omega}{c}(tx-ct)}. \quad (1.4)$$

Форма рупору, представлена виразом (1.3.), визначається відношенням між величинами T і h . Постійними y_0 і $S_0 = \pi y_0^2$ визначають розмір горла рупору при $x=0$. «Коефіцієнт розходження» h визначає швидкість розширення рупору: чим менше h , тим більша кривизна кривої $y = f(x)$. Постійна T являється «коефіцієнтом форми» і визначає головні властивості рупору поблизу його горла. Якщо $T = \frac{h}{x_0}$, а h прямує до нескінченності, то ми маємо кінцевий рупор з кутом між віссю і твірною конуса $\arctg(\frac{y_0}{x_0})$ (кут при вершині конуса дорівнює $2\arctg(\frac{y_0}{x_0})$). Коли $T = 1$, то $y = y_0 e^{\frac{x}{h}}$, і рупор являється експоненціальним. Коли $T = 0$, то твірна рупора представляє собою ланцюгову лінію, і ми маємо справу з катеноїдним рупором. При $x=0$ цей рупор може плавно переходити в трубу постійного перетину, дотична до кінцевого і експоненціального рупора при $x=0$ в нуль не звертається, що погіршує узгодження імпедансів цих рупорів з трубою постійного перетину. для більших значень x катеноїдний рупор відрізняється від експоненціального. Форма всіх трьох типів рупорів показана на рис. 1.2.[3]

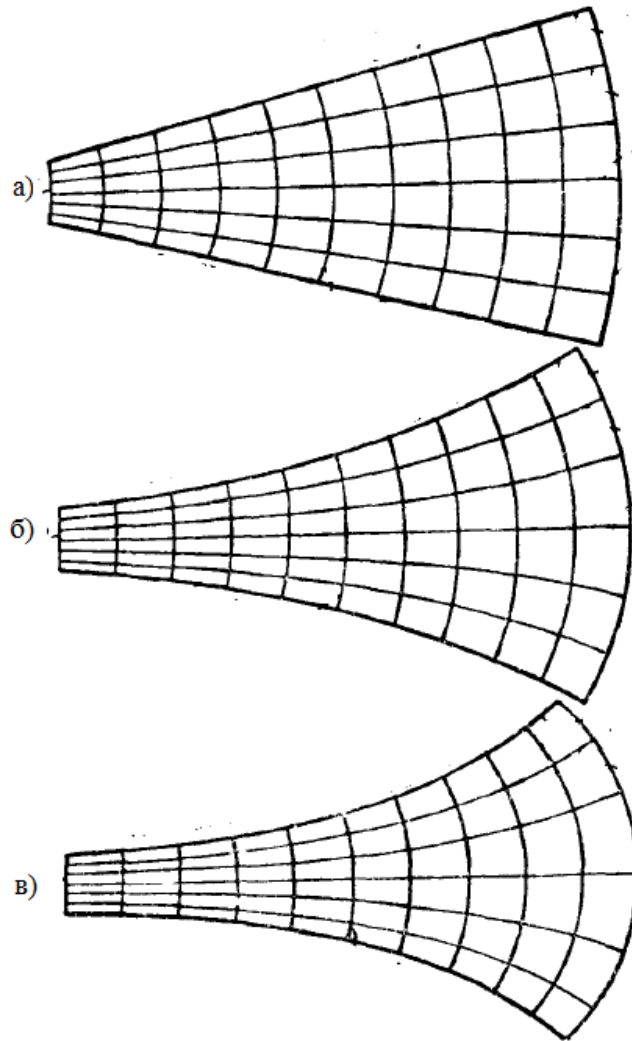


Рис.1.2. Форми рупорів (а - конічний ,б - експоненційний ,в - катеноїдний)

Конічний рупор. В конічному рупорі з кутом ϑ_s (кут при вершині $2\vartheta_s$, площа горла $\pi x_0^2 \sin^2(\vartheta_s)$) площі фазових поверхонь виражаються у вигляді:

$$S = S_0 \left[1 + \frac{x}{x_0} \right]^2; S_0 = \pi y_0^2; y_0 = x_0 \sin(\vartheta_s),$$

де x_0 - відстань від горла до вершини конуса, розміщеного позаду горла за межами рупора.

Вираз (1.2.) перетворюється в:

$$\frac{1}{(x+x_0)^2} \frac{\partial}{\partial x} \left[(x+x_0)^2 \frac{\partial p}{\partial x} \right] = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}.$$

який є точним хвильовим рівнянням для одномірної сферичної хвилі.
Рішення для прямої хвилі:

$$p = \frac{P}{x+x_0} e^{i\frac{\omega}{c}(x-ct)}.$$

Швидкість часток вздовж вісі x :

$$u = \frac{1}{\rho c} \left(1 - \frac{c}{x+x_0} \frac{i\omega}{\omega} \right) p$$

В цьому випадку фазова швидкість c всередині рупору така сама, як і в вільному просторі. Так як хвильовий фронт розширюється по мірі руху в рупорі, імпеданс в напрямку від горла до вихідного отвору навіть при відсутності відображення не співпадає з імпедансом труби постійного перерізу:

$$Z_0 = \left(\frac{p}{u} \right)_0 = \frac{\rho c}{1 + i \frac{c}{\omega x_0}} = \frac{\rho c}{1 + i \frac{\lambda}{2\pi x_0}}.$$

Акустичний імпеданс в горлі конічного рупору $\left(\frac{Z_0}{S_0} \right)$ еквівалентний в схемі електроакустичних аналогій активному опору $\left(\frac{\rho c}{S_0} \right)$. Тому акустичний фільтр чи інша система, яка закінчується конічним рупором, представляється еквівалентним електричним колом, яке замикається шунтом з активного та індуктивного опорів. Потужність, яка губиться в активній гілці, представляє собою енергію, що випромінює відкритий кінець рупору за 1 с. При високих частотах індуктивність має мале значення, при низьких – вона майже повністю закорочує активний опір $\left(\frac{\rho c}{S_0} \right)$.

Питомий акустичний імпеданс в горлі рупору:

$$\left. \begin{aligned} Z_0 &= R - iX = |Z|e^{-i\varphi} \\ R &= \frac{\rho c}{1 + \left(\frac{\lambda}{2\pi x_0}\right)^2}; X = \frac{\frac{\rho c \lambda}{2\pi x_0}}{1 + \left(\frac{\lambda}{2\pi x_0}\right)^2}; \\ |Z| &= \frac{\rho c}{\sqrt{1 + \left(\frac{\lambda}{2\pi x_0}\right)^2}} = \frac{\rho c x_0 \omega}{\sqrt{c^2 + (x_0 \omega)^2}}; \\ \varphi &= \operatorname{arctg} \frac{\lambda}{2\pi x_0} = \operatorname{arctg} \frac{c}{x_0 \omega}. \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

Якщо швидкість часток в горлі рупору, викликана сферичною хвилею, рівна $u_0 e^{-2\pi i \omega t}$, то потужність, яку випромінює рупор, буде дорівнювати:

$$\Pi = \frac{1}{2} u_0^2 R S_0 = \frac{1}{2} \frac{\rho c u_0^2 S_0}{1 + \left(\frac{\lambda}{2\pi x_0}\right)^2} = \frac{1}{2} S_0 \rho c u_0^2 \frac{(2\pi x_0 v)^2}{(2\pi x_0 v)^2 + c^2}.$$

В цьому випадку випромінювана потужність мала при низьких частотах та монотонно зростає зі збільшенням частоти, асимптотично наближаючись до величини $\frac{1}{2} S_0 \rho c u_0^2$. Гранична величина потужності співпадає з тією потужністю, яку той самий поршень посилав би в нескінченну трубу постійного перерізу.

Експоненціальний рупор. Якщо переріз рупору має форму показану на рис.1.2(б) то його називають експоненціальним. Тиск в такому рупорі можна приблизно виразити у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} p &= P e^{-\frac{x}{h} + i \frac{\omega}{c} (\tau x)} \\ \tau &= \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^2} = \sqrt{1 - \left(\frac{v_0}{v}\right)^2}, \\ \lambda_0 &= 2\pi h; v_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{c}{2\pi h}. \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$

де v_0 називається критичною частиною.

Ця хвиля розповсюджується від горла до отвору з амплітудою, що зменшується, і зі швидкістю $\frac{c}{\tau}$, яка перевищує швидкість звуку у вільній атмосфері. Ця швидкість залежить від частоти, так що в експоненційному рупорі існує дисперсія звукових хвиль.

Коли частота рівна v_0 , то швидкість стає нескінченною, іншими словами, повітря рухається в одній фазі вздовж всього рупору. Нижче критичної частоти в рупорі немає справжнього хвильового руху, і тиск дорівнює:

$$p = P \exp \left\{ \left[\sqrt{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} - 1 \right] \frac{x}{h} - i\omega t \right\}; \quad (1.7)$$

де $\omega_0 = \frac{c}{h}$. Таким чином, виходить, що експоненціальний рупор досить ефективний вище визначеного мінімуму частоти (критичної частоти), яка чим менша, тим більший коефіцієнт розходження h . Щоб ефективно випромінювати низькі частоти, потрібен дуже довгий рупор, як і у випадку конічної форми.

Коливальна швидкість в рупорі для частот вище критичної описується диференціальним виразом:

$$u = \frac{1}{\rho c} \left[\tau + i \left(\frac{\omega_0}{\omega} \right) \right] p, \quad \left[\omega > \omega_0 = \frac{c}{h} \right]$$

Питомий акустичний імпеданс в горлі експоненціального рупору для прямих хвиль дорівнює:

$$\left. \begin{aligned} z_0 &= R - iX = |z|e^{-i\varphi}; (\omega > \omega_0); \\ R &= \rho c \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}; X = \rho c \frac{\omega_0}{\omega} \\ |z| &= \rho c; \varphi = \arcsin \frac{\omega_0}{\omega}; \omega_0 = \frac{c}{h}. \end{aligned} \right\} \quad (1.8)$$

Нижче критичної частоти експоненціальний рупор не може вважатися довгим по відношенню до хвилі (всередині рупору), так що наявність імпедансу на вихідних отворах рупору вже повинна бути прийнята в розрахунок. Вище критичної частоти повний опір рівний постійній величині ρc , а фазовий кут рівний 90° при критичній частоті і приближується до нуля з підвищенням частоти.

Якщо амплітуда швидкості поршню, який рухається в горлі рупору, дорівнює u_0 , то випромінювана потужність буде дорівнювати:

$$P = \frac{1}{2} u_0^2 S_0 \rho c \sqrt{1 - \left(\frac{v_0}{v}\right)^2}, \left[v > v_0 = \left(\frac{c}{2\pi h}\right) \right].$$

Для частот, які менші за v_0 , випромінювана потужність дуже мала.

Катеноїдний рупор. Коли поперечний переріз рупору змінюється за законом $S = S_0 c h^2 \left(\frac{x}{h}\right)$, рупор називається катеноїдним. Величина h , показує, наскільки повільно розширюється рупор. На великих відстанях від горла катеноїдний рупор не відрізняється від експоненціального, але в горлі швидкість зміни S в функції x (тобто $\frac{dS}{dx}$) рівна нулю в на відміну від експоненціального рупору. Тому катеноїдний рупор може плавно переходити в трубу постійного перерізу S_0 , в той час як конічний і експоненціальний рупори

не сполучаються плавно з трубою постійного перерізу в силу чого в точці переходу створюється відбивання назад в трубу.

Звертаючись до (1.3) та (1.4) бачимо, що для катеноїдного рупора пряма хвиля наближено подається в одномірній формі:

$$P = \frac{P}{ch \frac{x}{b}} e^{i \frac{\omega}{c} (\tau x - ct)} \quad (1.9)$$

Швидкість розповсюдження хвилі в цьому рупорі $(\frac{c}{\tau})$ більше, ніж швидкість в відкритому просторі так само, як і в експоненціальному рупорі. Тут, так само, має місце критична частота $\nu_0 = \frac{c}{2\pi h}$, нижче якої рупор не є джерелом звуку.

Відносна швидкість часток дорівнює:

$$u = \frac{1}{\rho c} \left[\tau + \frac{i\omega_0}{\omega} th\left(\frac{x}{h}\right) \right] p; \quad \left[\omega > \omega_0 = \frac{c}{h} \right];$$

Отже, вище критичної частоти питомий акустичний імпеданс в горлі рупора ($x = 0$) є активним опором:

$$z_0 = \rho c \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\nu_0}{\nu}\right)^2}} = \rho c \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2\pi h}\right)^2}}; \quad (1.10)$$

Вище критичної частоти ν_0 питомий активний опір більший ніж ρc , зростаючи до дуже великих значень, коли $\nu - \nu_0$ прямує до нуля. У випадку постійної амплітуди швидкості u_0 в горлі рупора випромінювана потужність дорівнює:

$$P = \frac{1}{2} u_0^2 S_0 \rho c \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v_0}{v}\right)^2}}, \left[v > v_0 = \left(\frac{c}{2\pi h}\right) \right].$$

1.3. Електроакустичне моделювання рупорів

Математичний розгляд процесу слухового сприйняття та мовотворення розкладається на ряд послідовних операцій. Перша з них є представленням конфігурації слухового та мовного апаратів у вигляді функції площі, яка характеризує зміну площі поперечного перерізу тракту вздовж осі. Другою операцією є наближене представлення цієї функції системою по можливості невеликої кількості відрізків, в межах яких площі можна вважати постійними. Далі, для цієї системи знаходяться функція передачі, яка складається з частотною характеристикою джерела. Нарешті, отримана таким чином сумарна ЧХ представляється у компактному вигляді як сукупність полюсів та нулів [4].

Теорія простого резонатора Гельмгольца може бути корисна тільки частково, оскільки розміри резонаторів виявляються відносно більшими. Якщо всю систему резонуючих порожнин розбити перерізами, нормальними до напрямлення звукових хвиль, що розповсюджуються, на ряд відрізків, достатньо малих для того, щоб вважати площі поперечного перерізу у їх межах постійними, то еквівалентом такого відрізка з площею поперечного перерізу A та довжиною l можна вважати індуктивність $L = \frac{\rho l}{A}$ та наступну за нею у вигляді поперечної гілки ємність $C = \frac{lA}{\rho c^2}$; послідовно з L вмикається опір R , а паралельно з C – провідність G . Подібна еквівалентна схема добре відображає властивості відрізка кінцевої довжини в області частот, при яких довжина хвилі залишається більшою за $8l$.

В акустичних системах, крім цього потрібно зважати на наявність критичної частоти, вище якої з'являються коливання у радіальному напрямку. Відповідна цій частоті довжина хвилі приблизно у два рази більша за найбільший поперечний розмір системи.

Якщо прийняти, що втрати, які визначаються величинами R та $\frac{1}{G}$, відносно малі, резонансні частоти системи резонуючих порожнин будь-якої складності визначаються тільки елементами L та C ; елементи R та G , або точніше кажучи, відношення $\frac{R}{L}$ та $\frac{G}{C}$, визначають тільки ширину резонансних піків.

Коли довжина відрізка не дуже мала, більш точне представлення його у вигляді еквівалентної схеми можна отримати, якщо розбити всю відповідну його довжині індуктивність на дві рівні половини і помістити їх симетрично відносно ємності. Відрізок, який має поперечний переріз A та довжину l , представиться у цьому випадку еквівалентною схемою у вигляді Т-подібної ланки, у склад якої входять елементи:

$$a = Zth\frac{\Gamma}{2}, \quad b = \frac{Z}{sh\Gamma}. \quad (1.11)$$

Характеристичний імпеданс Z та постійна розповсюдження Γ визначаються розподільними параметрами L , C , R та G , розрахованими на одиницю довжини, у відповідності з класичними виразами:

$$\left. \begin{aligned} Z &= \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}, \\ \Gamma &= l\sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = l(\alpha + j\beta) = l\gamma, \end{aligned} \right\} \quad (1.12)$$

де γ – комплексний коефіцієнт розповсюдження, який включає в себе коефіцієнт згасання α та фазовий коефіцієнт β .

У випадку малих втрат енергії:

$$\left. \begin{aligned} Z &= Z_0 \left[1 - \frac{j^{\alpha_R}}{\beta} + \frac{j^{\alpha_G}}{\beta} \right], \\ \gamma &= \alpha_R + \alpha_G + j\beta, \end{aligned} \right\} \quad (1.13)$$

$$\left. \begin{aligned} Z_0 &= \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad \alpha_R = \frac{R}{2Z_0} \\ \beta &= \omega\sqrt{LC}, \quad \alpha_G = \frac{GZ_0}{2} \end{aligned} \right\} \quad (1.14)$$

Оскільки індуктивність L та ємність C на одиницю довжини для акустичної лінії дорівнюють, відповідно:

$$L = \frac{\rho}{A}, \quad C = \frac{A}{\rho c^2}, \quad (1.15)$$

формули (1.14) можуть бути представлені у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} Z_0 &= \frac{\rho c}{A}, \quad \alpha_R = \frac{1}{c} \cdot \frac{R}{2L} = \frac{RA}{2\rho c} \\ \beta &= \frac{\omega}{c}, \quad \alpha_G = \frac{1}{c} \cdot \frac{G}{2C} = \frac{G\rho c}{2A} \end{aligned} \right\} \quad (1.16)$$

Якщо знехтувати втратами, то малий відрізок резонансної системи повністю характеризується його довжиною та площею його поперечного перерізу. Це наближено справедливо для будь-якої форми поперечного перерізу, а не тільки для кругової.

Для спрощення виразів буде доцільно зробити просту апроксимацію мовного тракту.

Акустична теорія рупора в тому вигляді, як вона представлена у Морза [2], дає достатньо добру фізичну основу для розрахунків. Однак при розгляді рупору як частини складної системи порожнин, необхідно, крім хвильового рівняння, що описує роботу рупору, мати його еквівалентну схему. Еквівалентні схеми для неоднорідних ліній з параметрами, які безперервно змінюються, та в точності відповідають класу рупорів, розглянутих Морзом, були отримані Лоурентом [5].

Загальний вираз для площі поперечного перерізу рупору $A(x)$, як функції відстані x вздовж її осі, має вигляд:

$$A(x) = \frac{A_0}{ch^2 \varepsilon} ch^2 \left(\frac{x}{h} + \varepsilon \right), \quad (1.17)$$

якщо площа зростає при зростанні x , та

$$A(x) = \frac{A_0 ch^2 \varepsilon}{ch^2 \left(\frac{x}{h} + \varepsilon \right)}, \quad (1.18)$$

якщо площа зменшується при зростанні x .

Коли $\varepsilon = 0$, отримаємо катеноїдний рупор; якщо $\varepsilon = \infty$, то рупор експоненціальний; нарешті, якщо $\varepsilon = \frac{x_0}{h} - j \frac{\pi}{2}$ та $h \rightarrow \infty$, - рупор конічний.

Постійні ε та h можуть звичайно мати і інші значення ніж вказані, що буде відповідати рупорам інших форм.

Використовуючи постійні, які входять у запропоноване Морзом рівняння рупору, елементи еквівалентних схем на рисунку можна, слідуючи Лоуренту (див. ДОДАТОК Б)

Крім вказаних, в еквівалентну схему входять додаткові послідовні та паралельні елементи, а саме:

$$\left. \begin{aligned} d &= Z_0 h \gamma_0 \operatorname{cth} \frac{l}{h}, \\ f &= -Z_0 h \gamma_0 \operatorname{cth} \left(\frac{l}{h} + \varepsilon \right) \end{aligned} \right\} \quad \text{у випадку площі, яка зростає,}$$

$$\left. \begin{aligned} g &= \frac{Z_0}{h \gamma_0} \operatorname{cth} \frac{l}{h}, \\ f &= -\frac{Z_0}{h \gamma_0} \operatorname{cth} \left(\frac{l}{h} + \varepsilon \right) \end{aligned} \right\} \quad \text{у випадку площі, яка зменшується.}$$

Окремі випадки катеноїдного, експоненціального та конічного рупорів наведені у ДОДАТКУ А.

Катеноїдний рупор особливо вдалий для моделювання мовного тракту, оскільки для нього зникає хоча б один з додаткових елементів в еквівалентній схемі; крім цього, важливо, що кут нахилу дотичної до твірної рупору дорівнює нулю при $x = 0$, що забезпечує поєднання рупору з іншими елементами.

При частотах, які значно перевищують критичну, еквівалентна схема така сама, як для відрізка труби з постійною площею поперечного перерізу, рівної площі горла рупору; єдиною відмінністю є присутність у випадку рупору

ідеального трансформатору. При більш низьких частотах вплив трансформатору послаблюється наявністю у схемі елементів d та f .

Розповсюдження звукових хвиль, навіть в ідеальних трубах із жорсткими стінками, пов'язане з втратами. В шарі, який прилягає до внутрішньої поверхні труби, виникають втрати на тертя. Їх можна врахувати, якщо ввести у схему послідовний опір:

$$R = \frac{S}{A^2} (2\mu\omega\rho)^{1/2}, \quad (1.19)$$

де $\mu = 1,84 \cdot 10^{-4}$ г/см·сек – коефіцієнт в'язкості.

У випадку труби кругового перерізу відношення площі A до периметру S дорівнює половині радіусу r та опір визначається наступним чином:

$$R = \frac{1}{Ar} (2\mu\omega\rho)^{1/2}, \quad (1.20)$$

Шар на границі, який має в'язкість, крім внесених втрат, зменшує також ефективну величину площі, яка входить у вираз для індуктивності L на одиницю довжини. Враховуючи це, маємо:

$$L = \left[\frac{\rho}{A} + \frac{S}{A} \left(\frac{\mu}{2\omega\rho} \right)^{1/2} \right]. \quad (1.21)$$

Проте в розрахунках, які відносяться до мовного тракту, поправочним членом в цьому виразу можна знехтувати.

Втрати на тертя в еквівалентній схемі повинні бути пропорційні квадрату струму, а втрати на теплопровідність – квадрату напруги. Тому останні повинні бути враховані шляхом введення в схему елемента з провідністю G , який можна визначити за формулою:

$$G = S(\chi - 1) \frac{\beta}{\rho c} \left(\frac{K_h}{2\omega C_p \rho} \right)^{1/2}, \quad (1.22)$$

де K_h – коефіцієнт теплопровідності повітря, C_p – теплоємність повітря при постійному тиску, C_v – теплоємність повітря при постійному об'ємі,

$$\chi = \frac{C_p}{C_v}, \quad \beta = \frac{\omega}{c}.$$

За звичайних атмосферних умов (1 атм, 20° С) знайдемо, підставляючи відповідні чисельні значення, наступні вирази для елементів схеми, враховуючи втрати:

$$\left. \begin{aligned} R &= \frac{1,66 \cdot 10^{-3} f^{1/2}}{A \left(\frac{2A}{S} \right)}, \quad \alpha_R = \frac{2,01 \cdot 10^{-5} f^{1/2}}{\frac{2A}{S}}, \\ G &= \frac{S \cdot 0,91 \cdot 10^{-5} f^{1/2}}{c}, \quad \alpha_G = \frac{0,91 \cdot 10^{-5} f^{1/2}}{\frac{2A}{S}} \end{aligned} \right\} \quad (1.23)$$

Ці вирази показують, що нехтувати при розрахунках теплопровідністю не можна, оскільки обумовлена нею частина коефіцієнта втрат складає майже половину тієї частини його, яка враховує втрати на тертя. Теоретично ці втрати можуть бути враховані при введенні в схему шунтуючого імпедансу, який зручно представляти у вигляді великої індуктивності і паралельного їй великого опору. Зворотна величина цього опору буде визначати провідність втрат G_s .

Незалежно від фізичної природи явищ, які викликають втрати енергії у стінок звукопроводу, можна побачити, що коефіцієнт затухання для відрізка звукопроводу з постійною вздовж його довжини площею поперечного перерізу пропорційний периметру, при будь-якій формі перерізу. Це справедливо, як для α_R так і для α_G .

Розрахунки показали, що швидкості часток у вузьких проходах можуть виявитися достатньо великими для того, щоб обумовити значне нелінійне збільшення опору тертя на НЧ. Розрахунки, які були виконані Інгардом [6], показали, що опір у вузькому отворі з різким переходом до прилеглих порожнин визначається співвідношенням:

$$R = \frac{1,66 \cdot 10^{-3} f^{1/2}}{Ar} \left[1 + 2r + 2r \cdot 0,7 \left(\frac{v}{100} \right)^{1,7} \right], \quad (1.24)$$

де r – радіус отвору. Другий член у квадратних дужках – лінійна частина кінцевої поправки, яка представляє собою суму поправок по одну та по другу

сторону отвору; третій член характеризує нелінійне зростання кінцевої поправки. Цей член не залежить від довжини отвору, якщо довжина отвору велика у порівнянні з коливальним зміщенням часток v/ω .

Навантаженням фільтру, який моделює мовний тракт, є імпеданс випромінювання. Цей імпеданс містить активний опір і послідовно підключений індуктивний опір. Втрати енергії в активному опорі відповідають випроміненій енергії, а індуктивний опір відповідає ефективній масі повітря.

РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК РУПОРІВ МЕТОДАМИ ХВИЛЬОВОЇ ТЕОРІЇ ТА ЕЛЕКТРОАКУСТИЧНИХ АНАЛОГІЙ

2.1. Теорія приймального рупора

Метою підрозділу є теоретичне дослідження рупора як приймача звуку. За основу покладаємось на принцип взаємності, який дає змогу визначити властивості рупора, як приймача, виходячи з його властивостей як випромінювача. Загальне формулювання цього принципу належить Релею [7] для застосування до питань акустики та електроакустики.

Розглянемо систему, стан якої можна описати двома параметрами (узагальненими координатами) x , y . Якщо система збуджується періодичними змінами координати x (з амплітудою зміщення ζ), а друга координата утримується незмінною, то на останню діє узагальнена сила Y . Аналогічно, якщо змінюється координата y (з амплітудою зміщення η), а x утримується незмінною, то на останню діє сила X . При цьому:

$$\frac{X}{Y} = \frac{\eta}{\zeta}. \quad (2.1)$$

Таке саме відношення має місце і для амплітуд швидкостей:

$$\frac{X}{Y} = \frac{\dot{\eta}}{\dot{\zeta}}. \quad (2.2)$$

Рівняння (2.1) та (2.2) представляють собою математичний вираз принципу взаємності.

Застосуємо (2.2) до системи, яка складається з рупора, вузький кінець якого закритий мембраною, та нескінченно малої твердої кульки, розміщених у повітрі, або в іншому однорідному середовищі на великій відстані одне від одного. Зміщення мембрани приймемо за координату x , змінення радіусу кульки – за координату y .

Нехай мембрана коливається з амплітудою швидкості $\dot{\zeta}$. Поблизу кульки створюється тиск P_b та сила, що прагне змінити радіус кульки (координату y), $Y = 4\pi r_0^2 P_b$ (r_0 - радіус кульки). Якщо, наприклад, кулька пульсує з амплітудою швидкості $\dot{\eta}$, то на мембрану рупору діє сила X , до того ж:

$$\frac{X}{Y} = \frac{X}{4\pi r_0^2 P_b} = \frac{\dot{\eta}}{\dot{\zeta}}. \quad (2.3)$$

Або вважаючи $X = PS_1$ (S_1 - площа мембрани):

$$\frac{PS_1}{4\pi r_0^2 P_b} = \frac{\dot{\eta}}{\dot{\zeta}}. \quad (2.4)$$

Зауважимо, що коли розміри мембрани можна порівняти з довжиною звукової хвилі, розподілення тиску по її поверхні може бути нерівномірним, але і в цьому випадку будемо користуватися виразом (2.4), розуміючи під P частку від ділення повної сили на площу мембрани.

Виконаємо в (2.3) та (2.4) деякі суттєві для наступних перетворень дії. Потужність, що випромінюється рупором, мембрана якого має поверхню S_1 і коливається з амплітудою швидкості $\dot{\zeta}$, може бути представлена у вигляді:

$$W = \rho c S_1 \frac{\dot{\zeta}^2}{2} \cdot \alpha, \quad (2.5)$$

де α - безрозмірний коефіцієнт, який є функцією частоти. Вид цієї функції для різних випромінювачів різний, але у всіх випадках $\alpha \rightarrow 1$, коли $\lambda \rightarrow 0$, та $\alpha \rightarrow 0$, коли $\lambda \rightarrow \infty$. Будемо називати α коефіцієнтом випромінювання.

Інтенсивність звукового поля рупору в точці, відстань якої від рупору велика в порівнянні з його розмірами та довжиною хвилі, дорівнює:

$$J = \frac{W}{4\pi r^2} \gamma, \quad (2.6)$$

де γ - безрозмірний коефіцієнт, який характеризує концентрацію потужності, яка була випромінена, у заданому напрямку, завдяки направленості

джерела. Для ненаправленого джерела, очевидно, що $\gamma = 1$. Назвемо γ коефіцієнтом концентрації.

Звукове поле в B пов'язане з інтенсивністю відношення $P_b = \sqrt{2\rho c J}$, звідки в силу (2.5) та (2.6):

$$P_b = \frac{\rho c \dot{\zeta}}{2r} \sqrt{\frac{\alpha \gamma S_1}{\pi}}, \quad \dot{\zeta} = \frac{2r P_b}{\rho c} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha \gamma S_1}}. \quad (2.7)$$

Величини P_b в формулах (2.3) та (2.7) тотожні, оскільки внесення в поле нескінченно малої твердої кульки змінює поле.

Розглянемо звукове поле, яке створюється пульсуючою кулькою радіуса r_0 , розміщеним в полі B . Отримана потужність дорівнює:

$$W = \rho c \frac{\eta^2}{2} \cdot 4\pi r_0^2 \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{\lambda}{2\pi r_0}\right)^2} = \frac{8\rho c \eta^2 \pi^3 r_0^4}{\lambda^2},$$

(так як за припущенням $r_0 \ll \lambda$).

Інтенсивність в A за відсутності рупору була б:

$$J_0 = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{2\rho c \eta^2 \pi^2 r_0^4}{\lambda^2 r^2},$$

і, відповідно, тиск:

$$P_0 = \sqrt{2\rho c J_0} = \frac{2\rho c \eta r_0^2}{\lambda r}, \quad \text{звідки } \eta = \frac{P_0 \lambda r}{2\rho c r_0^2}. \quad (2.8)$$

Очевидно, що P_0 відмінне від P - тиску на мембрану рупору, тому що рупор не є малим в порівнянні з довжиною хвилі. Підставляючи в (2.4) вирази для $\dot{\zeta}$ і η , отримуємо:

$$\frac{P}{P_0} = \lambda \sqrt{\frac{\alpha \gamma}{\pi S_1}}. \quad (2.9)$$

Формула виражає коефіцієнт підсилення тиску приймального рупору, через величини, які характеризують рупор як випромінювач. Тому звернемося до теорії випромінюючого рупору.

2.2. Випромінювальний рупор

Точної теорії рупору, як випромінювача не існує. Використаємо наближену теорію Вебстера. У припущенні, що перерізи нормальні до осі рупора є еквіпотенціальними поверхнями, теорія приводить до рівняння:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial(\ln S)}{\partial x} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + k^2 \varphi = 0, \quad (2.10)$$

φ - потенціал швидкостей, який пов'язаний із тиском та швидкістю відношеннями: $p = \rho \frac{\partial \varphi}{\partial t}$, $\zeta = -\frac{\partial \varphi}{\partial x}$, S - змінний переріз рупору, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$.

а) *Нескінчений рупор*. Розглянемо рупор нескінченної довжини. В такому рупорі маємо тільки хвилю, що розходиться.

Балантайн [9] дав рішення рівнянням Вебстера для сімейства рупорів, переріз яких змінюється законом $S = Ax^m$, рахуючи від вершини рупору (m - ціле число). Рішення, якщо обмежитися членом, який представляє хвилю, що розходиться, має вигляд:

$$\varphi = Ax^{-n} [J_n(kx) - iY_n(kx)] e^{i\omega t} \quad (n = \frac{m-1}{2}),$$

де J_n та Y_n - функції Бесселя 1-го та 2-го роду n -го порядку.

Зокрема для $m=1$ (параболічний рупор) та $m=2$ (конічний рупор) отримаємо:

$$\varphi = Ae^{i\omega t} [J_0(kx) - iY_0(kx)] \quad (m=1),$$

$$\varphi = Ae^{i\omega t} \cdot \frac{e^{-ikx}}{x} \quad (m=2).$$

Для активної та реактивної складової вхідного акустичного опору

$$Z = \frac{P}{\dot{\xi}} = \rho c(\alpha + i\beta), \text{ отримаємо:}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha = \frac{2}{\pi k x_1} \\ \beta = \frac{J_0(kx_1)J_1(kx_1) + Y_0(kx_1)Y_1(kx_1)}{J_1^2(kx_1) + Y_1^2(kx_1)} \end{array} \right. \quad (m = 2, \text{ параболічний рупор}) \quad (2.11)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha = \frac{k^2 x_1^2}{1 + k^2 x_1^2} \\ \beta = \frac{k x_1}{1 + k^2 x_1^2} \end{array} \right. \quad (m = 1, \text{ конічний рупор}) \quad (2.12)$$

(x_1 - координата початкового перерізу).

Для експоненційного рупору ($S = S_1 e^{nx}$, де x відраховується від перерізу S_1) маємо, обмежуючись хвилею, що розходиться,

$$\varphi = A e^{-\frac{nx}{2}} e^{-\sqrt{\frac{n^2}{4} - k^2} x} e^{i\omega t}.$$

Звідси знаходимо для активної і реактивної складових імпедансу $Z = \rho c(\alpha + i\beta)$:

$$\alpha = \sqrt{1 - \frac{n^2}{4k^2}}, \quad \beta = \frac{n}{2k}, \quad \text{когда} \left(1 - \frac{n^2}{4k^2}\right) > 0 \text{ или } \omega > \frac{nc}{2}; \quad (2.13)$$

$$\alpha = 0, \quad \beta = \frac{n}{2k} - \sqrt{\frac{n^2}{4k^2} - 1}, \quad \text{корда } \omega < \frac{nc}{2}. \quad (2.14)$$

Для частот $\omega < \frac{nc}{2}$ рупор нічого не випромінює. Можна вважати, враховуючи, що нескінченний експоненційний рупор розгортається у напівпростір, і випромінювання його на досить низьких частотах буде таке саме, якби мембрана коливалася у нескінченному екрані.

Цікаво співставити нескінченний експоненційний рупор з нескінченним конічним рупором, який має такий самий початковий переріз і таку саму швидкість зростання перерізу спочатку. Якщо переріз змінюється за законом

$$S = S_1 e^{nx}, \quad \text{то рівняння осьового перерізу } y = y_1 e^{\frac{n}{2}x}; \quad \text{далі } \operatorname{tg} \mathcal{G} = \left(\frac{dY}{dx}\right)_{x=0} = \frac{ny_1}{2}; \quad 3$$

іншої сторони $y_1 = R_0 t g \mathcal{G}$, де R_0 – початковий радіус зв’язаного конічного рупору, звідки $R_0 = \frac{2}{n}$. Активна частина опору (опір випромінювання)

конічного рупору з початковим радіусом R_0 дорівнює $\rho c \frac{k^2 R_0^2}{1 + k^2 R_0^2}$. Підставивши

$$R_0 = \frac{2}{n}, \text{ отримаємо } \rho c \frac{1}{1 + \left(\frac{nc}{2\omega}\right)^2}.$$

В таблиці В.1 (ДОДАТОК В) співставленні опори випромінювання експоненційного рупору і конічного рупору (виражені в долях «граничної» частоти $\omega_0 = \frac{nc}{2}$);

Як видно з таблиці В.1, нескінченний експоненційний рупор для частот $\omega > \frac{nc}{2}$; випромінює більше, ніж зв’язаний рупор, що дуже мало ймовірно (зв’язаний рупор ближче підходить до ідеального випромінювача – нескінченно довгої труби) і обумовлено, скоріш за все, недоліками теорії Вебстера. Теорія Вебстера переоцінює, таким чином, достатки нескінченного експоненційного рупору. У вираз коефіцієнта випромінювання (2.11) входить тільки відстань початкового перерізу від вершини; між тим з рівняння параболи $y^2 = 4ax$ слідує те, що коли x_1 менше, ніж фокусна відстань $y_1 \gg x_1$, то і коефіцієнт випромінювання, обчислений за формулою (2.11), може бути малим у порівнянні з коефіцієнтом випромінювання поршневої мембрани радіусу y_1 , який коливається в нескінченній стіні, що не правдоподібно.

б) *Кінцевий рупор*. В рупорі кінцевої довжини, що розходиться від вузького кінця хвиля піддається відбиттю в широкому кінці. Накладення прямої та відбитої хвилі дає резонансні явища.

Наведемо виведення основної формули теорії кінцевого рупору, що наданий Вебстером.

Тиск всередині рупору задовольняє рівнянню:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial(\ln S)}{\partial x} \frac{\partial P}{\partial x} + k^2 P = 0, \quad (2.15)$$

Допустимо, що відомі два лінійно незалежних частних рішення, тоді:

$$P(x) = Au(x) + Bv(x), \quad (2.16)$$

де A и B визначаються з граничних умов.

$$\text{З } p\ddot{\xi} = -\frac{\partial P}{\partial x} \text{ слідує } \dot{\xi} = \frac{1}{k^2 c^2 \rho} \frac{\partial P}{\partial x};$$

отже ,

$$\xi = \frac{A}{\chi} u' + \frac{B}{\chi} v' \left[u' = \frac{\partial u}{\partial(kx)}, v' = \frac{\partial v}{\partial(kx)}, \chi = kc^2 \rho \right].$$

На кінцях рупору маємо:

$$P_1(x) = Au_1 + Bv_1, \quad \dot{\xi}_1 = \frac{A}{\chi} u_1' + \frac{B}{\chi} v_1' \quad (2.17)$$

(вузький кінець)

$$P_2(x) = Au_2 + Bv_2, \quad \dot{\xi}_2 = \frac{A}{\chi} u_2' + \frac{B}{\chi} v_2' \quad (2.18)$$

(широкий кінець).

Виразивши з рівнянь (2.17) та (2.18) A та B через P_1 та $\dot{\xi}_1$ і підставивши в (2.18) отримаємо:

$$P_2 = aP_1 + b\dot{\xi}_1, \quad \dot{\xi}_2 = fP_1 + g\dot{\xi}_1, \quad (2.19)$$

де

$$a = \frac{D_4}{D_1}, \quad b = \chi \frac{D_5}{D_1}, \quad f = -\frac{1}{\chi} \frac{D_6}{D_1}, \quad g = \frac{D_3}{D_1}. \quad (2.20)$$

З рівняння (2.19) витікає:

$$\frac{P_2}{\dot{\xi}_2} = \frac{aP_1 + b\dot{\xi}_1}{fP_1 + g\dot{\xi}_1} = \frac{a \frac{P_1}{\dot{\xi}_1} + b}{f \frac{P_1}{\dot{\xi}_1} + g},$$

звідки:

$$\frac{P_1}{\xi_1} = \frac{g \frac{P_2}{\xi_2} - b}{a - f \frac{P_2}{\xi_2}};$$

$$\text{Введемо } Z_1 = \frac{P_1}{\xi_1} = \frac{P_1}{i\omega\xi_1}, \quad Z_2 = \frac{P_2}{\xi_2} = \frac{P_2}{i\omega\xi_2},$$

та одержимо:

$$Z_1 = \frac{i\omega Z_2 - b}{i\omega a + \omega^2 f Z_2}. \quad (2.21)$$

Формула (2.21) виражає вхідний опір рупору через його вихідний опір. Його зазвичай покладають рівним опору, яке напівнескінченне середовище надає поршню, що коливається в нескінченій стінці поршню, радіус якого дорівнює радіусу широкого кінця:

$$Z_2 = \rho c(X + iY),$$

де

$$X = 1 - \frac{J_1(2kR_2)}{kR_2}, \quad Y = \frac{K_1(2kR_2)}{2k^2 R_2^2}, \quad (2.22)$$

(K_1 - функція, яка визначається рядом $K_1(Z) = \frac{2}{\pi} \left(\frac{Z^3}{3} - \frac{Z^5}{3^2 \cdot 5} + \dots \right)$).

Для НЧ:

$$X = \frac{k^2 R_2^2}{2}, \quad Y = \frac{8}{3\pi} kR_2. \quad (2.23)$$

На НЧ користування цими виразами може бути виправдано, тільки якщо широкий кінець закритий великим щитом. В іншому випадку потрібно використовувати вирази для опору, яке середовище надає поршневій мембрані без щита, яка випромінює тільки однією стороною:

$$X = \frac{k^2 R_2^2}{4}, \quad Y = 0,7 \cdot \frac{8}{3\pi} kR_2. \quad (2.24)$$

Представляючи Z_1 у вигляді $Z_1 = \rho c(\alpha + i\beta)$, маємо:

$$\alpha + i\beta = \frac{ig(X + iY) - \frac{b}{\chi}}{ia + f\chi(X + iY)}, \quad (2.25)$$

звідки:

$$\alpha = \frac{X(ag - bf)}{(f\chi X)^2 + (a + f\chi Y)^2}. \quad (2.26)$$

За допомогою перетворень можна показати, що

$$ag - bf = \frac{D_3 D_4 + D_5 D_6}{D_1^2} = \frac{D_2}{D_1}. \quad (2.27)$$

Далі з теорії диференціальних рівнянь слідує:

$$\frac{D_2}{D_1} = \frac{u_2 v_2' - v_2 u_2'}{u_1 v_1' - v_1 u_1'} = e^{-\int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial(\ln S)}{\partial x} dx} = \frac{S_1}{S_2},$$

отже,

$$\alpha = \frac{X \frac{S_1}{S_2}}{(f\chi X)^2 + (a + f\chi Y)^2}. \quad (2.28)$$

Підставляючи в (2.28) відповідні значення a та f , отримаємо:

$$\alpha = X \cdot \frac{4}{\pi^2 k^2 x_1 x_2} : \{ [X J_1(kx_1) Y_1(kx_2) - J_1(kx_1) Y_1(kx_2)]^2 + [J_1(kx_1) Y_1(kx_2) - J_1(kx_2) Y_1(kx_1) - J_1(kx_1) Y_1(kx_2) - J_1(kx_2) - Y_1(kx_1)]^2 \}. \quad (2.29)$$

(параболічний рупор)

$$\alpha = \frac{X \sin^2 k\varepsilon_1 \sin^2 k\varepsilon_2}{[X \sin k(l + \varepsilon_1 - \varepsilon_2)]^2 + [\sin k(l + \varepsilon_1) \sin k\varepsilon_2 - Y \sin k(l + \varepsilon_1 - \varepsilon_2)]^2}; \quad (2.30)$$

(конічний рупор)

$$\alpha = \frac{X}{[X \frac{k}{v} \sin vl]^2 + [\cos vl + \frac{n}{2v} \sin vl - Y \frac{k}{v} \sin vl]^2}; \quad (2.31)$$

(експоненційний рупор, якщо $\omega < \frac{nc}{2}$)

$$\alpha = \frac{X}{\left[X \frac{k}{v} \operatorname{sh} vl\right]^2 + \left[\operatorname{ch} vl + \frac{n}{2v} \operatorname{sh} vl - Y \frac{k}{v} \operatorname{sh} vl\right]^2} ; \quad (2.32)$$

(експоненціальний рупор, $\omega > \frac{nc}{2}$).

Виділимо формулу (2.32): з неї витікає, що для кінцевого експоненціального рупору теорія Вебстера дає на всіх частотах нерівні нулю значення активної складової опору.

При прямуванні частоти до нуля α для всіх рупорів прагне до значення:

$$X \frac{S_1}{S_2} = \frac{k^2 R_2^2}{4} \cdot \frac{\pi R_1^2}{\pi R_2^2} = \frac{k^2 R_1^2}{4},$$

Тобто на гранично низькій частоті мембрана випромінює так, ніби рупора взагалі немає [8].

2.3. Коефіцієнт підсилення рупору

Підставляючи в формулу (2.9) :

$$\frac{P}{P_0} = \lambda \sqrt{\frac{\alpha \gamma}{\pi S_1}}$$

вираз (2.28) для α , отримаємо:

$$\frac{P}{P_0} = \lambda \sqrt{\frac{X \cdot \frac{\gamma}{\pi S_2}}{(f \chi X)^2 + (a + f \chi Y)^2}}. \quad (2.33)$$

На НЧ, коли $kR_2 < 1$ (R_2 - радіус широкого кінця), можна прийняти для рупорів всіх видів $X = \frac{k^2 R_2^2}{4}$ і повну відсутність направленості: $\gamma = 1$.

Підставляючи в (2.33), знаходимо:

$$\frac{P}{P_0} = \frac{1}{\sqrt{(f \chi X)^2 + (a + f \chi Y)^2}}. \quad (2.34)$$

Вираз (2.34) співпадає з приведеною у Стюарта [10] і отриманою цілком іншим шляхом формулою, яка в наших позначеннях має вигляд:

$$\left| \frac{P}{P_0} \right| = \left| \frac{1}{a - i\chi f(X + iY)} \right|.$$

З формули (2.9) слідує, що коефіцієнт підсилення тиску при прийомі для деякого напрямку пропорційний квадратному кореню з коефіцієнта концентрації потужності, що була випромінена, для цього напрямку.

Інтенсивність на осі мембрани, радіус якої R_2 та амплітуда швидкості ξ ,

$$J = \rho c S \frac{\xi^2}{2} \cdot \frac{\pi R_2^2}{\lambda^2 r^2}.$$

З іншої сторони, повна потужність, яка випромінюється мембраною:

$$W = \rho c S \frac{\xi^2}{2} \left[1 - \frac{J_1(2kR_2)}{kR_2} \right],$$

звідки:

$$\gamma = \frac{4\pi r^2 J}{W} = \frac{4\pi^2 R_2^2}{\lambda^2 \left[1 - \frac{J_1(2kR_2)}{kR_2} \right]}. \quad (2.35)$$

Коефіцієнт підсилення тиску параболічного рупору для звуку, що розповсюджується вздовж осі, можна виразити:

$$\frac{P}{P_0} = \lambda \sqrt{\frac{\alpha \gamma}{\pi S_1}} = 2 \frac{R_2}{R_1} \sqrt{\frac{\alpha}{1 - \frac{J_1(2kR_2)}{kR_2}}}. \quad (2.36)$$

Коефіцієнт підсилення для напрямку, який утворює з віссю кут ϑ , знайдеться множенням цієї величини на множник:

$$\frac{2J_1(kR_2 \sin \vartheta)}{kR_2 \sin \vartheta}, \quad (2.37)$$

який виражає ХН.

Для кінчного рупору можна прийняти, що фронт хвилі в широкому кінці є відрізком сфери з центром у вершині конусу, і потужність, яка випромінюється, розподіляється у просторі так, якби вони була випромінена таким відрізком сфери.

Інтенсивність по осі у такому випадку:

$$J = \rho c S \frac{\xi^2}{2} \cdot \frac{\sin^2 \frac{kx_0}{2}}{\pi \sin^2 \frac{\mathcal{G}_0}{2}}$$

де S - поверхня відрізка сфери, $x_0 = R_2 \operatorname{tg} \frac{\mathcal{G}_0}{2}$ - його висота, R_2 - радіус широкого кінця рупору, \mathcal{G}_0 - половинний кут при вершині.

Потужність, що була випромінена, обчислюємо за формулою:

$$W = \rho c S \frac{\xi^2}{2} \left[1 - \frac{J_1(2kR_2)}{kR_2} \right].$$

Для невеликої частини сфери використання цієї формули, що виражає випромінювання плоскої поршневої мембрани, не внесе помітної похибки.

Отже:

$$\gamma = \frac{4\pi r^2 J}{W} = \frac{4 \sin^2 \frac{kx_0}{2}}{\sin^2 \frac{\mathcal{G}_0}{2} \left[1 - \frac{J_1(2kR_2)}{kR_2} \right]}. \quad (2.38)$$

Підставляючи у (2.9), знайдемо:

$$\frac{P}{P_0} = 2\lambda \frac{\sin \frac{kx_0}{2}}{\pi R_1 \sin \frac{\mathcal{G}_0}{2}} \sqrt{\frac{\alpha}{1 - \frac{J_1(2kR_2)}{kR_2}}} = 2\lambda \frac{\sin\left(\frac{kR_2}{2} \operatorname{tg} \frac{\mathcal{G}_0}{2}\right)}{\pi R_1 \sin \frac{\mathcal{G}_0}{2}} \sqrt{\frac{\alpha}{1 - \frac{J_1(2kR_2)}{kR_2}}}. \quad (2.39)$$

Коефіцієнт підсилення для напрямку, що утворює кут \mathcal{G} з віссю, можна знайти множенням (2.39) на:

$$\frac{1}{\cos \mathcal{G}} \frac{U_1\left(2kx_0, \cos \mathcal{G} \frac{\sin \mathcal{G}}{\sin \mathcal{G}_0}\right) + iU_2\left(2kx_0, \cos \mathcal{G} \frac{\sin \mathcal{G}}{\sin \mathcal{G}_0}\right)}{\sin kx_0 + i(1 - \cos kx_0)}, \quad (2.40)$$

де U_1 та U_2 - функції Ломеля. Для зазвичай використовуваних рупорів $\sin \mathcal{G}_0 \approx \mathcal{G}_0$. Якщо далі можна покласти $\sin\left(\frac{kx_0}{2}\right) = \sin\left(\frac{kR_2}{2} \operatorname{tg} \frac{\mathcal{G}_0}{2}\right) \approx \frac{kR_2}{2} \operatorname{tg} \frac{\mathcal{G}_0}{2}$, то формула (2.39) приходить до вигляду (2.36) і, відповідно, ХН до (2.37). Заміна $\sin\left(\frac{kR_2}{2} \operatorname{tg} \frac{\mathcal{G}_0}{2}\right)$ його аргументом допустима, коли:

$$\frac{kR_2}{2} \operatorname{tg} \frac{\vartheta_2}{2} < \frac{\pi}{6} \text{ або } kR_2 t < \frac{\pi}{3 \operatorname{tg} \frac{\vartheta_0}{2}} \approx \frac{2l}{R_2} \quad (l - \text{довжина рупору}).$$

В той час як для параболічного рупору коефіцієнт підсилення з ростом частоти збільшується, асимптотично наближуючись до $2 \frac{R_2}{R_1}$, коефіцієнт підсилення конічного рупору, пройшовши через максимум, прагне до нуля з наступним збільшенням частоти, як видно з формули (2.39), де при $\lambda \rightarrow 0$ всі інші множники залишаються кінцевими.

Це пов'язане з тим, що просторовий кут, в якому концентрується все випромінювання, може зі збільшенням частоти для поршневої мембрани стати дуже маленьким, а для відрізка сфери він не може бути меншим просторового кута відрізка сфери.

На тих частотах, де направленість рупору в основному така сама, як у поршневої мембрани, радіус якої дорівнює радіусу широкого кінця (орієнтовно за співставленням з конічним рупором, при $kR_2 < \frac{2l}{R_2}$), можна використовувати (2.36) і (2.37).

На рис 2.1 представлені частотні характеристики підсилення конічного та експоненціального рупорів, довжина яких складає 87,5см, радіус вузького кінця 5см, а широкого - 30см. Криві розраховані за формулами (2.36) і (2.38). Пунктиром нанесені криві, розраховані за формулами, враховуючи, що a таке ж як і для нескінченних рупорів [8].

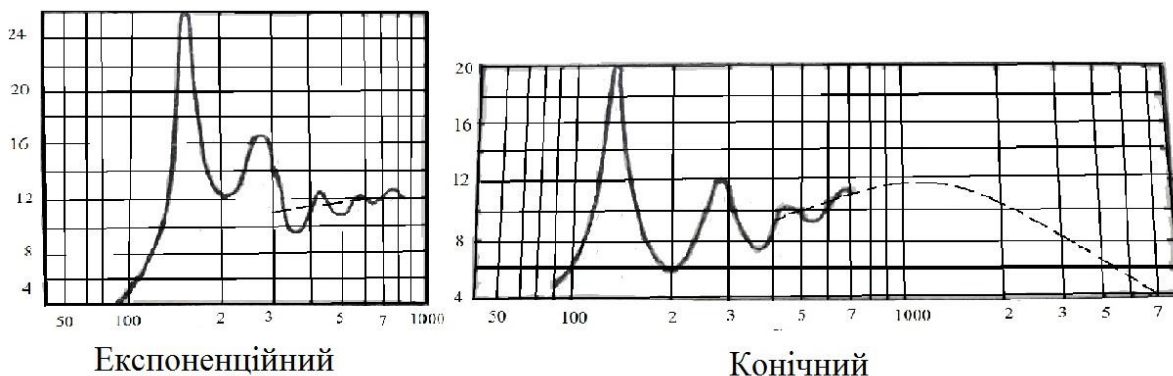


Рис.2.1. Частотна характеристика підсилення експоненційного та конічного рупорів.

2.4. Моделювання рупорів різних форм методом електроакустичних аналогій

В даному розділі для порівняння результатів розрахунків за допомогою хвильової теорії та результатів, отриманих методом електроакустичного моделювання, виконується розрахунок приймального рупора експоненціальної та конічної форми для розмірів, вказаних у п.2.3.

Електроакустична схема рупору представлена на рис.2.2.

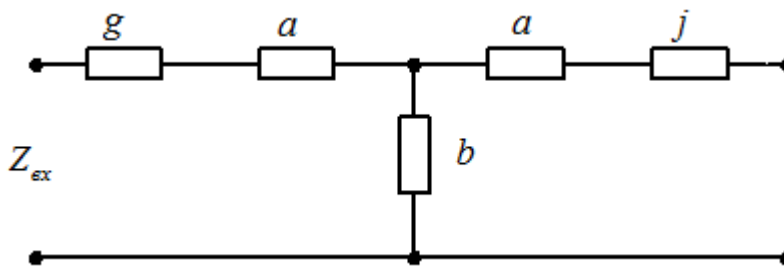


Рис. 2.2. Електроакустична схема рупору

Елементи схеми:

$$\begin{cases} a = Z \cdot th\left(\frac{\gamma l}{2}\right) \\ b = \frac{Z}{sh(\gamma l)} \end{cases}$$

Додаткові елементи в залежності від типу рупора представлені в табл.3:

Таблиця 3. Додаткові елементи в залежності від типу рупору.

Тип рупору	Катеноїдний	Експоненційний	Конічний
g	0	$\frac{Z_0}{h\gamma_0}$	$\frac{Z_0}{x_0\gamma_0}$
j	$\frac{-Z_0}{h\gamma_0} \operatorname{cth} \frac{l}{h}$	$-\frac{Z_0}{h\gamma_0}$	$\frac{Z_0}{(x_0 + l)\gamma_0}$

Параметри рупора:

- Характеристичний імпеданс:

$$Z = Z_0 \cdot \tau, \text{ де } Z_0 = \frac{\rho c}{A_0}; \tau = \frac{\gamma}{\gamma_0} = \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2} :$$

- Критична частота (частота замикання рупору):

$$\omega_0 = \frac{c}{h}, \text{ де } h - \text{ постійна зміни перерізу рупора.}$$

- Коефіцієнт розповсюдження звукової хвилі:

$$\gamma = \gamma_0 \cdot \tau, \gamma_0 = \alpha + \frac{i\omega}{c};$$

$$\text{При відсутності втрат: } \gamma_0 = \frac{i\omega}{c}.$$

2.4.1. Розрахунок елементів електроакустичної схеми експоненційного рупору

Елементи електроакустичної схеми:

$$a = Z \cdot th \frac{\gamma l}{2}; b = \frac{Z}{sh(\gamma l)}; g = \frac{z_0}{h\gamma_0}; j = -\frac{z_0}{h\gamma_0}; \text{ де}$$

$$Z = Z_0 \cdot \tau, \text{ де } Z_0 = \frac{\rho c}{A_0}; \tau = \frac{\gamma}{\gamma_0} = \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2} :$$

Знайдемо h:

$$A_l = A_0 \cdot \frac{ch^2 \varepsilon}{ch^2 \left(\frac{l}{h} + \varepsilon \right)}; \quad (2.41)$$

$$\begin{aligned} \frac{A_l}{A_0} &= \frac{ch^2 \varepsilon}{ch^2 \left(\frac{l}{h} + \varepsilon \right)} = \left| ch(x) = \frac{e^x + e^{-x}}{2} \right| = \frac{e^{2\varepsilon} + e^{-2\varepsilon} + 2}{e^{2\varepsilon} \cdot e^{\frac{2l}{h}} + e^{-2\varepsilon} \cdot e^{\frac{2l}{h}} + 2} = \\ &= \frac{e^{2\varepsilon} \cdot [1 + e^{-4\varepsilon} + e^{-2\varepsilon}]}{e^{2\varepsilon} \cdot \left[e^{\frac{2l}{h}} + e^{-4\varepsilon} \cdot e^{\frac{2l}{h}} + e^{\frac{2l}{h}} \right]} = \frac{1}{e^{\frac{2l}{h}}} = e^{-\frac{2l}{h}} \end{aligned}$$

Отримуємо залежність з формули (2.41):

$$A_l = A_0 \cdot e^{-\frac{2l}{h}}$$

Спочатку для розрахунків приймемо залежність зміни перерізу як:

$$A(x) = A_0 \cdot e^{-\frac{x}{h}}$$

Тоді

$$A_l = A_0 \cdot e^{-\frac{l}{h}}$$

$$\frac{A_l}{A_0} = e^{-\frac{l}{h}} \rightarrow \frac{A_l}{A_0} = e^{\frac{l}{h}} \rightarrow \ln \frac{A_l}{A_0} = \frac{l}{h};$$

$$A_0 = \pi \cdot R_0^2;$$

$$A_l = \pi \cdot R_l^2;$$

Отже постійна зміни перерізу рупору буде дорівнювати :

$$h = \frac{l}{\ln \frac{A_l}{A_0}};$$

Підставивши у $th \frac{\gamma l}{2}$ коефіцієнт розповсюдження звукової хвилі

$$\gamma = \gamma_0 \cdot \tau; \gamma_0 = \alpha + i \frac{\omega}{c} \Big|_{\alpha=0} = i \frac{\omega}{c};$$

Отримаємо:

$$th \frac{\gamma l}{2} = th \left\{ \left(i \frac{\omega l}{2c} \right) \cdot \tau \right\} = i \cdot tg \left\{ \left(\frac{\omega l}{2c} \right) \cdot \tau \right\};$$

Отже елементи електроакустичної схеми експоненціального рупору будуть мати наступний вигляд:

$$a = i \cdot \frac{\rho c}{A_0} \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega} \right)^2} \cdot tg \left\{ \left(\frac{\omega l}{2c} \right) \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega} \right)^2} \right\}; \quad (2.42)$$

$$b = \frac{\frac{\rho c}{A_0} \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}}{i \cdot \sin \left\{ \left(\frac{\omega l}{c} \right) \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega} \right)^2} \right\}}; \quad (2.43)$$

$$g = \frac{z_0}{h \gamma_0}; \quad (2.44)$$

$$j = -\frac{z_0}{h \gamma_0}; \quad (2.45)$$

2.4.2. Розрахунок елементів електроакустичної схеми кінцевого рупору

$$A(x) = \frac{A_0 ch^2(\varepsilon)}{ch^2\left(\varepsilon + \frac{x}{h}\right)}$$

$$\varepsilon = \frac{x_0}{h} - j \frac{\pi}{2}$$

$$\begin{aligned} ch\left(\frac{x_0}{h} - j \frac{\pi}{2}\right) &= ch\left(\frac{x_0}{h}\right) \cdot ch\left(j \frac{\pi}{2}\right) - sh\left(\frac{x_0}{h}\right) \cdot sh\left(j \frac{\pi}{2}\right) = \\ &= ch\left(\frac{x_0}{h}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) - sh\left(\frac{x_0}{h}\right) \cdot i \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) = -i \cdot sh\left(\frac{x_0}{h}\right) = -\sin\left(i \cdot \frac{x_0}{h}\right); \end{aligned}$$

$$ch\left(\frac{x_0}{h} + \varepsilon\right) = ch\left(\frac{x + x_0}{h} + \varepsilon\right) = -i \cdot sh\left(\frac{x + x_0}{h}\right) = -\sin\left(i \cdot \frac{x + x_0}{h}\right);$$

$$\frac{ch^2(\varepsilon)}{ch^2(\varepsilon + \frac{x}{h})} \bigg| = \left(\frac{sh(\frac{x_0}{h})}{sh(\frac{x+x_0}{h})} \right) \bigg|_{h \rightarrow \infty} = \left[\frac{\frac{x_0}{h} + \frac{x_0^3}{h^3 \cdot 3!}}{\frac{x+x_0}{h} + \frac{(x+x_0)^2}{h^3 \cdot 3!}} \right]$$

$$A_l = A_0 \cdot \frac{x_0^2}{(x_l + x_0)^2}$$

Вираз для зміни перерізу рупора через лінійний закон зменшення радіусу:

$$r(x) = r_0 - (x - x_0) \cdot tg(\beta);$$

$$tg(\beta) = \frac{r_0 - r_l}{x_l - x_0};$$

$$h = \frac{x_l - x_0}{r_0 - r_l};$$

$$r(x) = r_0 - \frac{(x_l - x_0) \cdot (x - x_0)}{r_0 - r_l};$$

$$1) x = x_0; \Rightarrow r(x_0) = r_0;$$

$$2) x = x_l; \Rightarrow r(x_l) = r_l;$$

$$r(x) = \frac{x - x_0}{h}; \quad \text{де} \quad h = \frac{x_l - x_0}{r_0 - r_l} = \frac{l}{r_0 - r_l};$$

Для площі: $A = \pi \cdot r^2$;

$$r^2(x) = r_0^2 \left[1 - \frac{x - x_0}{h \cdot r_0} \right]^2;$$

$$A_l = A_0 \left[1 - \frac{x - x_0}{h \cdot r_0} \right]^2;$$

$$a = Z \cdot th\left(\frac{\gamma l}{2}\right); z = z_0 \tau; z_0 = \frac{\rho c}{A_0}; \tau = \frac{\gamma}{\gamma_0} = \left(1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2\right)^{1/2}$$

$h \rightarrow \infty$, в кінці рупорі відсутня частота запирання, оскільки зворотнє поле представляє собою конус, вирізаний із сферичної хвилі:

$$\omega_0 = \frac{c}{h} = 0$$

$$\tau = 1$$

$$Z_0 = Z$$

$$A_0 = \pi r_0^2;$$

$$th \frac{\gamma l}{2} = th \left\{ \left(i \frac{\omega l}{2c} \right) \cdot \tau \right\} = i \cdot tg \left(\frac{\omega l}{2c} \right);$$

$$a = i \cdot Z_0 \cdot tg \left(\frac{\omega l}{2c} \right); \quad (2.46)$$

$$sh(\gamma l) = sh \left(i \frac{\omega}{c} l \right);$$

$$b = \frac{Z_0}{i \cdot \sin \left(\frac{\omega l}{c} \right)}; \quad (2.47)$$

$$g = \frac{Z_0}{x_0 \gamma_0} \quad (2.48)$$

$$X_0 = \frac{r_0}{tg(\beta)}; \quad tg(\beta) = \frac{r_0 - r_l}{x_l - x_0}; \quad \gamma_0 = i \frac{\omega}{c};$$

$$g = \frac{Z_0}{i \frac{\omega}{c}}$$

$$j = -\frac{z_0}{(x_0 + l)\gamma_0} = -\frac{z_0}{(1 + l)\gamma_0}; \quad (2.49)$$

2.4.3. Розрахунок елементів електроакустичної схеми катеноїдного рупору

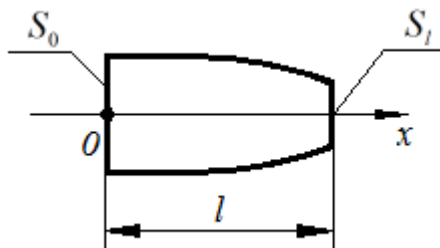


Рис. 2.3. Схематичне зображення катеноїдного рупору

Площа рупору змінюється за законом:

$$S(x) = \frac{S_0}{ch^2\left(\frac{x}{h}\right)},$$

де h - постійна зміни перерізу рупора:

$$h = \frac{l}{\operatorname{arcch} \sqrt{\frac{S_0}{S_1}}}.$$

Значення опорів для системи без втрат можна знайти з виразів :

$$g = 0:$$

$$a = Z \cdot th \frac{\gamma l}{2}, \text{ де } Z = Z_0 \cdot \tau = \frac{\rho c}{S_0} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}$$

$$\gamma l = \gamma_0 \tau l = i \frac{\omega}{c} \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2} \cdot l,$$

При уявних значеннях аргументу виконаємо перехід від гіперболічних тригонометричних функцій:

$$th\left(i \frac{\omega l}{2c} \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}\right) = i \cdot tg\left(\frac{\omega l}{2c} \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}\right).$$

$$a = i \frac{\rho c}{S_0} \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2} \cdot tg\left(\frac{\omega l}{2c} \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}\right), \quad (2.50)$$

$$b = \frac{Z}{sh\gamma l} = \frac{(\rho c / S_0) \sqrt{1 - (\frac{\omega_0}{\omega})^2}}{i \sin\left(\frac{\omega l}{2c} \sqrt{1 - (\frac{\omega_0}{\omega})^2}\right)}, \quad (2.51)$$

$$j = -\frac{Z_0}{h\gamma_0} cth \frac{l}{h} = -\frac{\rho c / S_0}{i \frac{\omega}{c} h} \cdot cth \frac{l}{h}. \quad (2.52)$$

Побудуємо графіки частотної характеристики підсилення експоненційного та катеноїдного рупорів з розмірами, запропонованими Гутінім в розділі 2.3..

$$l = 0.875 \text{ м}, R_0 = 0.3 \text{ м}, R_l = 0.05 \text{ м};$$

$$S_0 = \pi \cdot R_0^2 = \pi \cdot 0.3^2 = 0.28 \text{ м}^2$$

$$S_l = \pi \cdot R_l^2 = \pi \cdot 0.05^2 = 0.0078 \text{ м}^2.$$

Розрахуємо елементи схеми для експоненційного рупору, підставивши дані розміри..

$$h = \frac{l}{\ln \frac{S_0}{S_l}} = \frac{0.875}{\ln \frac{0.28}{0.008}} = 0.27;$$

$$\omega_0 = \frac{c}{h} = \frac{350}{0.27} = 1458;$$

$$Z_0 = \frac{\rho c}{S_0} = \frac{1.27 \cdot 350}{0.28} = 1566.4;$$

Елементи схеми будуть виглядати наступним чином:

$$a = i \cdot 1566.4 \cdot \left(1 - \left(\frac{714.3}{\omega}\right)^2\right)^{1/2} \cdot tg(1.3 \cdot 10^{-3} \omega \left(1 - \left(\frac{714.3}{\omega}\right)^2\right)^{1/2});$$

$$b = \frac{z}{sh(\gamma l)} = \frac{1566.4 \cdot (1 - (\frac{714.3}{\omega})^2)^{1/2}}{i \cdot \sin(3.6 \cdot 10^{-3} \cdot \omega (1 - (\frac{714.3}{\omega})^2)^{1/2})};$$

$$g = \frac{z_0}{h\gamma_0} = \frac{1566.4}{0.49 \frac{i\omega}{350}} = \frac{1.1 \cdot 10^6}{i\omega};$$

$$j = -\frac{z_0}{h\gamma_0} = -\frac{1566.4}{0.49 \frac{i\omega}{350}} = -\frac{1.1 \cdot 10^6}{i\omega}.$$

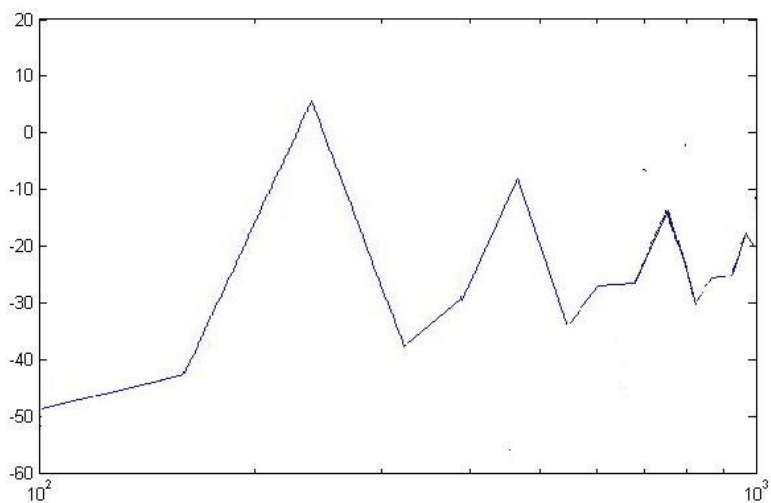


Рис. 2.4 Частотна залежність коефіцієнта підсилення за потужністю експоненційного рупору

Для катеноїдного рупору $h \rightarrow \infty$. В кінцічному рупорі відсутня частота запирання, оскільки внутрішнє поле обмежене конусом, вирізаним із сферичної хвилі. В цьому разі параметри рупору набувають значень:

$$\omega_0 = \frac{c}{h} = 0 \rightarrow \tau = 1 \rightarrow Z_0 = Z;$$

$$a = i \cdot 1566.4 \cdot \tan(1.3 \cdot 10^{-3})$$

$$b = \frac{z}{sh(\gamma l)} = \frac{1566.4}{i \cdot \sin(2.6 \cdot 10^{-3} \cdot \omega)};$$

$$sh(\gamma l) = sh(i \frac{\omega}{c} l) = i \cdot \sin(0.0026 \cdot \omega)$$

$$g = \frac{z_0}{x_0 \gamma_0}; \quad X_0 = \frac{r_0}{\operatorname{tg}(\beta)};$$

$$\operatorname{tg}(\beta) = \frac{r_0 - r_l}{x_l - x_0} = \frac{0.25}{0.875} = 0.29 \rightarrow X_0 = \frac{0.8}{0.29} \approx 1; \gamma_0 = i \frac{\omega}{350};$$

$$g = \frac{1566.4}{i \frac{\omega}{350}} = \frac{1}{i \omega 0.2 \cdot 10^{-5}};$$

$$j = -\frac{z_0}{(x_0 + l) \gamma_0} = -\frac{1}{(1 + 0.875) i \omega 0.2 \cdot 10^{-5}} = -\frac{1}{i \omega 0.38 \cdot 10^{-5}}.$$

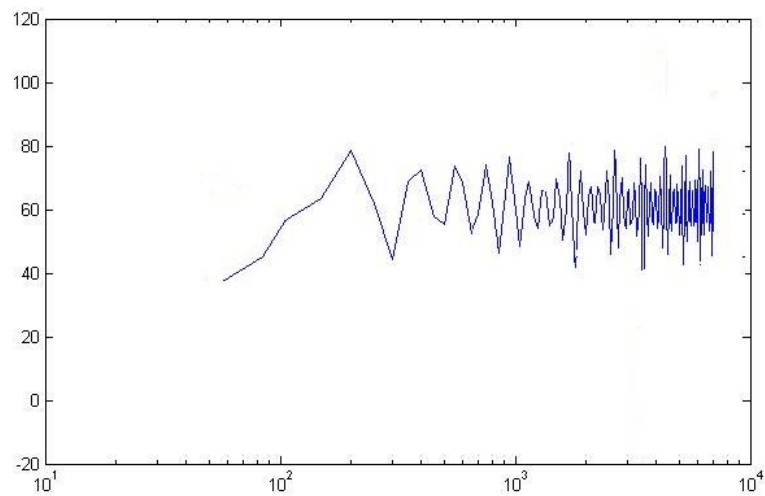


Рис.2.5. Частотна залежність коефіцієнта підсилення за потужністю катеноїдного рупору

Як видно з графіків на рис 2.4 та 2.5. коефіцієнт підсилення має максимальні значення на частоті 200Гц, що близько до результатів, приведених Гутіним [8].

Так як форма експоненційного ка катеноїдного рупорів більше кінчного нагадує форму вушної раковини, в подвльшому будемо розглядати їх.

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ЗОВНІШНЬОГО ВУХА ЗА ДОПОМОГОЮ РУПОРІВ ТА ТРУБ

Схематичне зображення зовнішнього вуха людини з основними вказаними розмірами представлено на рис.3.1, де l_p -довжина чашоподібного заглиблення вушної раковини, l_{mp} -довжина зовнішнього слухового каналу, R_o -вхідний радіус заглиблення вушної раковини, R_i -вихідний радіус заглиблення вушної раковини, який дорівнює радіусу слухового каналу .

Для математичного моделювання таку систему найпростіше представити у вигляді поєднання приймального рупору та вузької труби із жорсткими стінками відповідних розмірів.

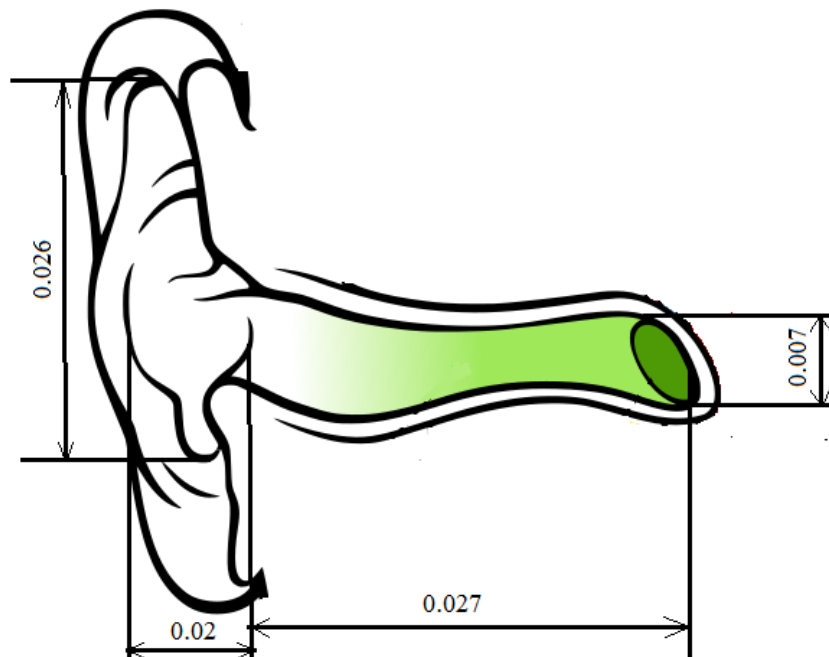


Рис.3.1 Зображення зовнішнього вуха

($l_p = 0.02\text{м.}; l_{mp} = 0.27; R_o = 0.013\text{м.}; R_i = 0.0035\text{м.}$)

3.1. Розрахунок приймального рупору, що відповідає заглибленню вушної раковини

Розглянемо результати моделювання для рупорів різних форм з площею вхідного і вихідного отвору:

$$S_0 = \pi \cdot R_0^2 = \pi \cdot 0.013^2 = 0.0005 \text{ м}^2;$$

$$S_l = \pi \cdot R_l^2 = \pi \cdot 0.0035^2 = 0.000039 \text{ м}^2.$$

3.1.1. Експоненційний рупор

Визначимо характерні параметри рупора та опори його еквівалентної схеми:

$$h = \frac{l}{\ln \frac{S_0}{S_l}} = \frac{0,02}{\ln \frac{0.0005}{0.000039}} = 0.008;$$

$$\omega_0 = \frac{c}{h} = \frac{350}{0.004} = 87500;$$

$$Z_0 = \frac{\rho c}{S_0} = \frac{1.27 \cdot 350}{0.0005} = 889;$$

$$a = i \cdot 889 \cdot \left(1 - \left(\frac{87500}{\omega}\right)^2\right)^{1/2} \cdot \text{tg}(2.86 \cdot 10^{-5} \omega \left(1 - \left(\frac{87500}{\omega}\right)^2\right)^{1/2});$$

$$b = \frac{z}{\text{sh}(\gamma l)} = \frac{889 \cdot \left(1 - \left(\frac{87500}{\omega}\right)^2\right)^{1/2}}{i \cdot \sin(5.7 \cdot 10^{-5} \cdot \omega \left(1 - \left(\frac{87500}{\omega}\right)^2\right)^{1/2})};$$

$$g = \frac{z_0}{h \gamma_0} = \frac{889}{0.004 \frac{i \omega}{350}} = \frac{222.2}{i \omega};$$

$$j = -\frac{z_0}{h \gamma_0} = -\frac{889}{0.004 \frac{i \omega}{350}} = -\frac{222.2}{i \omega}.$$

3.1.2. Катеноїдний рупор

Параметри рупору набувають вигляду:

$$h = \frac{l}{\operatorname{arcch} \sqrt{\frac{S_0}{S_l}}} = \frac{0.02}{\operatorname{arcch} \sqrt{\frac{0.013}{0.0035}}} = 0.0096;$$

$$\omega_0 = \frac{c}{h} = \frac{350}{0.0096} = 36458;$$

$$g = 0;$$

$$a = i \cdot 889 \cdot \left(1 - \left(\frac{36458}{\omega}\right)^2\right)^{1/2} \cdot \operatorname{tg}(2.86 \cdot 10^{-5} \omega \left(1 - \left(\frac{36458}{\omega}\right)^2\right)^{1/2});$$

$$b = \frac{z}{\operatorname{sh}(\gamma l)} = \frac{889 \cdot \left(1 - \left(\frac{36458}{\omega}\right)^2\right)^{1/2}}{i \cdot \sin(5.7 \cdot 10^{-5} \cdot \omega \left(1 - \left(\frac{36458}{\omega}\right)^2\right)^{1/2})};$$

$$j = -\frac{Z_0}{h\gamma_0} \operatorname{cth} \frac{l}{h} = -\frac{889}{i\omega \cdot 2.74 \cdot 10^{-5}} \cdot \operatorname{cth}(2.1).$$

3.1.3. Конічний рупор

Для такої форми рупору $h \rightarrow \infty$. В конічному рупорі відсутня частота запирання, оскільки внутрішнє поле обмежене конусом, вирізаним із сферичної хвилі. В цьому разі параметри рупору набувають значень:

$$\omega_0 = \frac{c}{h} = 0 \rightarrow \tau = 1 \rightarrow Z_0 = Z;$$

$$a = i \cdot 889 \cdot \tan(2.86 \cdot 10^{-5})$$

$$b = \frac{z}{\operatorname{sh}(\gamma l)} = \frac{889}{i \cdot \sin(5.7 \cdot 10^{-5} \cdot \omega)};$$

$$sh(\gamma l) = sh\left(i \frac{\omega}{c} l\right) = i * \sin(0.0026 * \omega)$$

$$g = \frac{z_0}{x_0 \gamma_0}; \quad X_0 = \frac{r_0}{tg(\beta)};$$

$$tg(\beta) = \frac{r_0 - r_l}{x_l - x_0} = \frac{0.0095}{0.02} = 0.475;$$

$$X_0 = 0.027; \quad \gamma_0 = i \frac{\omega}{350};$$

$$g = \frac{889}{i \frac{0.027 \cdot \omega}{350}} = \frac{889}{i \omega 7.7 * 10^{-5}};$$

$$j = -\frac{z_0}{(x_0 + l) \gamma_0} = -\frac{889}{i \omega 1.3 * 10^{-4}};$$

3.2 Вхідний опір рупору

Розрахуємо частотну залежність для вхідного опору експоненційного та катеноїдного рупора для двох ідеальних ситуацій: закритого рупора, коли навантаження дорівнює нескінченності (розрив зовнішнього кола або режим холостої ходи), і відкритого рупора (навантаження дорівнює нулю, що відповідає короткому замиканню електроакустичного кола).

3.2.1. Закритий рупор

Частотна характеристика для закритого рупора експоненційної та катеноїдної форми представлена на рис.3.2 і 3.3.

Особливістю вхідного опору закритого рупора, як і труби, є передування резонансної частоти антирезонансній.

У випадку експоненційного рупора резонансна частота становить 9,4 кГц, а для катеноїдного рупора – 6,7 кГц.

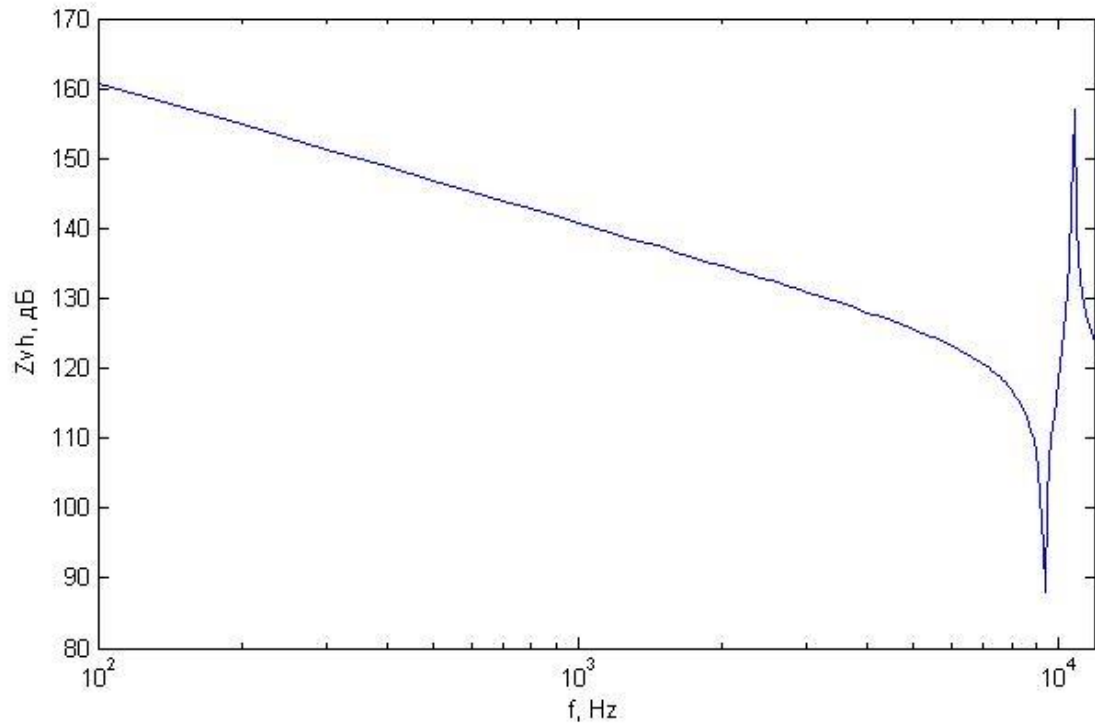


Рис3.2. Частотна залежність вхідного опору закритого експоненційного рупору

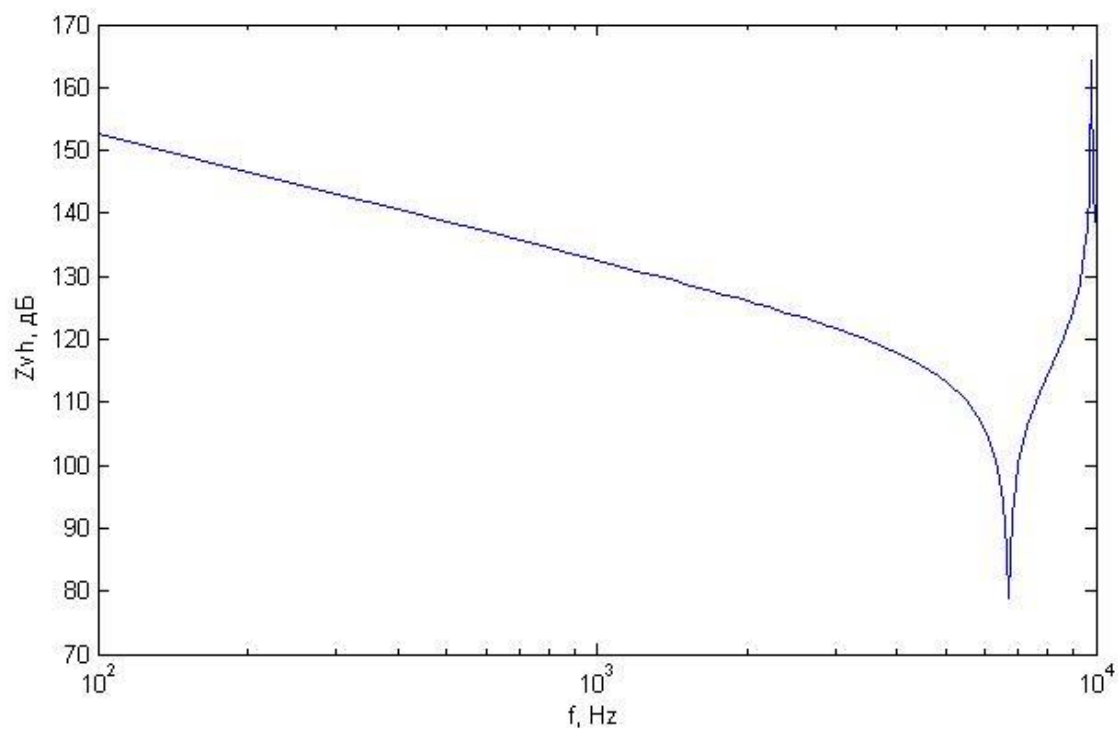


Рис.3.3 Частотна залежність вхідного опору закритого катеноїдного рупору

Частота антирезонансу для експоненційного рупора становить 10,5 кГц., а для катеноїдного 9,8кГц.

3.2.2. Відкритий рупор

Залежність вхідного опору від частоти для відкритого рупора показана на рис.3.3 і 3.4.

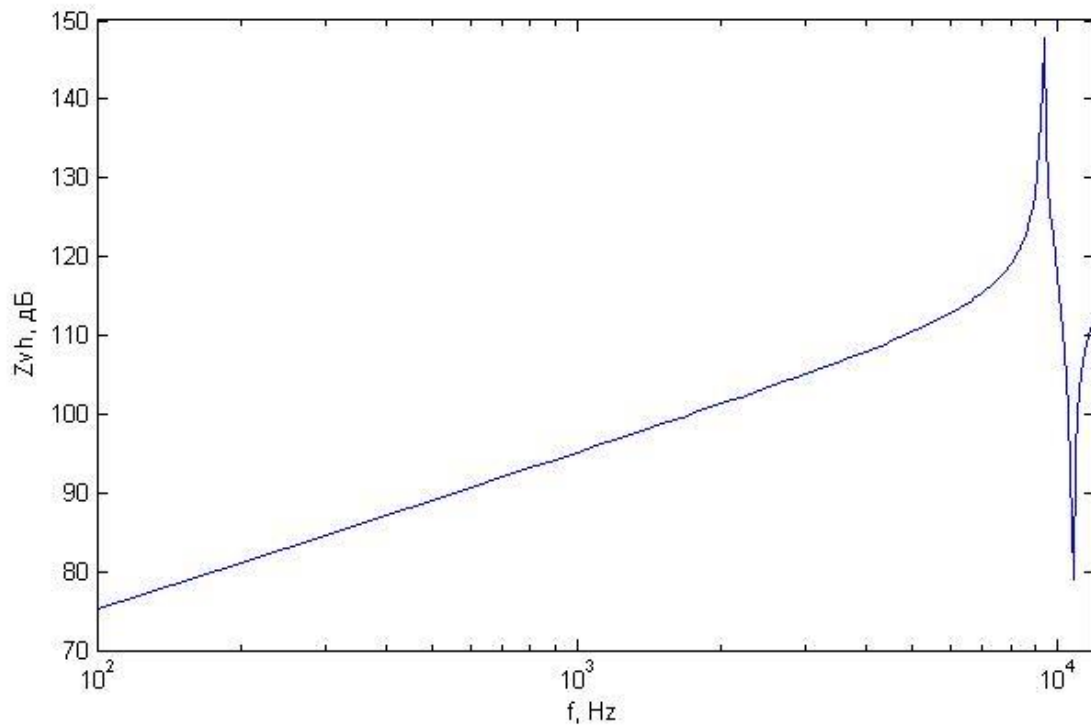


Рис3.4. Частотна залежність вхідного опору відкритого експоненційного рупору

В цьому разі частоті резонансу передуює антирезонанс. Для експоненційного рупора частота резонансу складає приблизно 10,5 кГц, а резонансу – 9 кГц. Для катеноїдного рупора ці значення нижчі і дорівнюють, відповідно, 8,3 кГц і 6,7кГц.

Оскільки, значення частоти резонансу приймального рупора, навантаженого на слуховий канал, буде займати проміжне значення між розглянутими крайніми ситуаціями, то катеноїдна форма рупору більш придатна для моделювання вушної раковини. Отримані при цьому розрахункові дані більше наближуються до експериментальних, за якими частота резонансу вушної раковини складає приблизно 5,5 кГц .

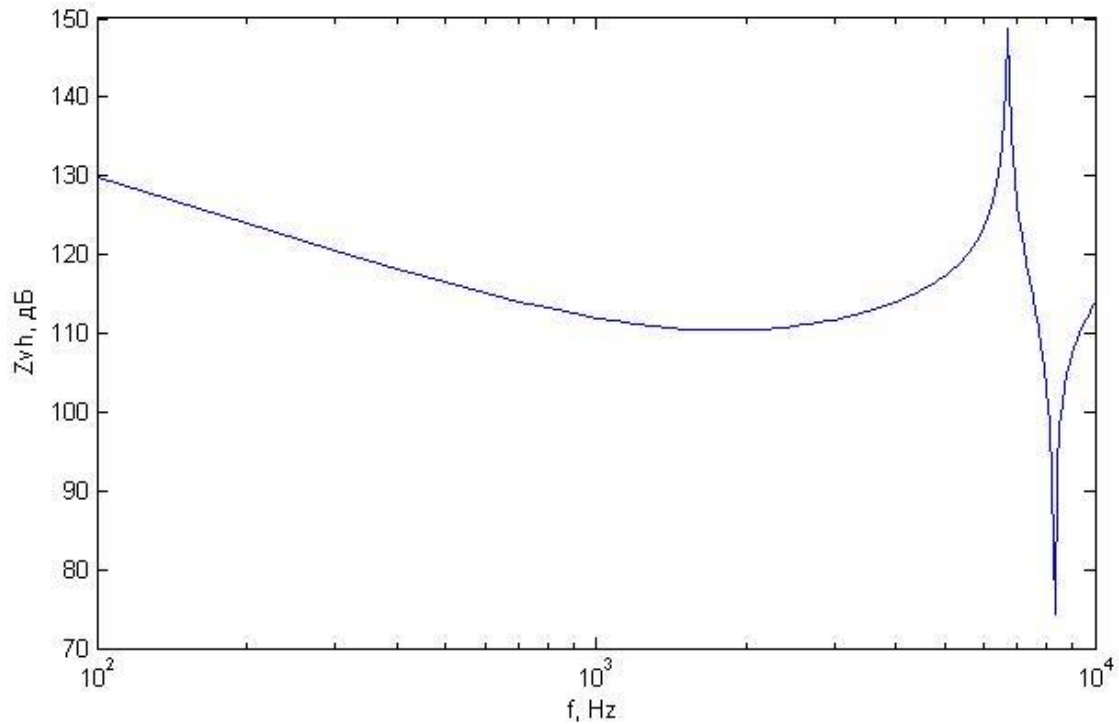


Рис 3.5. Частотна залежність вхідного опору відкритого катеноїдного рупору

Крім того, частота запирання експоненційного рупора складає 6,2 кГц, в той час, як для катеноїдної моделі рупора обмеження діапазону частоти прийому становить приблизно 40 Гц, що більш наближене до діапазону слухового сприйняття звуку.

3.3. Коефіцієнт підсилення рупора

Частотна залежність коефіцієнту підсилення за потужністю для відкритого експоненційного та катеноїдного рупора наведена на рис.3.6 і 3.7.

Частоти, на яких відбувається максимальне підсилення звукової енергії в рупорі, співпадають з частотами резонансів рупорів, що є цілком логічним. Для експоненційного рупору найбільше підсилення відбувається в районі 10кГц, а для катеноїдного в межах 8 – 10 кГц.

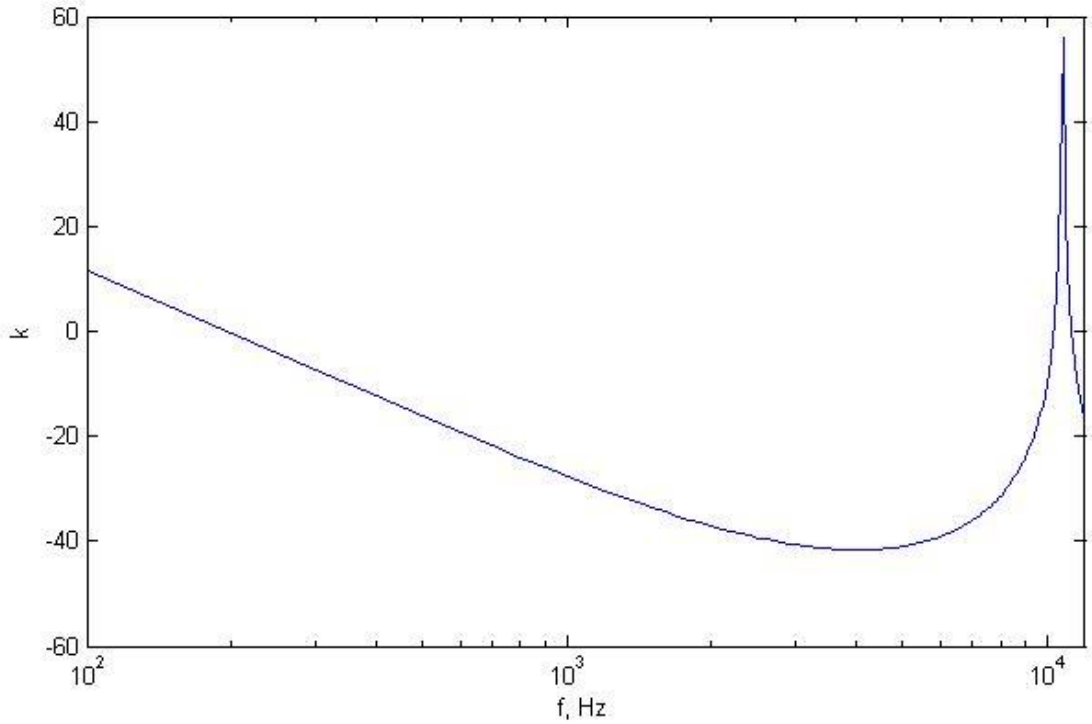


Рис 3.6. Частотна залежність коефіцієнта підсилення за потужністю експоненційного рупору

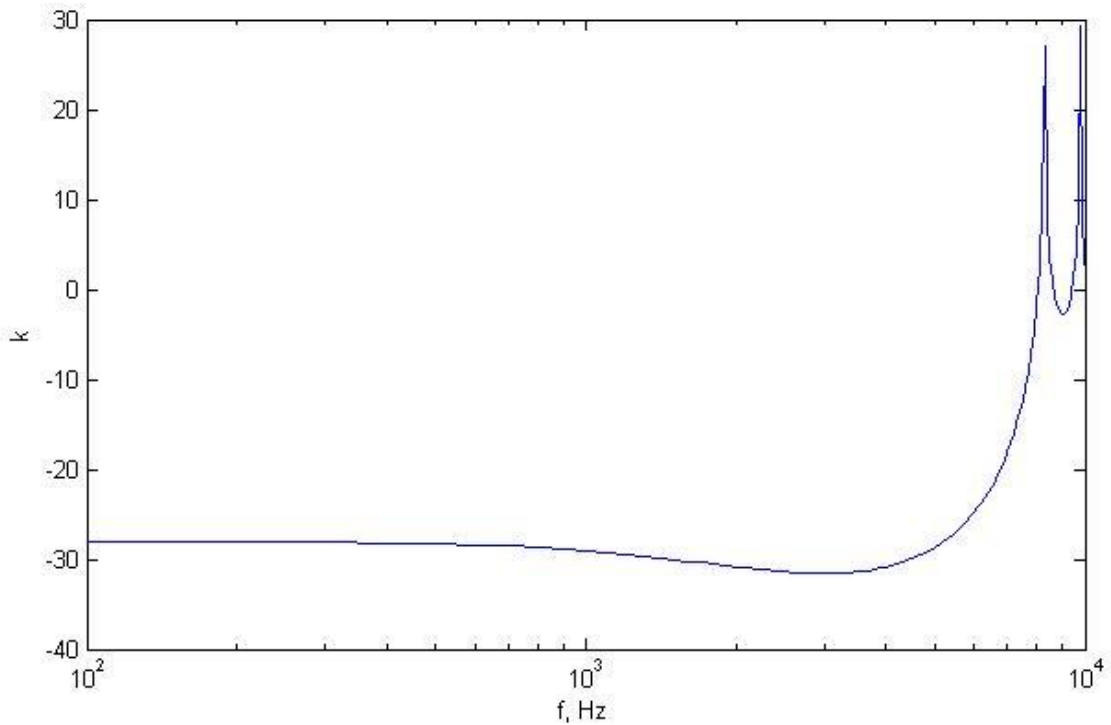


Рис 3.7. Частотна залежність коефіцієнта підсилення за потужністю катеноїдного рупору

3.4. Моделювання зовнішнього слухового каналу у вигляді вузької труби

Представимо зовнішній слуховий канал у вигляді вузької труби з жорсткими стінками. Використаємо модель труби у вигляді Т-подібної схеми [11,12,13] (рис. 3.8).

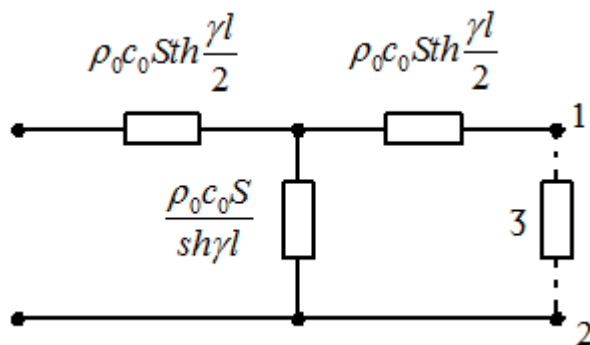


Рис. 3.8. Модель вузької труби

В разі відкритої труби: $z = 0$, 1–2 – з'єднані.

Для закритої труби: $z \rightarrow \infty$, 1–2 розірвані і другою ланкою нехтуємо.

В разі акустичного середовища без втрат $\delta = 0$; $\Rightarrow \gamma = jk$, що призводить до заміни гіперболічних функцій тригонометричними:

$$\begin{cases} th(j \frac{kl}{2}) = i \cdot tg(\frac{kl}{2}), \\ sh(j \cdot kl) = i \cdot \sin(kl). \end{cases} \quad (3.1)$$

Модель закритої труби

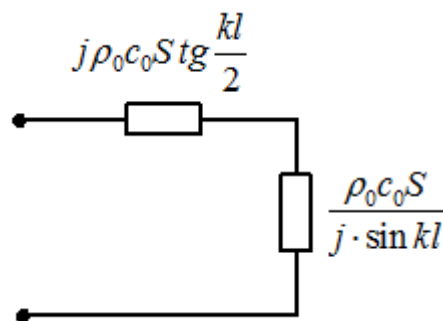


Рис. 3.9. Модель закритої труби

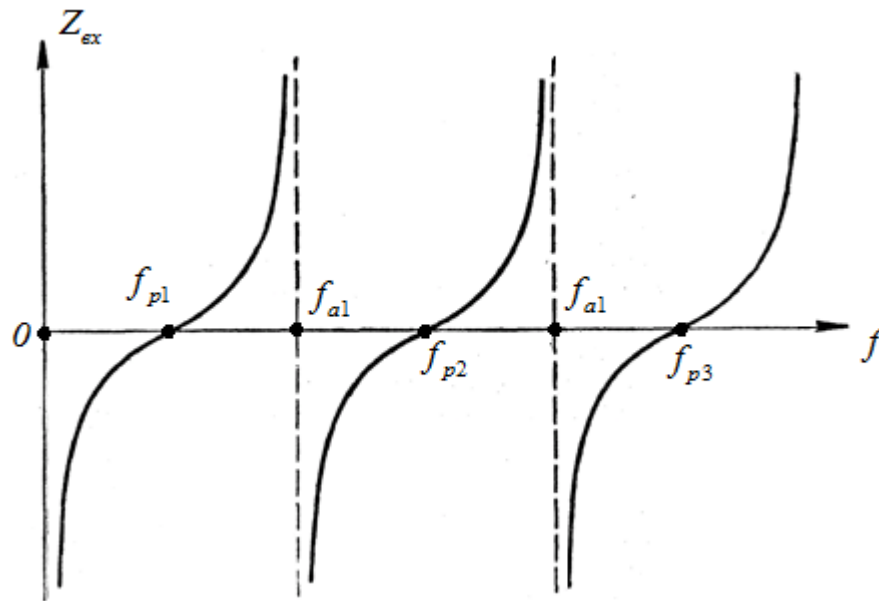


Рис.3.10. Частотна характеристика вхідного опору ідеальної закритої труби

Умова резонансу:

$$j\rho_0 c_0 S \cdot \operatorname{tg} \frac{kl}{2} + \frac{\rho_0 c_0 S}{j \cdot \sin kl} = 0.$$

Тобто,

$$\operatorname{tg} \frac{kl}{2} = \frac{1}{\sin kl},$$

або

$$\sin^2 \frac{kl}{2} = \frac{1}{2};$$

і частоти резонансу знаходяться за формулою:

$$f_{p_n} = (2n + 1)f_{p_1}, n = 0, 1, \dots$$

де $f_{p_1} = \frac{c_0}{4l}$.

В результаті перша частота резонансу та її друга гармоніка дорівнюють:

$$f_{p_1} = 3060 \text{ Гц}, f_{p_2} = 9190 \text{ Гц}.$$

Умова антирезонансу:

$$f_{a_n} = (2n + 1)f_{a_1}, n = 0, 1, \dots, \text{де } f_{a_1} = \frac{c_0}{2l}.$$

Перша частота антирезонансу:

$$f_{a_1} \approx 6130 \text{ Гц.}$$

Модель відкритої труби

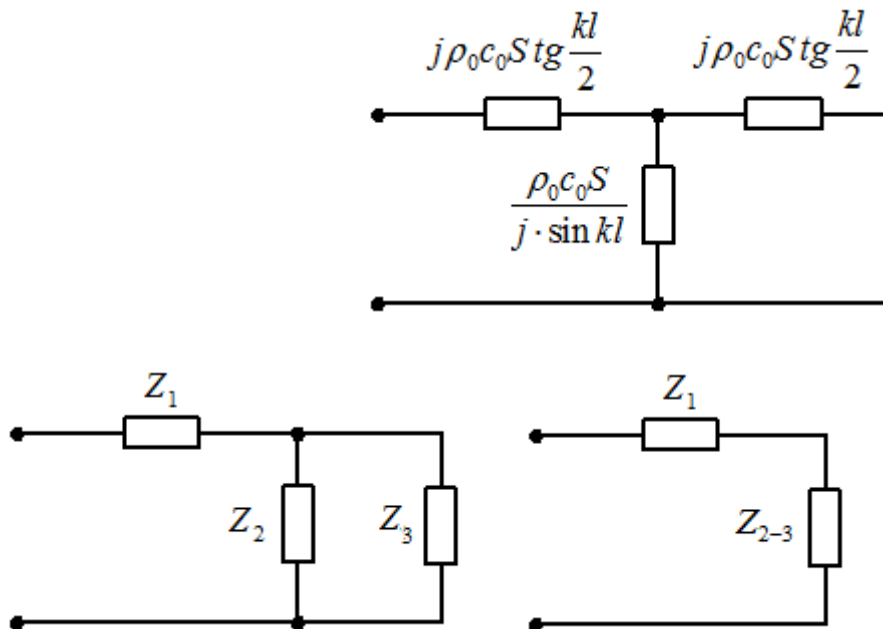


Рис. 3.11. Модель відкритої труби

$$Z_{2-3} = \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} = j\rho_0 c_0 S \frac{\operatorname{tg} \frac{kl}{2}}{1 - 2\sin^2 \frac{kl}{2}}.$$

$$Z_{\Sigma} = Z_1 + Z_{2-3} = j\rho_0 c_0 S \cdot \operatorname{tg} \frac{kl}{2} + j\rho_0 c_0 S \frac{\operatorname{tg} \frac{kl}{2}}{1 - 2\sin^2 \frac{kl}{2}}.$$

Умова резонансу:

- 1) $\operatorname{tg} \frac{kl}{2} = 0$, або $f_{p_2} = \frac{c_0}{l}$, що відповідає другому резонансу.
- 2) $2 - 2\sin^2 \frac{kl}{2} = 0$, тобто $f_{p_1} = \frac{c_0}{2l}$.

Частота першого резонансу: $f_{p_1} = 6130 \text{ Гц.}$

3.4.1. Частотна характеристика зовнішнього слухового каналу

Будемо вважати зовнішній слуховий канал вузькою трубою сталого перерізу з жорсткими стінками. При розрахунках використовувались наступні розміри каналу [12]:

- довжина $27 \cdot 10^{-3}$ м;
- діаметр $7 \cdot 10^{-3}$ м.

Подамо канал Т-подібною схемою (рис. 2.1). Опори знаходяться з виразів (3.1).

Закритий слуховий канал

Розглянемо зовнішній слуховий канал закритий жорсткою перетинкою.

Графік залежності вхідного опору від частоти представлений на рис. 3.12.

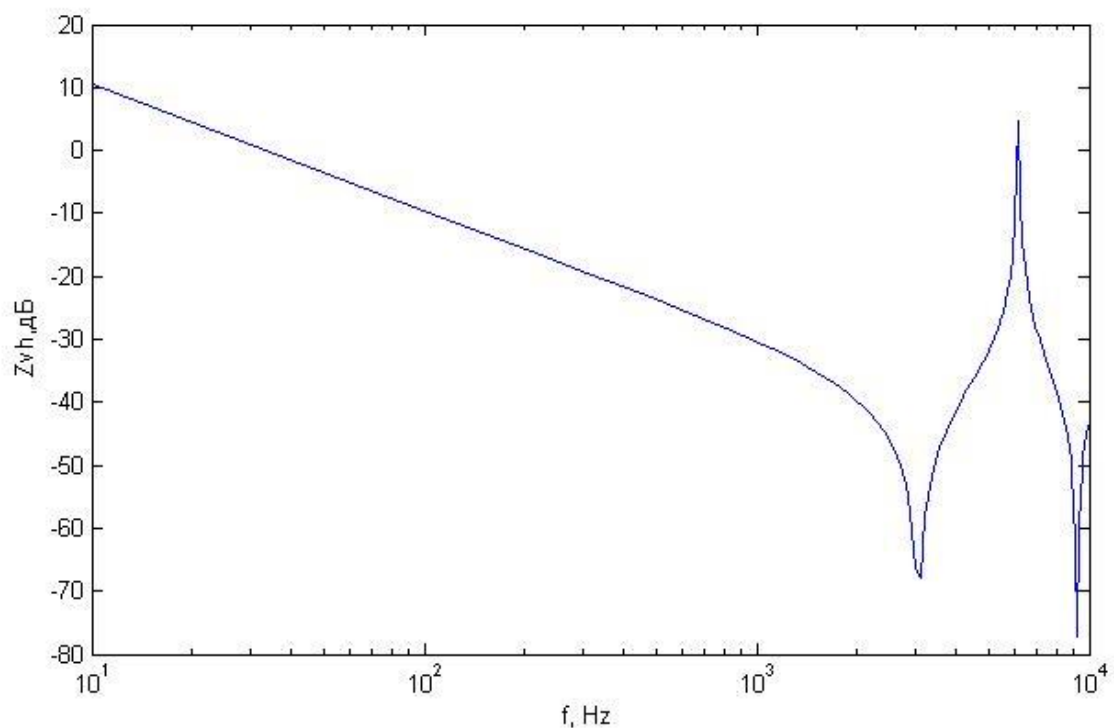


Рис.3.12. Залежність вхідного опору від частоти закритого зовнішнього слухового каналу

Частоти резонансів становить $f_{p1} = 3,1 \cdot 10^3 \text{ Гц}$, $f_{p2} = 9200 \text{ Гц}$, а частота антирезонансу $f_a = 6110 \text{ Гц}$, що відповідає теоретичним значенням $f_{p1} = 3060 \text{ Гц}$, $f_{p2} = 9190 \text{ Гц}$, $f_a = 6130 \text{ Гц}$,

Відкритий слуховий канал

Для відкритого зовнішнього слухового каналу залежність вхідного опору від частоти подано на рис. 3.13.

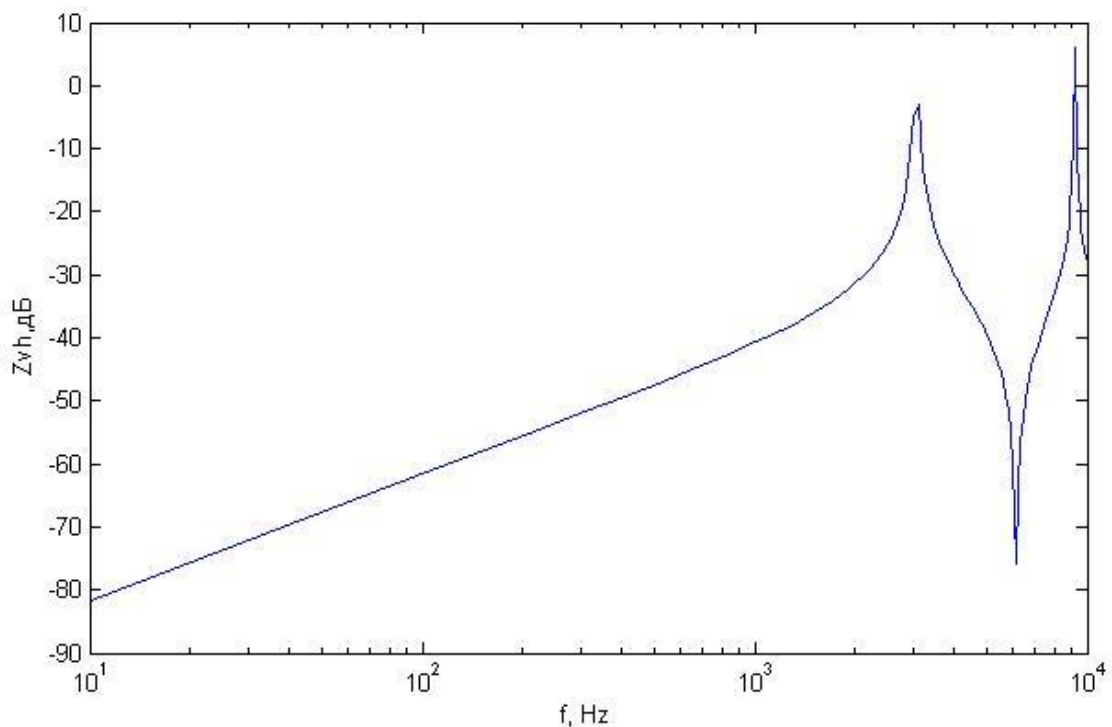


Рис. 3.13. Залежність вхідного опору від частоти відкритого зовнішнього слухового каналу

Частота резонансу становить $f_p = 6110 \text{ Гц}$, а частоти антирезонансів $f_{a1} = 3,1 \cdot 10^3 \text{ Гц}$, $f_{a2} = 9210 \text{ Гц}$, що також відповідає теоретичним значенням ($f_p = 6130 \text{ Гц}$; $f_{a1} = 3060 \text{ Гц}$; $f_{a2} = 9200 \text{ Гц}$).

3.5. Моделювання системи зовнішнього вуха

Система зовнішнього вуха моделюється шляхом поєднання приймального рупора та вузької жорсткої труби.

3.5.1. Вхідний опір

Електроакустична схема поєднання приймального рупора з трубою представлена на рис.3.14.

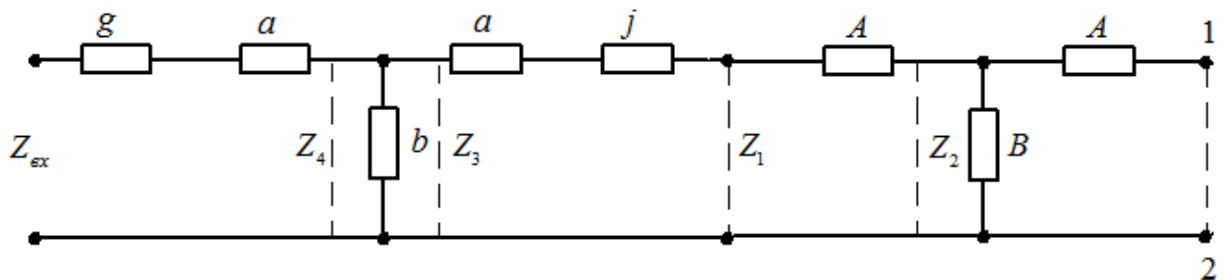


Рис3.14. Електроакустична схема рупора з'єднаного з вузькою трубою

У разі відкритої труби $Z_2 = \frac{A \cdot B}{A + B}$, для відкритої труби $Z_2 = B$.

$$Z_1 = Z_2 + A;$$

$$Z_3 = Z_1 + a + j;$$

$$Z_4 = \frac{b \cdot Z_3}{b + Z_3};$$

$$Z_{ex} = g + a + Z_4;$$

Залежність вхідного опору системи від частоти представлена на рис.3.15-3.18.

Частотна характеристика розраховувалась для експоненційного і катеноїдного рупора для випадків відкритого і закритого слухового каналу.

Частота резонансу системи практично визначається частотою резонансу вушної раковини, і становить в разі експоненційного рупора приблизно 10кГц, а для катеноїдної моделі рупора – 8-9 кГц.

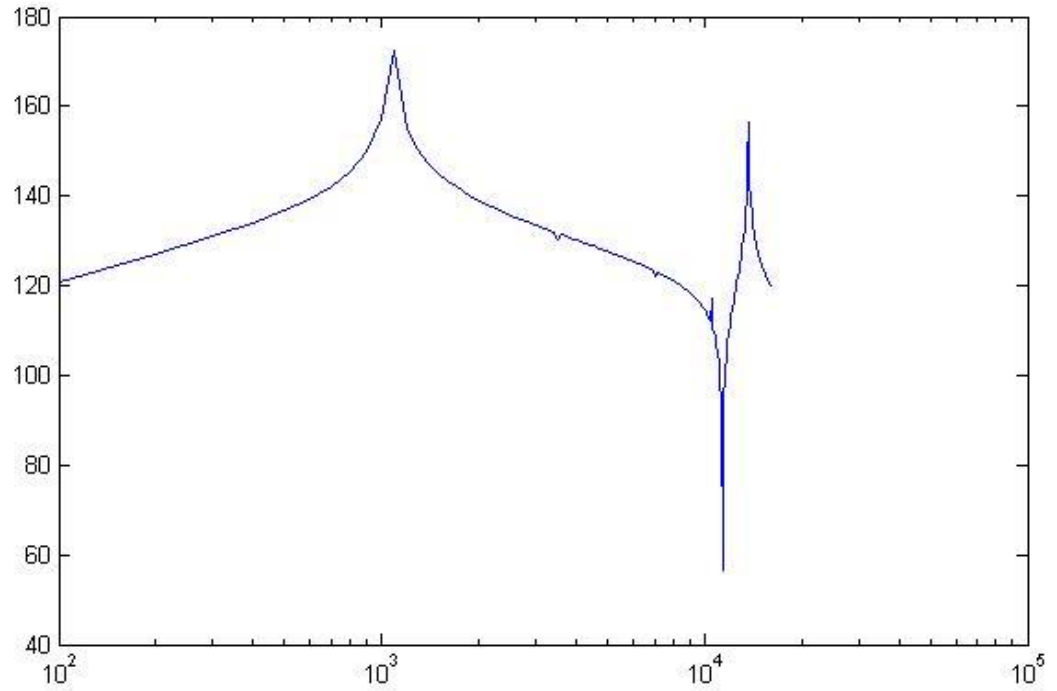


Рис 3.15. Залежність вхідного опору від частоти відкритого зовнішнього слухового каналу з'єднаного з експоненційним рупором

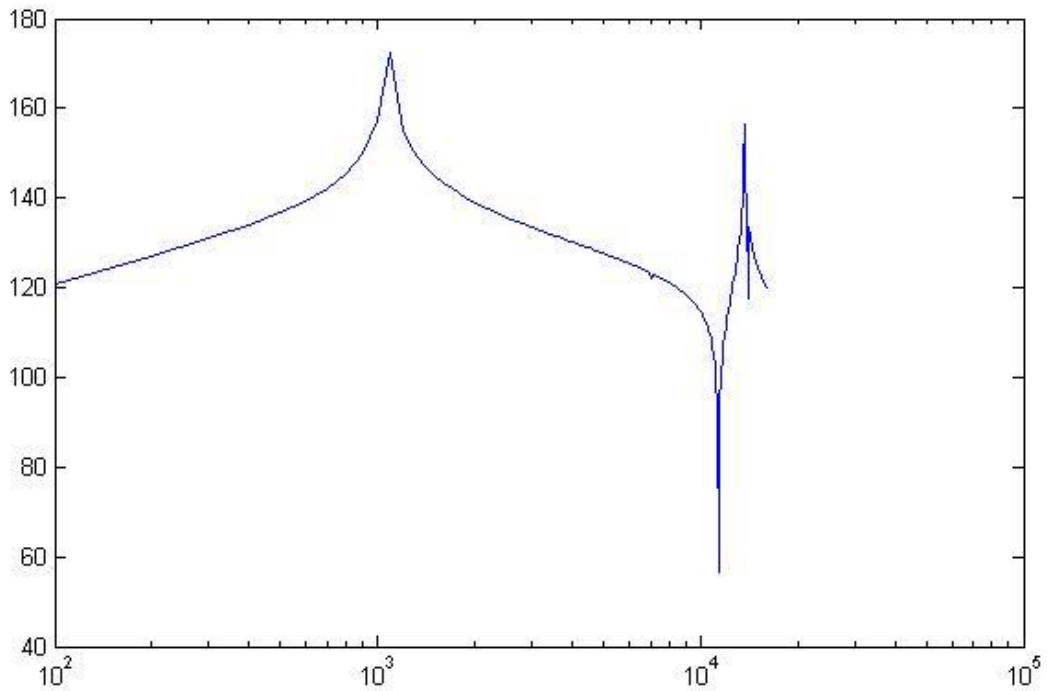


Рис 3.16. Залежність вхідного опору від частоти закритого зовнішнього слухового каналу з'єднаного с експоненційним рупором.

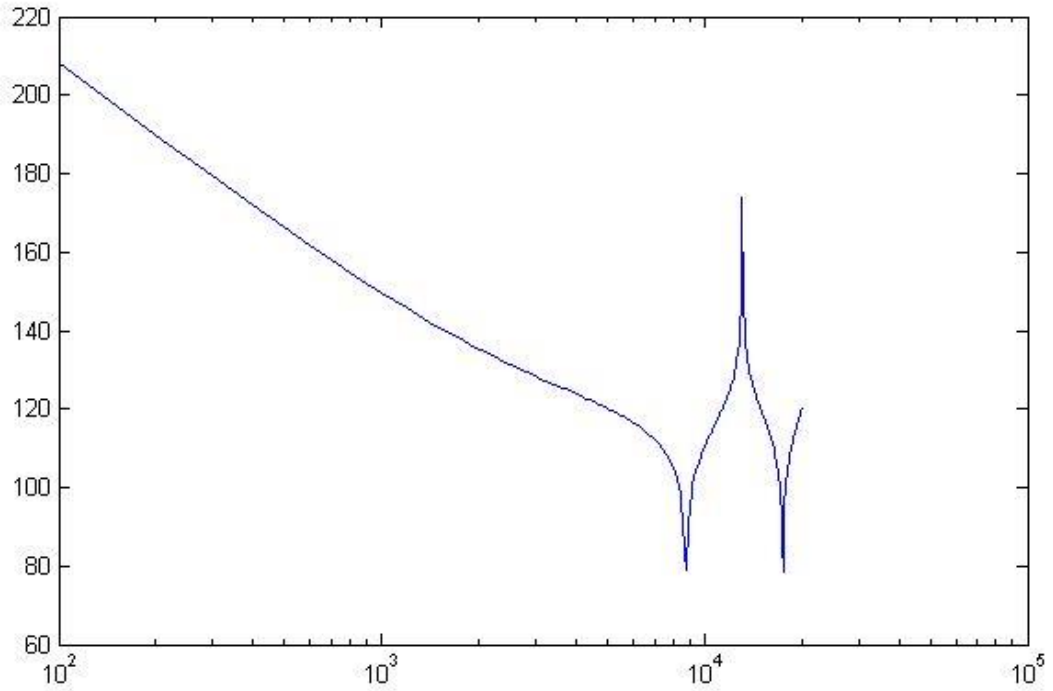


Рис 3.17. Залежність вхідного опору від частоти відкритого зовнішнього слухового каналу з'єднаного с катеноїдним рупором.

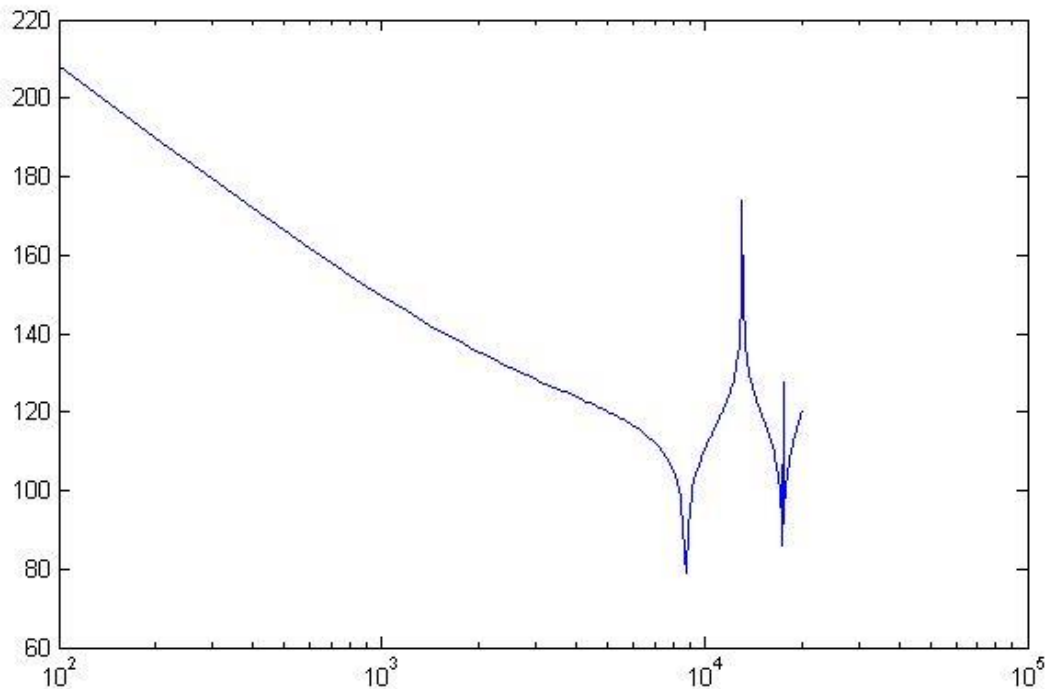


Рис. 3.18. Залежність вхідного опору від частоти закритого зовнішнього слухового каналу з'єднаного с катеноїдним рупором

3.5.2. Коефіцієнт підсилення системи зовнішнього вуха

Коефіцієнт підсилення за потужністю обраховувався за схемою [15], представленою на рис.3.19.

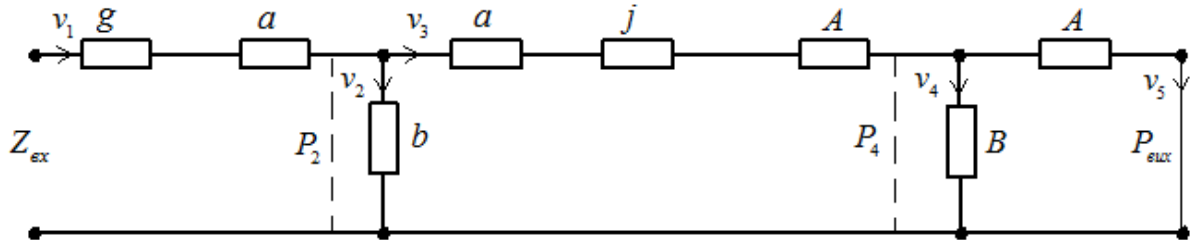


Рис.3.19. Параметри схеми для визначення коефіцієнту підсилення системи

Розрахуємо вихідну потужність:

$$v_1 = \frac{P_{ex}}{Z_{ex}};$$

$$P_2 = P_{ex} - v_1 \cdot (g + a);$$

$$v_2 = \frac{P_2}{b};$$

$$v_3 = v_1 - v_2;$$

$$P_4 = P_2 - v_3 \cdot (a + j + A);$$

$$v_4 = \frac{P_4}{B};$$

$$v_5 = v_3 - v_4;$$

У випадку якщо труба відкрита, то вихідна потужність розраховується як:

$$P_{вих} = P_4 + v_5 \cdot A'$$

У разі закритої труби:

$$P_{вих} = P_4.$$

Коефіцієнт підсилення визначаємо за формулою:

$$K = (l_p + l_{mp}) \frac{P_{\text{вух}}}{P_{\text{вх}}}$$

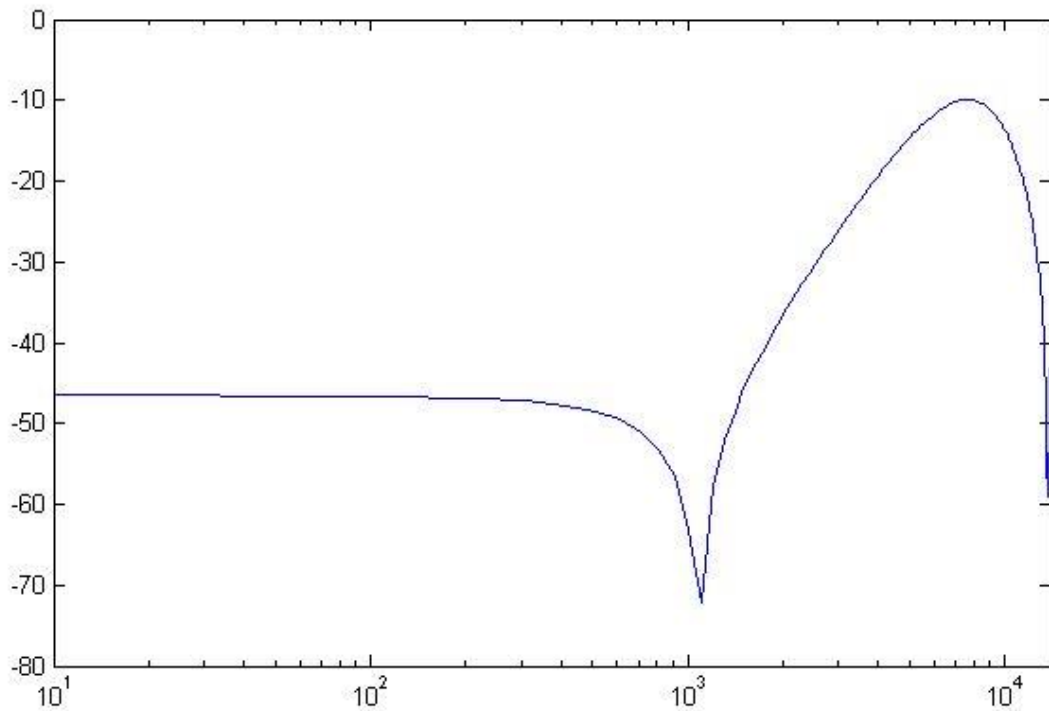


Рис.3.20. Частотна залежність коефіцієнту підсилення відкритої системи зовнішнього вуха (модель експоненційного рупора)

З наведених графіків можна зробити висновок, що система зовнішнього слухового вуха значно підсилює звук тільки в районі резонансної частоти.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП ПРОЕКТУ

Стартап-проекти призначені вирішувати проблеми та задачі, які з часом вдається вирішити завдяки використанню технічного прогресу.

Метою розділу є формування інноваційного мислення, підприємницького духу та формування здатностей щодо оцінювання ринкових перспектив і можливостей комерціалізації основних науково-технічних розробок, сформованих у попередній частині магістерської дисертації у вигляді розроблення концепції стартап-проекту в умовах висококонкурентної ринкової економіки глобалізаційних процесів.

В даному розділі магістерської дисертації буде виконано перший етап розроблення стартап-проекту, а саме маркетинговий аналіз. В межах цього етапу необхідно :

- розробити опис самої ідеї проекту та визначити загальні напрями використання потенційного товару чи послуги, а також їх відмінність від конкурентів;
- проаналізувати ринкові можливості щодо його реалізації;
- на базі аналізу ринкового середовища розробити стратегію ринкового впровадження потенційного товару в межах проекту [16].

4.1. Опис ідеї проекту

Таблиця 4. 1. Опис ідеї стартап-проекту

<i>Зміст ідеї</i>	<i>Напрямки застосування</i>	<i>Вигоди для користувача</i>
Ідея стартап-проекту полягає в створенні електроакустичної схеми, яка імітує роботу зовнішнього вуха в системі	1. Розробка обладнання для проведення діагностики вуха	Спрощений розрахунок параметрів для розробки обладнання.

Таблиця 4. 2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко- економічні характеристи ки ідеї	Товари/концепції конкурентів			W (слабка сторона)	N (нейтрал ьна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Cochlear	Medel			
1.	Доступ до ресурсів	Обмеже ний	Необме жений	необме жений	Не було проведе но дослідж ень на реально му вусі	Набута база розмірів та парамет рів елементі в зовнішн ього та середнь ого вуха людини	Результа ти отриман і при практич ному застосув анні майже, або повніст ю співпада ють із теоретич ними
2.	Постійні витрати	Незнач ні	Значні	Значні	Потрібні затрати на більш широкі дослідж ення, для перевірк и результ атів	Потрібн о збільши ти базу розмірів та парамет рів елементі в зовнішн ього для реалізаці ї результ атів груп різного вікового типу	Досі витрат на дослідж ення не було, а набуті дані є достовір ними
4.	Орієнтована ціна	\$1000	\$20000	\$10000	Для проведе про дослідж ень на обладна нні	Для проведе про дослідж ень на реальни х людях	Ціна є найнижч ою на ринку

					затрати можуть коливатися, але не у великих межах	(при діагностиці) затрати не потрібні	
--	--	--	--	--	---	---------------------------------------	--

4.2. Технологічний аудит ідеї проекту

Таблиця 4. 3. Технологічна здійсненність ідеї проекту

<i>№ п/п</i>	<i>Ідея проекту</i>	<i>Технології її реалізації</i>	<i>Наявність технологій</i>	<i>Доступність технологій</i>
1	Розроблення електроакустичної схеми вушнієї раковини	Програмний продукт Matlab	Наявна	Доступна
2	Розроблення електроакустичної схеми зовнішнього вушного каналу	Програмний продукт Matlab	Наявна	Доступна
3	Розроблення електроакустичної схеми зовнішнього вуха як цілої системи	Програмний продукт Matlab	Потребує доробки	Доступна

Обрана технологія реалізації ідеї проекту:

Буде розроблена електроакустична схема на базі програмного продукту Matlab, за допомогою якої буде можливість отримати частотну характеристику вхідного опору та коефіцієнту підсилення на якій будуть відображені частоти резонансу та видно зміни при внесенні змін у розміри та параметри елементів зовнішнього вуха людини.

4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Таблиця 4. 4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

<i>№ п/п</i>	<i>Показники стану ринку (найменування)</i>	<i>Характеристика</i>
1	Кількість головних гравців, од	2
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	10000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Немає
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Є
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	25%

Таблиця 4. 5. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

<i>№ п/п</i>	<i>Потреба, що формує ринок</i>	<i>Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)</i>	<i>Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів</i>	<i>Вимоги споживачів до товару</i>
1	Зниження ціни на виготовлення обладнання для проведення діагностики слуху	Пацієнти з кондуктивними, або сенсоневральними вадами слуху. Від легких та глибоких втрат слуху	Співвідношення ціна/якість проведення діагностики	Результати діагностики повинні відповідати реальному стану речей
2	Зниження ціни на виготовлення елементів імплантатів середнього вуха людини	Пацієнти з сенсоневральними вадами слуху (від середніх до глибоких втрат слуху)	Важлива ціна товару та гарантійна і постгарантійна підтримка з боку постачальника	Продукція повинна бути одночасно недорогою та надійною. При цьому якість звучання є одним з найважливіших факторів

Таблиця 4. 6. Фактори загроз

<i>№ п/п</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст загрози</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Ефект масштабу	Можливість зростання обсягу інвестицій, який доведеться вкласти новій компанії для проведення досліджень та розширення бази та, щоб закріпитися на ринку	Або зменшення масштабів досліджень, або зменшення собівартості продукції
2	Патенти	Можливість розроблення вже запатентованих ідей	Дослідження патентів в даній галузі
3	Відомий бренд	Можливість важкого подолання бар'єру при боротьбі з вже існуючими компаніями	Поширення інформації про переваги даного проекту

Таблиця 4. 7. Фактори можливостей

<i>№ п/п</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст можливості</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Зниження цін на елементи для виготовлення обладнання для	Буде знижена ціна на проведення діагностики слуху та операцій для вживлення імплантатів	Збільшення обсягів досліджень та покращення якості

	діагностики слуху та на елементи для імплантації середнього вуха	середнього вуха, що збільшить попит на продукцію	
2	Можливість розширення ринку та експорт обладнання та елементів	Через низьку ціну на діагностику та операції для вживлення імплантатів у середнє вуха, є можливість збільшення попиту і за кордоном, оскільки ціни на медицину та технічне обслуговування за кордоном значно перевищує українські товари та послуги, а при покращенні якості така можливість дуже вірогідна	Покращення якості товарів та послуг в цій сфері, та можливе співробітництво з більшими компаніями, обмін знаннями та технологіями для оптимізації товарів та послуг.

Таблиця 4. 8. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

<i>Особливості конкурентного середовища</i>	<i>В чому проявляється дана характеристика</i>	<i>Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)</i>
1. Вказати тип конкуренції - олігополія	На ринку існує дві основні фірми	Орієнтуватися на ринок України та Європи
2. За рівнем конкурентної боротьби - локальний	Головні конкуренти знаходяться на ринку США	Орієнтуватися на ринок України та Європи
3. За галузевою ознакою - внутрішньогалузева	Конкуренція відбувається між компаніями однієї галузі	Покращувати якість, не збільшуючи ціну
4. Конкуренція за видами товарів - товарно-видова	Конкуренція відбувається між компаніями, які розроблюють однакові продукти, але при різному відношенні ціна/якість	Зберігати тенденцію на збільшення якості
5. За характером конкурентних переваг - цінова	Головним критерієм конкуренції наразі є ціна на продукцію	Внести конкуренцію за якістю
6. За інтенсивністю - не марочна	Одним з головним критерієм конкуренції є якість	Внести конкуренцію за ціною

Таблиця 4. 9. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

<i>Складові аналізу</i>	<i>Прямі конкуренти в галузі</i>	<i>Потенційні конкуренти</i>	<i>Постачальники</i>	<i>Клієнти</i>	<i>Товари-замінники</i>

	<i>Cochlear, Medel</i>	<i>Ефект масштабу, патенти</i>	<i>Продукція постачальник а посідає важливе місце у виробництві даної галузі</i>	<i>Кількість споживачів, доступність інформації для споживачів</i>	<i>Товари замітники не існують</i>
Висновки :	Конкурентна боротьба велика в основному на ринку США та Європи	- Є можливість входу на ринок України та в подальшому на ринок Європи; - Потенційні конкуренти є на ринку США та Європи;	Постачальник и не диктують умови на ринку	Головним критерієм для клієнтів є найкраще співвідношення ціна-якість. Проте в цій галузі дуже важливим критерієм є також досвід. В Україні споживачі мало проінформовані про такі можливості.	Є обмеження для роботи на ринку через товари та послуги замітники.

Таблиця 4.10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

<i>№ п/п</i>	<i>Фактор конкурентоспроможності</i>	<i>Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)</i>
1	Низька ціна	Через низьку ціну можливий великий попит, що дасть можливість розвиватися далі
2	Відношення ціна/якість	За рахунок відношення ціна/якість можна заволодіти часткою ринку як в Україні так і за кордоном

Таблиця 4.11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «Розробка електроакустичної схеми зовнішнього та середнього вуха як системи»

<i>№ п/п</i>	<i>Фактор конкурентоспроможності</i>	<i>Бали 1-20</i>	<i>Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні зі стартап-проектом</i>						
			<i>-3</i>	<i>-2</i>	<i>-1</i>	<i>0</i>	<i>+1</i>	<i>+2</i>	<i>+3</i>
1	Низька ціна	18	Cochlear		Medel				
2	Відношення ціна/якість	15				Medel, Cochlear			

Таблиця 4.12. SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: Низька ціна	Слабкі сторони: Новачок на ринку
Можливості: Зайняти місце на ринку України, а з часом Європи	Загрози: Патентні суперечки

Таблиця 4.13. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

<i>№ п/п</i>	<i>Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки</i>	<i>Ймовірність отримання ресурсів</i>	<i>Строки реалізації</i>
1	Загарбник	Висока	2 роки

4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту

Таблиця 4.14. Вибір цільових груп потенційних споживачів

<i>№ п/п</i>	<i>Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів</i>	<i>Готовність споживачів сприйняти продукт</i>	<i>Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)</i>	<i>Інтенсивність конкуренції в сегменті</i>	<i>Простота входу у сегмент</i>
1	Медичні центри	Готові	Великий	Середня	Середня
2	Приватні особи	Готові	Низький	Висока	Мала

Які цільові групи обрано:
В якості цільової групи обрано медичні центри

Таблиця 4.15. Визначення базової стратегії розвитку

<i>№ п/п</i>	<i>Обрана альтернатива розвитку проекту</i>	<i>Стратегія охоплення ринку</i>	<i>Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи</i>	<i>Базова стратегія розвитку</i>
1	За цільову групу обрано медичні центри	Концентрований маркетинг	Низька ціна на виріб, гарантійне та пост гарантійне обслуговування	Стратегія спеціалізації
2	Обрано весь ринок	Масовий маркетинг	Відношення ціна/якість	Стратегія лідерства по витратах

Таблиця 4.16. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

<i>№ п/п</i>	<i>Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?</i>	<i>Чи буде компанія шукати нових споживачів, або</i>	<i>Чи буде компанія копіювати основні характеристики</i>	<i>Стратегія конкурентної поведінки*</i>
------------------	---	--	--	--

		<i>забирати існуючих у конкурентів?</i>	<i>товару конкурента, і які?</i>	
1	Є, в Україні	Пошук нових споживачів	Ні	Стратегія лідера
2	Не є, в Європі та США	Переважно пошук нових споживачів	Так, якщо це стосується елементів імплантів для середнього вуха, оскільки маса та пружність елементів можуть співпадати	Стратегія заняття конкурентної ніші

Таблиця 4.17. Визначення стратегії позиціонування

<i>№ n/n</i>	<i>Вимоги до товару цільової аудиторії</i>	<i>Базова стратегія розвитку</i>	<i>Ключові конкурентоспроможні і позиції власного стартап-проекту</i>	<i>Вибір асоціацій, які мають сформувавши комплексну позицію власного проекту (три ключових)</i>
1	Низька ціна, висока надійність	Стратегія спеціалізації	Ціна виробу буде нижче ніж у конкурентів, гарантійна та пост гарантійна підтримка здійснюється локально	Відношення ціна/якість, підтримка споживачів
2	Якість звучання, ціна	Стратегія лідерства по витратам	Ціна виробу буде нижче ніж у конкурентів.	Якість звучання після операції імплантатів не буде визначатися ціною.

4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Таблиця 4.18. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

<i>№ n/n</i>	<i>Потреба</i>	<i>Вигода, яку пропонує товар</i>	<i>Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)</i>
1	Спрощення розробки обладнання для діагностики слуху	Зниження ціни	Основною перевагою серед конкурентами є низька ціна. Також гарантійна та пост гарантійна підтримка.
2	Спрощення розробки елементів імплантатів для вживлення в середнє вухо	Зниження ціни	Низька ціна на товар, гарантійна та пост гарантійна підтримка.

Таблиця 4.19. Опис трьох рівнів моделі товару

<i>Рівні товару</i>	<i>Сутність та складові</i>		
I. Товар за задумом	Продукт використовується для спрощення розробки медичного обладнання для діагностики слуху (тимпанометрії, імпедансометрії) та розробки елементів імплантатів для вживлення у середнє вухо		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Побудова частотної характеристики вхідного опору	М	Тх
	2. Створення бази параметрів та характеристик	М	Тх
	3. Розрахунок частот резонансів та антирезонансів	М	Тх
	Не потребує пакування, програмний продукт можна завантажити на ПК		
	Марка: EarCount inc. Назва товару: EarCount		
III. Товар із підкріпленням	Знижки постійним та оптовим клієнтам		
	Гарантія якості		
Підтримка користувача			
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: особиста (персональна) ліцензія.			

Таблиця 4.20. Визначення меж встановлення ціни на обладнання для діагностики слуху

<i>№ n/n</i>	<i>Рівень цін на товари-замінники</i>	<i>Рівень цін на товари-аналоги</i>	<i>Рівень доходів цільової групи споживачів</i>	<i>Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу</i>
1	> \$5000	> \$5000	\$5000-50000/міс	\$1000-2000
2	> \$10000	> \$10000	\$10000-100000/міс	\$4000-6000

Таблиця 4.21. Формування системи збуту

<i>№ n/n</i>	<i>Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Функції збуту, які має виконувати постачальник товару</i>	<i>Глибина каналу збуту</i>	<i>Оптимальна система збуту</i>
1	Оптові закупівлі	Транспортування, поділ	без посередників	Традиційна
2	Купування через інтернет-магазин та в магазинах	Транспортування, поділ, встановлення контакту	Один посередник	Багатоканальна

Таблиця 4.22. Концепція маркетингових комунікацій

<i>№ n/n</i>	<i>Специфіка поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти</i>	<i>Ключові позиції, обрані для позиціонування</i>	<i>Завдання рекламного повідомлення</i>	<i>Концепція рекламного звернення</i>
1	Консерватор	Конференції, виставки, інтернет	Якість, ціна	Показати переваги технології	Реклама повинна продемонструвати якість та надійність

					практичного застосування технології
2	Нерішучий	Інтернет, телебачення	Ціна	Ознайомити клієнтів з існуючою технологією	Реклама повинна вразити клієнта новизною технології

4.6. Висновки

Представлена технологія не є новою на світовому ринку, проте на ринку України немає конкурентів. Для входу на ринок знадобиться час, оскільки потрібен реальний досвід та широкі дослідження перед виходом у світ. Цільова група з часом буде тільки збільшуватися, оскільки кількість людей із проблемами слуху кожен рік зростає. Великою проблемою є погана поінформованість та платоспроможність жителів України. Проте, після розкрутки, продукт стане цікавий і закордоном, оскільки медичні послуги та товари закордоном на порядок дорожчі ніж в Україні. В результаті будуть збільшені обсяги експорту.

Через низьку ціну, та взагалі, відношення ціна/якість проект є конкурентоспроможним.

За цільову групу клієнтів обрано медичні центри, оскільки у них великий масштаб закупівель.

Проект має перспективу і у інших напрямках, є можливість розвиватися та покращувати у напрямку імплантації внутрішнього вуха та стимуляції внутрішньо - волоскових клітин за допомогою стимуляції електродів.

ВИСНОВКИ

В роботі пропонується електроакустична модель зовнішнього відділу слухової системи. Вушна раковина представлена у вигляді рупору, який працює на прийом звукових хвиль. Зовнішній слуховий канал імітується відрізком вузької труби із жорсткими стінками відповідних розмірів.

Моделювання зовнішнього слухового каналу дозволяє одержати результати, близькі до теоретичних, з відповідними частотами резонансу та антирезонансу.

Для моделювання вушної раковини попередньо проаналізовані строгі хвильові теорії Морза та Гутіна, а також наближена теорія електроакустичних аналогій Лоурента та Фанта.

Для порівняння результатів, одержаних шляхом розв'язку електроакустичних систем за моделями Лоурента та хвильової теорії, виконані розрахунки коефіцієнту підсилення рупора для рупорів конічної та експоненціальної форми, за розмірами, запропонованими Гутіним. Отримані результати мають деякі розбіжності в плані частот максимального підсилення, що цілком очікуване, виходячи з меж частотного застосування методу електроакустичних аналогій.

Розрахунки для моделі вушної раковини проводились для двох форм рупора: експоненціального та катеноїдного, оскільки за своєю формою конічний рупор найменш подібний до вушної раковини.

Частотна залежність вхідного опору розглянутих форм рупора показала, що резонанс та антирезонанс в катеноїдному рупорі з'являються раніше ніж в експоненціальному (6,5кГц і 9кГц, відповідно).

Частоти, на яких відбувається максимальне підсилення звукової енергії в рупорі, співпадають з частотами резонансів рупорів, що є цілком логічним. Для експоненціального рупору найбільше підсилення відбувається в районі 10кГц, а

для катеноїдного в межах 8 кГц, що більше відповідає експериментальним даним (5 – 6 кГц).

З аналізу частотної залежності вхідного опору всієї системи зовнішнього вуха витікає, що вушна раковина має властивості підсилювача звукових коливань високих частот, що в поєднанні зі слуховим каналом розширює цей діапазон до області частот від 2 -3 кГц.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. <https://anatomus.ru/chuvstva/sluh-narug-uho.html>
2. Морз Ф. Колебания и звук / перевод с англ. под. ред. Ржевкина С. Н. – М. – Л.: Гос. изд-во техн. - теор. лит., 1949. – с. 618.
3. Фурдудев В.В. Электроакустика ОГИЗ-М.- 1948 – 517с.
4. Фант Г. Акустическая теория речеобразования. – М.: изд-ва Наука., 1964. – 284 с.
5. Laurent T. Matematisk behandling av kontinuerligt inomogena ledningar medelst ekvivalenet samt exempel pa metoderna anvandning for olika praktiska problem. Tekn. Medd. K. Telegrafstyrelsen, 1940. P. 113-133
6. Ingard U. On the theory and design of acoustic resonators. – J. Acoust. Soc. Am. 25, 1953. P. 1037 – 1067.
7. Рэлей (Дж. В. Стрэтт) Теория звука, т. 1. – М. – Л.: Гос. изд-во техн.-теор. лит., 1940. – 499с.
8. Гутин Я. Избранные труды. – Л.: Судостроение, 1977. – 597 с.
9. S. Ballantine, Journ. Franklin inst., 203,275,1027
10. G. Stewart and R. Lindsay, Acoustic, p139.
11. Ю. С. Вахитов, "Теоретические основы электроакустики и электроакустическая аппаратура".- М .: Искусство, 1982.
12. Я. Фланаган, Анализ, синтез и восприятие реч.- М .: Связь, 1968.
13. К. Фролов, И. Ф. Гончарович, П. П. Лихнов, Инфразвук, вибрация, человек [Инфразвук, вибрация, человек], М .: Машиностроение, 1996, с. 304.
14. Морозко П.В., Луньова С.А., Замша К.С. , Можливості моделювання повітряного каналу слухової системи.. - ISSN 2524-2725 Електронна та акустична інженерія. 2018. Том.2. – 6с.
15. Баскаков С. И. Лекции по теории цепей. – М. : Изд-во МЭИ, 1991.– 224 с.
16. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів

інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.

17. Корн, Т. Корн, Справочник по математики.- М .: Наука, 1977.- 831 с.

ДОДАТОК А. До еквівалентних схем акустичних резонаторів та рупорів

Таблиця А.1. Окремі випадки катеноїдного, експоненційного та конічного рупорів

	Зростаюча площа		Спадаюча площа	
	d	f	g	j
Катеноїдальний рупор	∞	$-Z_0 h \gamma_0 \operatorname{cth} \frac{l}{h}$	0	$\frac{-Z_0}{h \gamma_0} \operatorname{cth} \frac{l}{h}$
Експоненціальний рупор	$Z_0 h \gamma_0$	$-Z_0 h \gamma_0$	$\frac{Z_0}{h \gamma_0}$	$-\frac{Z_0}{h \gamma_0}$
Конічний рупор	$Z_0 x_0 \gamma_0$	$-Z_0 (x_0 + l) \gamma_0$	$\frac{Z_0}{x_0 \gamma_0}$	$-\frac{Z_0}{(x_0 + l) \gamma_0}$

ДОДАТОК Б. До еквівалентних схем акустичних резонаторів та рупорів

Таблиця Б.1. Постійні для рівняння рупору

Довжина резонатору	l
Номінальний характеристичний імпеданс	$Z_0 = \frac{\rho c}{A_0}$
Номінальний коефіцієнт розповсюдження	$\gamma_0 = \alpha + \frac{j\omega}{c}$
Критична частота рупору	$\omega_0 = \frac{c}{h}$
Коефіцієнт розповсюдження	$\gamma = \gamma_0 \left(1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}\right) = \gamma_0 \tau$
Постійна розповсюдження	$\Gamma = l\gamma$
Характеристичний імпеданс	$\begin{cases} Z = \frac{Z_0}{\tau} & \text{при площі, яка зростає} \\ Z = Z_0 \tau & \text{при площі, яка зменшується} \end{cases}$
Поздовжній елемент еквівалентної Т-подібної ланки	$a = Z \operatorname{th} \frac{\gamma l}{2}$
Поперечний елемент еквівалентної Т-подібної ланки	$b = \frac{Z}{\operatorname{sh} \gamma l}$
Коефіцієнт трансформації імпедансу	$m^2 = \frac{A_0}{A_l}$

ДОДАТОК В. До теорії рупору

Таблиця В.1 Опори випромінювання експоненціального і кінчного рупору

ω в долях «граничної» частоти	$\frac{1}{1 + \left(\frac{nc}{2\omega}\right)^2}$	$\sqrt{1 - \left(\frac{nc}{2\omega}\right)^2}$
$\frac{1}{4}$	0,059	0,000
$\frac{1}{2}$	0,200	0,000
1	0,500	0,000
2	0,800	0,866
4	0,941	0,968
6	0,973	0,968