

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

# АКУСТИКА СЛУХУ ТА МОВОТВОРЕННЯ

## Практикум

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра  
за освітньою програмою «Акустичні електронні системи та технології обробки акустичної  
інформації»  
спеціальності 171 «Електроніка»

Укладач: К.С. Дрозденко

Електронне мережеве навчальне видання

Київ  
КПІ ім. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО  
2026

УДК 534.7:534.78

Д75

Укладач: *Дрозденко Катерина Сергіївна*, канд. техн. наук, доц.

Рецензент *Клен К.С.*, д.т.н., доцент, доцент кафедри електронних пристроїв та систем факультету електроніки КПІ ім. Ігоря Сікорського

Відповідальний редактор *Попович П.В.*, канд. техн. наук, доц.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
(протокол № 6 від 03.04.2026 р.)  
за поданням вченої ради факультету електроніки  
(протокол № 03/2026 від 16.03.2026 р.)*

Д75 **Акустика слуху та мовотворення** [Електронний ресурс] : практикум : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Акустичні електронні системи та технології обробки акустичної інформації» спец. 171 «Електроніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: К. С. Дрозденко. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2026. – 67 с.

Навчальний посібник містить короткі теоретичні відомості, детальні приклади розв'язання типових задач та завдання для самостійної роботи з відповідями з дисципліни "Акустика слуху та мовотворення". Посібник охоплює такі тематичні розділи, як акустичні характеристики та параметри звукових сигналів, психоакустичні явища (сприйняття гучності, маскування, висота звуку), моделювання слухової системи людини, фізичні характеристики звуків мови, моделі голосового тракту та енергетичні характеристики мовних сигналів.

Матеріал, представлений в посібнику, призначений для студентів спеціальності 171 «Електроніка», а також буде корисним для студентів суміжних технічних спеціальностей і фахівців, які працюють у галузях розробки слухових пристроїв, систем розпізнавання мовлення, психоакустики та акустичних досліджень.

УДК 534.7:534.78

Реєстр. № НП 25/26-292. Обсяг 1,57 авт. арк.  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056  
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2026

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
Практичне заняття 1. Акустичні характеристики і параметри звукових сигналів. Звуковий тиск. Інтенсивність. Рівень звуку.....	7
Короткі теоретичні відомості .....	7
Приклади розв'язування задач.....	8
Задачі для самостійного розв'язку.....	10
Практичне заняття 2. Акустичні характеристики і параметри звукових сигналів, що створюються декількома джерелами .....	11
Короткі теоретичні відомості .....	11
Приклади розв'язування задач.....	12
Задачі для самостійного розв'язку.....	14
Практичне заняття 3. Сприйняття гучності .....	16
Короткі теоретичні відомості .....	16
Приклади розв'язування задач.....	18
Задачі для самостійного розв'язку.....	22
Практичне заняття 4. Маскування звуку .....	23
Короткі теоретичні відомості .....	23
Приклади розв'язування задач.....	23
Задачі для самостійного розв'язку.....	26
Практичне заняття 5. Висота звуку.....	28
Короткі теоретичні відомості .....	29
Приклади розв'язування задач.....	29
Задачі для самостійного розв'язку.....	32
Практичне заняття 6. Моделювання відділів слухової системи людини .....	34
Короткі теоретичні відомості .....	34
Приклади розв'язування задач.....	36
Задачі для самостійного розв'язку.....	41
Практичне заняття 7. Звуки мови та їх фізичні характеристики .....	44
Короткі теоретичні відомості .....	44

Приклади розв'язування задач.....	45
Задачі для самостійного розв'язку.....	49
Практичне заняття 8. Моделі голосового тракту .....	51
Короткі теоретичні відомості .....	51
Приклади розв'язування задач.....	52
Задачі для самостійного розв'язку.....	55
Практичне заняття 9. Енергетичні характеристики мовних сигналів .....	57
Короткі теоретичні відомості .....	57
Приклади розв'язування задач.....	58
Задачі для самостійного розв'язку.....	62
Додатки.....	63
Додаток А. Криві рівного рівня гучності.....	64
Додаток Б. Частотні групи (критичні смуги).....	65
Додаток В. Криві маскуваня.....	66
Перелік посилань .....	67

## ВСТУП

Сучасний етап розвитку електроніки та телекомунікаційних технологій характеризується інтенсивним впровадженням систем обробки, розпізнавання та синтезу мовних сигналів, пристроїв підвищення якості звучання, слухових апаратів та інших технологій, що взаємодіють зі слуховою системою людини. Розробка таких систем вимагає від фахівців глибокого розуміння будови та принципів функціонування слухового і мовного трактів, механізмів сприйняття звуку та акустичних характеристик мовлення. Ці умови формують нові вимоги до підготовки інженерів, які повинні володіти як класичними знаннями з акустики, так і сучасними методами моделювання слухової системи та мовотворення.

Дисципліна «Акустика слуху та мовотворення» входить до сертифікатної програми «Медична акустика» і є одним із перших спеціалізованих курсів. Предметом навчальної дисципліни є будова та методи моделювання слухового і мовного трактів людини, характеристики звукових та мовних сигналів, акустичні принципи слуху та мовотворення, об'єктивні та суб'єктивні характеристики слухового сприйняття. Особливістю вивчення дисципліни є поєднання теоретичних знань з фізики звуку, фізіології та психоакустики з практичними навичками моделювання та аналізу акустичних процесів, що вимагає як глибокого розуміння фізичних явищ, так і вміння застосовувати математичний апарат для розв'язання прикладних задач.

Трансформація вищої освіти супроводжується скороченням аудиторних занять та посиленням ролі самостійної роботи студентів. Це обумовлює необхідність створення методичної літератури, яка забезпечує ефективну організацію практичних занять та самостійного опанування складного матеріалу дисципліни.

Матеріал посібника розподілений на дев'ять розділів, що відповідають тематиці практичних занять. Кожен розділ містить стислий теоретичний матеріал, приклади розв'язання типових задач з поясненнями та завдання для

самостійної роботи. Така структура дозволяє студентам поетапно засвоювати матеріал: від акустичних характеристик та параметрів звукових сигналів через психоакустичні явища (сприйняття гучності, маскування, висоти звуку) до моделювання слухової системи, вивчення фізичних характеристик звуків мови та енергетичних параметрів мовних сигналів.

# ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 1

## АКУСТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ І ПАРАМЕТРИ ЗВУКОВИХ СИГНАЛІВ. ЗВУКОВИЙ ТИСК. ІНТЕНСИВНІСТЬ. РІВЕНЬ ЗВУКУ

### Короткі теоретичні відомості

*Інтенсивність звуку  $I$*  – середня кількість звукової енергії, що проходить в одиницю часу через одиницю поверхні. Інтенсивність пов'язана із звуковим тиском рівністю

$$I = \frac{P_{\max}^2}{\rho_0 c_0},$$

де  $P_{\max}^2$  – квадрат порогового значення звукового тиску;  $\rho_0 c_0$  – питомий акустичний опір повітря [1].

Одиницею вимірювання інтенсивності є Вт/м<sup>2</sup>.

Закон Вебера-Фехнера (логарифмічний закон сприйняття звуку): слухове відчуття пропорційне логарифму відносної зміни інтенсивності.

Величину слухового відчуття, а також рівні інтенсивності (сили звуку) або звукового тиску виражають в децибелах.

Рівень інтенсивності

$$L, \text{дБ} = 10 \lg \frac{I_1}{I_0},$$

де  $I_0 = 10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup> – нульовий рівень інтенсивності – значення інтенсивності на порозі чутності на частоті 1 кГц.

Рівень звукового тиску

$$L, \text{дБ} = 20 \lg \frac{P}{P_0},$$

де  $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Па – нульовий рівень по звуковому тиску – значення тиску на порозі чутності на частоті 1 кГц.

## Приклади розв'язування задач

### Задача 1.1

Визначити рівень сили звуку і його інтенсивність, якщо він створює тиск 0,02 Па.

#### Розв'язання

$$L = 20 \lg \frac{P}{P_0} = 20 \lg \frac{0,02}{2 \cdot 10^{-5}} = 20 \lg 10^3 = 20 \cdot 3 = 60 \text{ дБ.}$$

**Відповідь:** 60 дБ.

### Задача 1.2

Рівень звукового тиску дорівнює 40 дБ. Визначити значення цього тиску і інтенсивність звуку.

#### Розв'язання

$$L = 20 \lg \frac{P}{P_0};$$

$$\lg \frac{P}{P_0} = \frac{L}{20};$$

$$\frac{P}{P_0} = 10^{\frac{L}{20}};$$

$$P = P_0 \cdot 10^{\frac{L}{20}};$$

$$P = P_0 \cdot 100 = 2 \cdot 10^{-5} \cdot 100 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Па.}$$

Інтенсивність:

$$I = I_0 \cdot 10^{\frac{L}{10}} = 10^{-12} \cdot 10^{\frac{40}{10}} = 10^{-8} \text{ Вт/м}^2$$

**Відповідь:**  $2 \cdot 10^{-3}$  Па;  $10^{-8}$  Вт/м<sup>2</sup>.

### Задача 1.3

Два звуки однакової частоти за інтенсивністю відрізняються на 30 дБ. Знайти відношення їх інтенсивностей та значень звукового тиску.

### **Розв'язання**

$$L_1 = 10 \lg \frac{I_1}{I_0}; \quad L_2 = 10 \lg \frac{I_2}{I_0};$$

$$\Delta L = L_1 - L_2 = 10 \lg \frac{I_1}{I_0} - 10 \lg \frac{I_2}{I_0} = 10 \left( \lg \frac{I_1}{I_0} - \lg \frac{I_2}{I_0} \right) = 10 \lg \frac{I_1}{I_2} = 30;$$

$$\lg \frac{I_1}{I_2} = 3; \quad \frac{I_1}{I_2} = 10^3;$$

Відношення значень звукового тиску:

$$\Delta L = 20 \lg \frac{P_1}{P_2} = 30; \quad \lg \frac{P_1}{P_2} = 1,5; \quad \frac{P_1}{P_2} = 31,6.$$

**Відповідь:**  $\frac{I_1}{I_2} = 10^3; \frac{P_1}{P_2} = 31,6.$

### **Задача 1.4**

Якому відношенню інтенсивностей і тисків відповідають рівні сили звуку 20 дБ і -20 дБ?

### **Розв'язання**

$$L_1 = 10 \lg \frac{I_1}{I_0} = 20 \text{ дБ}; \quad L_2 = 10 \lg \frac{I_2}{I_0} = -20 \text{ дБ}.$$

$$\begin{aligned} \Delta L = L_1 - L_2 &= 10 \lg \frac{I_1}{I_0} - 10 \lg \frac{I_2}{I_0} = 10 \left( \lg \frac{I_1}{I_0} - \lg \frac{I_2}{I_0} \right) = \\ &= 10 \lg \frac{I_1}{I_2} = 20 - (-20) = 40 \text{ дБ}. \end{aligned}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = 10^4.$$

Відношення тисків:

$$L_1 = 20 \lg \frac{P_1}{P_0} = 20 \text{ дБ}; \quad L_2 = 20 \lg \frac{P_2}{P_0} = -20 \text{ дБ}.$$

$$\Delta L = L_1 - L_2 = 20 \lg \frac{P_1}{P_2} = 40 \text{ дБ};$$

$$\frac{P_1}{P_2} = 100.$$

**Відповідь:**  $\frac{I_1}{I_2} = 10^4; \frac{P_1}{P_2} = 100.$

## Задачі для самостійного розв'язку

1. Перфорація барабанної перетинки вуха виникає при рівні інтенсивності звуку  $L = 150$  дБ.

Знайти інтенсивність звуку з частотою 1 кГц, який може призвести до цього.

Відповідь:  $10^3$  Вт/м<sup>2</sup>.

2. Рівень інтенсивності звуку в приміщенні становив 80 дБ. Під час реконструкції стіни покрили звукопоглинаючим матеріалом, що призвело до зменшення інтенсивності в 1500 разів. Визначити рівень звуку в приміщенні після звукоізоляції.

Відповідь: 48,2 дБ.

3. Рівень сили звуку відносно тиску 1 Па становить 20 дБ. Визначити рівень сили звуку відносно тиску  $10^{-9}$  Па.

Відповідь: 200 дБ.

4. Інтенсивність звуку в виробничому приміщенні  $10^{-3}$  Вт/м<sup>2</sup>. Для того, щоб покращити умови праці, стіни вирішили покрити звукопоглинаючим матеріалом. Після цього рівень звуку став рівним 40 дБ. У скільки разів при цьому зменшилась інтенсивність звуку?

Відповідь:  $\frac{I_1}{I_2} = 10^5$ .

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 2

### АКУСТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ І ПАРАМЕТРИ ЗВУКОВИХ СИГНАЛІВ, ЩО СТВОРЮЮТЬСЯ ДЕКІЛЬКОМА ДЖЕРЕЛАМИ

#### Короткі теоретичні відомості

Для двох некогерентних сигналів з інтенсивностями  $I_1$  та  $I_2$  (сигнали різних частот, наприклад, шумові, мовні) справедливий принцип енергетичного сумування, тобто енергії сигналів можна додавати [1]:

$$I_{1-2} = I_1 + I_2.$$

Рівень результуючого сигналу

$$L_{1-2} = 10 \lg \frac{I_{1-2}}{I_0}.$$

Для когерентних сигналів (сигнали однієї частоти):

$$I_{1-2} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 \cdot I_2} \cos \varphi,$$

де  $\varphi$  – кут зсуву фаз між сигналами.

Частинні випадки [1]:

- 1) Для синфазних сигналів:  $\varphi = 0$ ;

$$I_{1-2} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 \cdot I_2};$$

$$P_{1-2} = P_1 + P_2.$$

- 2) Для сигналів у протифазі:  $\varphi = 180$ ;

$$I_{1-2} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 \cdot I_2};$$

$$P_{1-2} = P_1 - P_2.$$

Рівні інтенсивностей сигналів можна віднімати, проте не можна додавати. Якщо потрібно знайти сумарний рівень двох сигналів, то переходять до інтенсивностей, знаходять суму і підставляють під логарифм.

## Приклади розв'язування задач

### Задача 2.1

На скільки децибел збільшиться рівень звуку, якщо замість одного джерела з рівнем 70 дБ використати 16 некогерентних джерел такого ж рівня?

#### Розв'язання

Рівень звуку одного джерела:

$$L_1 = 10 \lg \frac{I_1}{I_0} = 70 \text{ дБ.}$$

Сумарна інтенсивність 16 некогерентних джерел:

$$I_{16} = 16I_1.$$

Рівень звуку 16 джерел:

$$L_{16} = 10 \lg \frac{I_{16}}{I_0} = 10 \lg \frac{16I_1}{I_0} = 10 \lg 16 + 10 \lg \frac{I_1}{I_0} = 12 + 70 = 82 \text{ дБ.}$$

$$\Delta L = L_{16} - L_1 = 82 - 70 = 12 \text{ дБ.}$$

**Відповідь:** на 12 дБ.

### Задача 2.2

Визначити сумарний рівень сили звуку трьох некогерентних джерел, якщо рівень звуку кожного з них дорівнює нулю [2].

#### Розв'язання

$$L_1 = L_2 = L_3 = L = 0.$$

$$L = 10 \lg \frac{I}{I_0} = 0;$$

$$\lg \frac{I}{I_0} = 0;$$

$$\frac{I}{I_0} = 1 \rightarrow I = I_0 = 10^{-12} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Якщо рівень звуку дорівнює нулю, то інтенсивність дорівнює пороговій.

$$I_{1-3} = 3I_0 = 3 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

$$L_{1-3} = 10 \lg \frac{3I_0}{I_0} = 10 \lg 3 = 4,8 \text{ дБ.}$$

**Відповідь:** 4,8 дБ.

### **Задача 2.3**

Визначити звуковий тиск першого з двох синфазних джерел, якщо рівень сили звуку в сумарному полі дорівнює 80 дБ, а звуковий тиск, що створює друге джерело дорівнює 0,1 Па [3].

#### **Розв'язання**

Для двох синфазних джерел

$$P_{12} = P_1 + P_2;$$

$$10 \lg \frac{I_{12}}{I_0} = 20 \lg \frac{P_{12}}{P_0} = 80 \text{ дБ.}$$

$$\lg \frac{P_{12}}{P_0} = \lg \frac{P_1 + P_2}{P_0} = 4;$$

$$\frac{P_1 + P_2}{P_0} = 10^4;$$

$$P_1 + P_2 = P_0 \cdot 10^4 = 2 \cdot 10^{-5} \cdot 10^4 = 0,2 \text{ Па;}$$

$$P_1 = 0,2 - P_2 = 0,1 \text{ Па.}$$

**Відповідь:** 0,1 Па.

### **Задача 2.4**

Визначити сумарний рівень двох тональних некогерентних сигналів, якщо сила звуку кожного з них дорівнює відповідно 50 дБ і 30 дБ.

#### **Розв'язання**

Для першого джерела:

$$L_1 = 10 \lg \frac{I_1}{I_0} = 50 \text{ дБ;}$$

$$\lg \frac{I_1}{I_0} = 5;$$

$$\frac{I_1}{I_0} = 10^5;$$

$$I_1 = I_0 \cdot 10^5 = 10^{-12} \cdot 10^5 = 10^{-7} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Аналогічно, для другого:

$$I_2 = 10^{-9} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Сумарна інтенсивність:

$$I_{12} = I_1 + I_2 = 10^{-7} + 10^{-9} = 101 \cdot 10^{-9} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Рівень:

$$L_{12} = 10 \lg \frac{I_{12}}{I_0} \approx 10 \lg 10^5 = 50 \text{ дБ}.$$

**Відповідь:** 50 дБ.

### Задачі для самостійного розв'язку

1. Визначити рівень звукового тиску 10 некогерентних джерел, якщо кожне з них має рівень звукового тиску, що дорівнює 80 дБ [2].

Відповідь: 100 дБ.

2. Визначити звуковий тиск першого з двох джерел, що працюють в протифазі, якщо рівень сили звуку в сумарному полі дорівнює 80 дБ, а звуковий тиск, що створює друге джерело дорівнює 0,1 Па.

Відповідь: 0,1 Па.

3. Визначити сумарний рівень двох тональних синфазних сигналів, якщо їх сили звуку дорівнюють відповідно 90 дБ і 80 дБ.

Відповідь: 92 дБ.

4. Визначити сумарний рівень двох джерел, що працюють у протифазі, якщо їх сили звуку дорівнюють відповідно 90 дБ і 80 дБ.

Відповідь: 86,7 дБ.

5. У концертному залі одночасно працюють три однакових гучномовця, розташовані у різних місцях. Кожен гучномовець відтворює звук на частоті 1000 Гц. Перший гучномовець у точці прослуховування створює звуковий тиск 0,4 Па, другий – 0,3 Па, третій – 0,2 Па.

Визначити сумарну інтенсивність звуку і загальний рівень звукового тиску від усіх трьох гучномовців разом в точці прослуховування.

Відповідь:  $7 \cdot 10^{-4}$  Вт/м<sup>2</sup>; 88,5 дБ.

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 3 СПРИЙНЯТТЯ ГУЧНОСТІ

### Короткі теоретичні відомості

**Гучністю** називається суб'єктивна характеристика, що дозволяє слуховій системі класифікувати звуки за шкалою від тихих до гучних. Об'єктивною характеристикою звуку, що корелює з гучністю є звуковий тиск. Гучність залежить від значення звукового тиску, частоти, спектрального складу, тривалості звуку та його локалізації в просторі. Для оцінки гучності прийнята спеціальна одиниця **сон**. **Гучність 1 сон** – це гучність тонального звуку з частотою 1 кГц з рівнем 40 дБ [1].

За **одиницю рівня гучності** приймають рівень інтенсивності чистого тону частотою 1000 Гц. Ця одиниця рівня гучності називається **фон**. Рівень гучності позначають символом  $G$ . Чисельно рівень гучності у фонах дорівнює рівню інтенсивності звуку в децибелах на частоті 1000 Гц. Рівень гучності тонів інших частот визначають по графіку кривих рівного рівня гучності (додаток А).

Значення гучності в сонах визначається за графіком (рис. 3.1) або за формулою

$$S, \text{сон} = 2^{\frac{G, \text{фон} - 40}{10}}, G > 40 \text{ фон.}$$

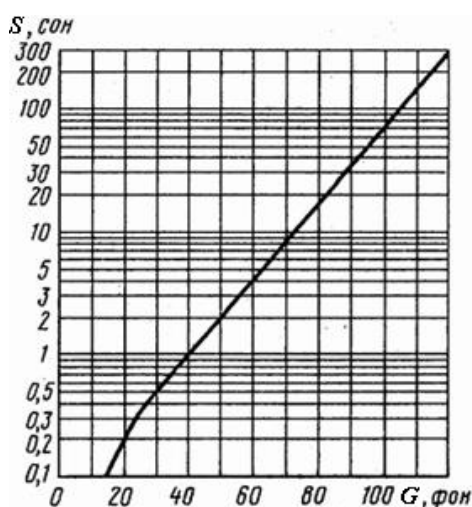


Рис. 3.1. Графік зв'язку гучності в сонах і рівня гучності в фонах [3]

Знаходження сумарної гучності декількох сигналів відбувається трьома різними способами, в залежності від співвідношення їх частот.

**1. Якщо сигнали близькі по частоті, тобто знаходяться в середині однієї критичної смуги** (див. додаток Б).

Знаходимо сумарну інтенсивність цих сигналів

$$I_{1-2} = I_1 + I_2 \text{ (для некогерентних)}$$

або

$$I_{1-2} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \text{ (для когерентних).}$$

Знаходимо сумарний рівень інтенсивності (дорівнює рівню звукового тиску)

$$L_{1-2, \text{дБ}} = 10 \lg \frac{I_{1-2}}{I_0}.$$

За допомогою кривих рівної гучності визначаємо сумарний рівень гучності

$$L_{1-2, \text{дБ}} \Rightarrow G, \text{ фон.}$$

Переходимо від сумарного рівня гучності до сумарної гучності

$$G, \text{ фон} \Rightarrow S, \text{ сон.}$$

**2. Якщо сигнали мають частоти, що знаходяться в сусідніх критичних смугах** (див. додаток Б).

В цьому випадку сумарна гучність дорівнює сумі гучності кожної із складових.

Алгоритм розрахунку:

$$L_{1, \text{дБ}} \Rightarrow G_1, \text{ фон} \Rightarrow S_1, \text{ сон.}$$

$$L_{2, \text{дБ}} \Rightarrow G_2, \text{фон} \Rightarrow S_2, \text{сон.}$$

Сумарна гучність

$$S_{1-2} = S_1 + S_2.$$

**3. Якщо частоти різних сигналів рознесені по частоті один від одного досить далеко – на одну чи більше критичних смуг (див. додаток Б).**

В даному випадку сумарна гучність визначається за формулою:

$$S_{1-2} = S_{max} + 0,3 \sum_i S_i,$$

де  $S_{max}$  – гучність самого голосного звуку,  $\sum_i S_i$  – сума гучностей всіх інших сигналів.

### Приклади розв'язування задач

#### **Задача 3.1**

Визначити рівень гучності і гучність тонального сигналу частотою 300 Гц, якщо він створює тиск 0,2 Па.

#### **Розв'язання**

$$L = 20 \lg \frac{P}{P_0} = 20 \lg \frac{0,2}{2 \cdot 10^{-5}} = 80 \text{ дБ.}$$

За кривими рівної гучності визначаємо, що

$$G = 80 \text{ фон.}$$

За графіком, що пов'язує рівень гучності і гучність, визначаємо, що

$$S = 16 \text{ сон.}$$

Оскільки рівень гучності

$$G = 80 > 40,$$

можна було скористатися формулою:

$$S = 2^{\frac{G-40}{10}}.$$

**Відповідь:**  $G = 80$  фон;  $S = 16$  сон.

### **Задача 3.2**

Гучність тонального сигналу частотою 30 Гц дорівнює 16 сон. Визначити звуковий тиск. У скільки разів голосніше звучало б це джерело звуку, якби воно працювало на частоті 1000 Гц?

#### **Розв'язання**

З формули

$$S = 2^{\frac{G-40}{10}}$$

отримуємо, що

$$G = 10\log_2 S + 40 = 10\log_2 16 + 40 = 80 \text{ фон.}$$

За кривими рівної гучності визначаємо, що цьому рівню гучності відповідає рівень звуку  $L = 90$  дБ.

В свою чергу,

$$L = 20 \lg \frac{P}{P_0},$$

звідки

$$P = P_0 \cdot 10^{\frac{L}{20}} = 2 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{\frac{90}{20}} = 0,63 \text{ Па.}$$

На частоті 1 кГц рівню звуку 90 дБ відповідає рівень гучності  $G_2 = 90$  фон, що рівносильно гучності  $S_2 = 32$  сона.

Т.ч.,

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{32}{16} = 2.$$

**Відповідь:**  $P = 0,63$  Па; в два рази.

### **Задача 3.3**

Визначити сумарну гучність двох тональних некогерентних сигналів з частотами 220 Гц і 225 Гц і рівнями відповідно 50 дБ і 40 дБ.

### **Розв'язання**

Сигнали знаходяться в одній частотній групі. Оскільки сигнали некогерентні, то

$$I_{1-2} = I_1 + I_2.$$

$$L_1 = 10 \lg \frac{I_1}{I_0};$$

$$I_1 = I_0 \cdot 10^{\frac{L_1}{10}} = 10^{-12} \cdot 10^5 = 10^{-7} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

$$L_2 = 10 \lg \frac{I_2}{I_0};$$

$$I_2 = I_0 \cdot 10^{\frac{L_2}{10}} = 10^{-12} \cdot 10^4 = 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

$$I_{1-2} = I_1 + I_2 = 10^{-7} + 10^{-8} = 11 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

$$L_{1-2} = 10 \lg \frac{I_{1-2}}{I_0} = 10 \lg \frac{11 \cdot 10^{-8}}{10^{-12}} = 50,4 \text{ дБ}.$$

За кривими рівної гучності цьому рівню відповідає рівень гучності

$$G_{1-2} = 40 \text{ фон}.$$

За графіком, що пов'язує рівень гучності і гучність, визначаємо, що

$$S_{1-2} = 1 \text{ сон}.$$

**Відповідь:**  $S_{1-2} = 1 \text{ сон}.$

### **Задача 3.4**

Визначити результуючу гучність двох тональних сигналів з частотами 250 Гц і 300 Гц і рівнями відповідно 50 дБ і 60 дБ.

### **Розв'язання**

Дані сигнали знаходяться в сусідніх частотних групах

$$S_{1-2} = S_1 + S_2.$$

За кривими рівної гучності рівню  $L_1 = 50 \text{ дБ}$  відповідає рівень гучності

$$G_1 = 40 \text{ фон}.$$

За графіком, що пов'язує рівень гучності і гучність, визначаємо, що

$$S_1 = 1 \text{ сон.}$$

Аналогічно,

$$L_2 = 60 \text{ дБ} \rightarrow G_2 = 55 \text{ фон} \rightarrow S_2 = 3 \text{ сона.}$$

$$S_{1-2} = 1 + 3 = 4 \text{ сона.}$$

**Відповідь:**  $S_{1-2} = 4$  сона.

### Задача 3.5

Визначити гучність спільного звучання двох сигналів

$$p_1 = 2 \cdot 10^{-3} \sin(2\pi \cdot 500t);$$

$$p_2 = 2 \cdot 10^{-4} \sin(2\pi \cdot 3000t). [2]$$

### Розв'язання

Дані сигнали знаходяться в різних частотних групах (рознесені по частоті більше ніж на одну критичну смугу), оскільки  $f_1 = 500$  Гц і  $f_2 = 3000$  Гц. Тому

$$S_{1-2} = S_{max} + 0,3 \sum_i S_i.$$

$$L_1 = 20 \lg \frac{P_1}{P_0} = 20 \lg \frac{2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-5}} = 40 \text{ дБ.}$$

За графіком кривих рівної гучності визначаємо, що цьому рівню звуку відповідає рівень гучності  $G_1 = 36$  фон.

Аналогічно, для другого сигналу,

$$L_2 = 20 \lg \frac{P_2}{P_0} = 20 \lg \frac{2 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 10^{-5}} = 20 \text{ дБ} \rightarrow G_2 = 24 \text{ фона.}$$

Гучності сигналів дорівнюють відповідно

$$S_1 = 0,7 \text{ сон; } S_2 = 0,35 \text{ сон.}$$

Тоді

$$S_{1-2} = 0,7 + 0,3 \cdot 0,35 = 0,805 \text{ сон.}$$

**Відповідь:**  $S_{1-2} = 0,805$  сон.

## Задачі для самостійного розв'язку

1. Визначити гучність:

1) За рівнем гучності сигналу, якщо  $G_1 = 50$  фон;  $G_2 = 40$  фон;  $G_3 = 30$  фон.

2) За рівнем сигналу і частотою, якщо  $L_1 = 80$  дБ,  $f_1 = 150$  Гц;  $L_2 = 40$  дБ,  $f_2 = 1000$  Гц;  $L_3 = 60$  дБ,  $f_3 = 4000$  Гц.

Відповідь: 1) 2 сона; 1 сон; 0,5 сона.

2) 8 сон; 1 сон; 4,9 сона.

2. Визначити гучність тонального сигналу частотою 50 Гц при силі звуку  $10^{-4} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ . У скільки разів гучніше було б джерело звуку на частоті 1 кГц?

Відповідь: 4 сона; в 4 рази.

3. Рівні інтенсивностей тональних сигналів з частотами 350 і 1000 Гц дорівнюють відповідно 30 дБ і 35 дБ. Визначити результуючу гучність.

Відповідь: 0,76 сона.

4. У концертному залі одночасно звучать бас-гітара, яка створює звуковий тиск 0,4 Па на частоті 100 Гц; електрогітара, що створює звуковий тиск 0,3 Па на частоті 500 Гц і співає вокаліст, який створює звуковий тиск 0,2 Па на частоті 1000 Гц. Визначити сумарну гучність в точці прослуховування.

Відповідь: 27,89 сон.

5. Визначити діапазон зміни гучності при прослуховуванні сигналів з частотами 220 Гц і 225 Гц і рівнями відповідно 50 дБ і 40 дБ [3].

Відповідь: 0,9...1 сон.

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 4

### МАСКУВАННЯ ЗВУКУ

#### Короткі теоретичні відомості

**Маскування** – це ефект, коли при одночасній дії на слух двох звуків один з них може не прослухуватися на фоні іншого [1].

Маскуючу дію різних звуків виявляють шляхом визначення підвищення порогу чутності досліджуваних тонів  $L_{ПЧ}$  відносно абсолютного порогу чутності  $L_{АПЧ}$  (поняття порогу чутності і рівня порогу чутності тотожні). Коефіцієнт маскування  $M$  розраховується в децибелах як різниця рівнів цих двох порогів

$$M = L_{ПЧ} - L_{АПЧ}.$$

**Криві маскування** (додаток В) – це графічне зображення залежності порогу чутності маскованого сигналу від його частоти при наявності маскуючого тону певної частоти та інтенсивності. Вони показують, наскільки потрібно підвищити рівень звукового сигналу на різних частотах, щоб він став чутним на фоні маскуючого звуку [1].

Вісь ординат – частота маскованого сигналу, вісь абсцис – рівень звукового тиску маскованого сигналу або поріг чутності. Кожна крива на графіках відповідає певному рівню маскуючого тону (наприклад, 40, 60, 80, 100 дБ).

#### Приклади розв'язування задач

##### **Задача 4.1**

Маскуючий тональний сигнал має частоту 400 Гц і рівень 60 дБ.

Визначити мінімальний рівень для тону частотою 800 Гц, який можна почути на фоні маскуючого сигналу.

### ***Розв'язання***

За графіком кривих маскуванія (додаток В) визначаємо

$$M = 40 \text{ дБ.}$$

На абсолютному порозі чутності рівень корисного сигналу частотою 800 Гц становить  $L_{\text{АПЧ}} = 2 \text{ дБ}$ .

Тоді

$$L_{\text{ПЧ}} = M + L_{\text{АПЧ}} = 40 + 2 = 42 \text{ дБ.}$$

***Відповідь:*** 42 дБ.

### ***Задача 4.2***

Корисний сигнал на частоті 1 кГц рівнем 60 дБ маскується тоном, що має частоту 200 Гц і рівень 40 дБ.

На скільки гірше при цьому буде чути сигнал? Визначити гучність звучання корисного сигналу на фоні завади.

### ***Розв'язання***

На скільки гірше буде чути сигнал на фоні завади показує коефіцієнт маскуванія. За графіком кривих маскуванія (додаток В) визначаємо

$$M = 7 \text{ дБ.}$$

Рівень корисного сигналу на фоні завади:

$$L = 60 - 7 = 53 \text{ дБ.}$$

Тоді

$$G = 53 \text{ фона.}$$

Гучність

$$S = 2^{\frac{G-40}{10}} = 2^{\frac{53-40}{10}} = 2,46 \text{ сона.}$$

***Відповідь:*** на 7 дБ; 2,46 сона.

### **Задача 4.3**

Завада має частоту 3600 Гц і рівень 100 дБ.

Знайти мінімальну гучність сигналу на частоті 1600 Гц, який можна буде почути на фоні цієї завади.

#### **Розв'язання**

За графіком кривих маскуванія (додаток В) для заданих параметрів завади ( $f = 3600$  Гц;  $L = 100$  дБ) на частоті корисного сигналу 1600 Гц визначаємо коефіцієнт маскуванія:

$$M = 12 \text{ дБ.}$$

На абсолютному порозі чутності рівень корисного сигналу частотою 1600 Гц становить

$$L_{\text{АПЧ}} = 2 \text{ дБ.}$$

Тоді

$$L_{\text{ПЧ}} = M + L_{\text{АПЧ}} = 12 + 2 = 14 \text{ дБ,}$$

що відповідає рівню гучності

$$G = 14 \text{ фон.}$$

За графіком, що пов'язує рівень гучності і гучність

$$S = 0,1 \text{ сона.}$$

**Відповідь:** 0,1 сона.

### **Задача 4.4**

Завада частотою 2400 Гц має силу звуку  $10^{-2}$  Вт/м<sup>2</sup>.

Знайти мінімальну інтенсивність сигналу з частотою 400 Гц, який можна почути на фоні цієї завади.

#### **Розв'язання**

Рівень завади, що відповідає інтенсивності звуку  $10^{-2}$  Вт/м<sup>2</sup>

$$L = 10 \lg \frac{I}{I_0} = 10 \lg \frac{10^{-2}}{10^{-12}} = 100 \text{ дБ.}$$

За графіком кривих маскуванн (додаток В) для заданих параметрів завади ( $f = 2400$  Гц;  $L = 100$  дБ) на частоті корисного сигналу  $400$  Гц визначаємо коефіцієнт маскуванн:

$$M = 2 \text{ дБ.}$$

На абсолютному порозі чутності рівень корисного сигналу частотою  $400$  Гц становить

$$L_{\text{АПЧ}} = 6 \text{ дБ.}$$

Тоді

$$L_{\text{ПЧ}} = M + L_{\text{АПЧ}} = 2 + 6 = 8 \text{ дБ.}$$

З іншого боку

$$L_{\text{ПЧ}} = 10 \lg \frac{I_{\text{min}}}{I_0}.$$

Мінімальна інтенсивність сигналу

$$I_{\text{min}} = I_0 \cdot 10^{\frac{L_{\text{ПЧ}}}{10}} = 10^{-12} \cdot 10 = 10^{-11} \text{ Вт/м}^2.$$

**Відповідь:**  $10^{-11}$  Вт/м<sup>2</sup>.

### Задачі для самостійного розв'язку

1. Маскуючий тон частотою  $1000$  Гц має рівень  $80$  дБ. Корисний сигнал на частоті  $2500$  Гц має рівень  $70$  дБ.

Чи буде чутний корисний сигнал на фоні маскуючого тону?

Відповідь: сигнал буде чутним.

2. Два тональні сигнали звучать одночасно. Перший має частоту  $500$  Гц і рівень  $50$  дБ, другий – частоту  $4000$  Гц і невідомий рівень.

Який максимальний рівень може мати другий сигнал, щоб він був повністю замаскований першим сигналом?

Відповідь:  $L_{\text{max}} \leq 15$  дБ.

3. На частоті 600 Гц діє маскуючий тональний сигнал рівнем 70 дБ. Корисний сигнал на частоті 1800 Гц повинен мати гучність не менше 1 сона.

Який мінімальний рівень звукового тиску необхідний для корисного сигналу, щоб забезпечити задану гучність на фоні завади?

Відповідь:  $L_{min} = 58$  дБ.

4. Шумова завада має широкий спектр з максимумом на частоті 800 Гц і рівнем 85 дБ. Необхідно передати корисний сигнал на частоті 3200 Гц.

Визначити мінімальний рівень корисного сигналу для його чутності, а також гучність і силу звуку цього сигналу при мінімальному рівні.

Відповідь:  $L_{min} = 52$  дБ;  $S = 0,7$  сона;  $I = 1,6 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ .

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 5

### ВИСОТА ЗВУКУ

#### Короткі теоретичні відомості

**Висота звуку** – це суб'єктивна характеристика, яку використовують для кількісної оцінки частотної вибірковості слухового аналізатора. Сприйняття висоти залежить від частоти, інтенсивності (гучності) звуку, його спектрального складу і тривалості [1].

При будь-якому абсолютному значенні частоти звуку  $f$  однакові відносні зміни частоти створюють відчуття однакового приросту висоти.

**Октава** – одиниця висоти тону.

В октаві співвідношення частот становить  $f_г / f_н = 2 : 1$ .

Для напівоктави  $f_г / f_н = \sqrt{2}$ .

Октава складається з 12 напівтонів.

Для напівтону:  $f_г / f_н = \sqrt[12]{2}$ .

Якщо задано число октав  $n$ , то  $f_г / f_н = 2^n$ .

Частотний інтервал в октавах

$$n = 3,33 \lg \frac{f_г}{f_н}$$

Таким чином, сприйняття висоти тону пропорційне логарифму зміни частоти звуку.

Область придатності логарифмічного закону обмежена третьою октавою (1048 Гц). Тому розрізняють два види октав: **гармонічну** (точно по формулах) і **мелодійну**, коли октава визначається на слух [3].

**Гармонічна висота тону.** Вимірюється в Гц і гармонічних октавах. За нуль октав прийнята частота ноти до малої октави, частота якої 131 Гц.

**Мелодійна висота тону.** Вимірюється в мелах і мелодійних октавах.

До частоти 500 Гц мелодійні октави не відрізняються від гармонічних. Понад 500 Гц мелодійна октава не дорівнює відношенню частот 1:2 і у верхній

частині діапазону складає 1:10. Тому в якості суб'єктивної одиниці висоти тону була прийнята величина *мел*. Вважають, що частоті 315 Гц відповідає 315 мел. Залежність між цими величинами лінійна приблизно до 2000 Гц (рис. 5.1). Далі ця залежність стає різко нелінійною. Висота тону в мел не перевищує 3000. За нуль мелодічних октав прийнята висота тона 131 мел.

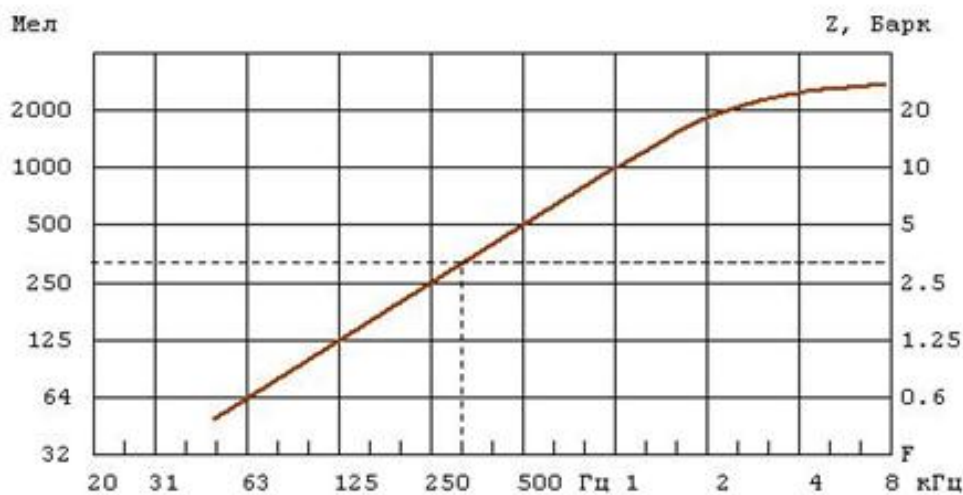


Рис. 5.1. Залежність висоти тону в мелах від частоти [3]

### Приклади розв'язування задач

#### Задача 5.1

Визначити кількість гармонічних октав в діапазоні частот від 16 Гц до 16 кГц.

#### Розв'язання

Співвідношення частот в октаві

$$\frac{f_{\text{в}}}{f_{\text{н}}} = 2.$$

Для смуги частот 16...32 Гц

$$\frac{32}{16} = 2^1 \text{ — одна октава.}$$

Для смуги частот 16...64 Гц

$$\frac{64}{16} = 2^2 \text{ — дві октави.}$$

Для смуги частот 16...128 Гц

$$\frac{128}{16} = 2^3 - \text{три октави.}$$

.....

Загальний випадок:

$$\frac{f_{\text{В}}}{f_{\text{Н}}} = 2^n.$$

$$\frac{16 \cdot 10^3}{16} = 2^n;$$

$$10^3 = 2^n;$$

Логарифмуємо ліву і праву частини:

$$\lg 10^3 = \lg 2^n;$$

$$3 \lg 10 = n \lg 2;$$

$$n = 10.$$

**Відповідь:**  $n = 10$ .

### **Задача 5.2**

Частота ноти "ля" першої октави становить 440 Гц. Визначте частоти цієї ноти у другій та третій октавах.

**Розв'язання:**

$f_1 = 440$  Гц (перша октава). Для октави справедливо співвідношення:  $f_2/f_1 = 2^n$

Друга октава ( $n = 1$ ):  $f_2 = f_1 \cdot 2 = 440 \cdot 2 = 880$  Гц;

Третя октава ( $n = 2$ ):  $f_3 = f_1 \cdot 2^2 = 440 \cdot 4 = 1760$  Гц;

**Відповідь:**  $f_2 = 880$  Гц,  $f_3 = 1760$  Гц.

### **Задача 5.3**

Обчисліть частоту ноти "фа-дієз", якщо відомо, що нота "фа" має частоту 349 Гц, а "фа-дієз" відрізняється від ноти "фа" на півтону.

**Розв'язання:**

Для октави:  $f_2/f_1 = 2$ . Октава складається з 12 напівтонів.

Якщо ми починаємо з частоти  $f_1$  і хочемо дійти до частоти  $f_2 = 2f_1$  (октава вище), пройшовши 12 рівних кроків (напівтонів), то кожен крок множить попередню частоту на деякий коефіцієнт  $k$  (коефіцієнт для напівтону). Тоді:

після 1-го напівтону:  $f_1 \cdot k$

після 2-го напівтону:  $f_1 \cdot k \cdot k = f_1 \cdot k^2$

після 3-го напівтону:  $f_1 \cdot k^3$

.....

після 12-го напівтону:  $f_1 \cdot k^{12}$

Після 12 напівтонів ми маємо дійти до октави, тобто до  $2f_1$ . Тому

$$f_1 \cdot k^{12} = 2f_1.$$

Звідки  $k = \sqrt[12]{2}$ .

Таким чином, при зміні на один напівтон частота збільшується у 1,06 разів.

Частота ноти "фа-дієз":  $f = 349 \cdot \sqrt[12]{2} = 369,8 \text{ Гц} \approx 370 \text{ Гц}$ .

**Відповідь:**  $f \approx 370 \text{ Гц}$ .

#### **Задача 5.4**

Визначити смугу пропускання і середню частоту третиннооктавного фільтра, у якого нижня частота дорівнює 16 Гц.

**Розв'язання:**

Для третиннооктавного фільтра:

$$\frac{f_{\text{В}}}{f_{\text{Н}}} = \sqrt[3]{2} \approx 1,26;$$

$$f_{\text{В}} = 1,26f_{\text{Н}} = 1,26 \cdot 16 = 20,16 \text{ Гц};$$

$$\Delta f = f_{\text{В}} - f_{\text{Н}} = 20,16 - 16 = 4,16 \text{ Гц};$$

$$f_{\text{сер}} = \sqrt{f_{\text{В}} \cdot f_{\text{Н}}} = \sqrt{20,16 \cdot 16} \approx 18 \text{ Гц.}$$

**Відповідь:**  $\Delta f = 4,16 \text{ Гц}; f_{\text{сер}} \approx 18 \text{ Гц.}$

### **Задача 5.5**

Визначити частоту, що відповідає абсолютній гармонічній висоті тону в 4 октави.

#### **Розв'язання:**

Нуль октав – це 131 Гц. Частота четвертої октави:

$$f = 131 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 = 131 \cdot 2^4 = 2096 \text{ Гц.}$$

**Відповідь:** 2096 Гц.

### **Задачі для самостійного розв'язку**

1. Визначити смугу пропускання і середню частоту октавного фільтра, у якого нижня частота дорівнює 16 Гц.

Відповідь:  $\Delta f = 16 \text{ Гц}; f_{\text{сер}} = 22,6 \text{ Гц.}$

2. Визначити кількість напівоктавних фільтрів і граничні частоти цих фільтрів, якщо відомо, що вони перекривають діапазон частот від 200 Гц до 800 Гц.

Відповідь:  $n = 4$ ; 200 Гц і 282,8 Гц; 282,8 і 400 Гц; 400 Гц і 565,7 Гц; 565,7 Гц і 800 Гц.

3. Камертон дає тон з гармонічною висотою 1,75 октави. Розрахувати його частоту.

Відповідь: 440 Гц.

4. Знайти абсолютну гармонічну і абсолютну мелодійну висоту тона частоти 524 Гц.

Відповідь: 2 октави; 524 мела.

5. Найнижча нота діапазону співака-баса має частоту 82 Гц. Визначте максимальну частоту його голосу, якщо він охоплює: а) одну октаву; б) дві октави; в) три октави. Для випадку трьох октав визначте діапазон голосу в мелах.

Відповідь: а) 164 Гц; б) 328 Гц; в) 656 Гц; 574 мела.

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 6

### МОДЕЛЮВАННЯ ВІДДІЛІВ СЛУХОВОЇ СИСТЕМИ ЛЮДИНИ

#### Короткі теоретичні відомості

Проектування сучасних діагностичних пристроїв для аудіологічних досліджень, розробка слухових апаратів та систем обробки звуку потребує глибокого розуміння принципів функціонування слухової системи людини. Моделювання окремих відділів слухової системи дозволяє розробляти методи об'єктивної діагностики, оцінювати передачу звуку та виявляти патологічні зміни, прогнозувати результати хірургічних втручань, оптимізувати конструкції слухових апаратів та імплантатів, створювати алгоритми стиснення аудіосигналів, а також досліджувати механізми слухового сприйняття.

Під час моделювання відділи слухової системи представляють електричними схемами, елементи яких імітують поведінку звукових хвиль у відповідних ділянках слухової системи. Наприклад, модель зовнішнього вуха являє собою еквівалентну електричну схему, яка описує акустичні процеси у зовнішньому слуховому проході. Ця модель повинна відтворювати частотну (передатну) характеристику зовнішнього вуха, тобто відображати перетворення звукового тиску від зовнішнього слухового проходу до барабанної перетинки. Частотна характеристика визначається резонансними властивостями повітряного стовпа у вушному каналі та акустичним імпедансом барабанної перетинки. Тому зовнішнє вухо описується резонансною  $RLC$ -схемою, в якій опір  $R$  моделює акустичні втрати та демпфування у вушному каналі; індуктивність  $L$  відповідає інерційним властивостям повітряної маси у каналі; ємність  $C$  характеризує пружність повітряного об'єму та податливість барабанної перетинки. При певних співвідношеннях параметрів  $R$ ,  $L$ ,  $C$  система утворює резонанс, що проявляється у вираженому підйомі передатної характеристики в діапазоні частот 2-5 кГц. Цей резонанс відповідає максимальній чутливості людського слуху і є найбільш важливим для сприйняття мовлення.

Сигнал  $U_1$  на вході схеми відповідає звуковому тиску на вході у зовнішній слуховий прохід, сигнал  $\dot{U}_2$  на виході – звуковий тиск на барабанній перетинці. Передатна функція  $K_U(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}$  описує, як посилюються або послаблюються складові звукового сигналу на різних частотах.

Моделювання середнього вуха людини базується на представленні його як складної механо-акустичної системи передачі звукових коливань. Ця система складається з двох взаємопов'язаних частин – механічної, яку формують барабанна перетинка і слухові кісточки (молоточок, коваделко, стремінце), та акустичної, до якої належать барабанна порожнина і слухова труба, що забезпечують вирівнювання тиску повітря, необхідне для нормальної роботи системи [4].

У моделях середнього вуха кожна анатомічна структура представляється через відповідні фізичні параметри. Маса (інерційність) відповідає масі слухових кісточок та окремих ділянок барабанної перетинки; жорсткість (пружність) характеризує пружні властивості барабанної перетинки, зв'язок кісточок та стінок барабанної порожнини; демпфування (втрати) описує розсіювання енергії через тертя, в'язкість та інші механізми втрат.

Для математичного опису передачі звуку через середнє вухо використовують еквівалентні електричні схеми, в яких механічні та акустичні параметри представлені електричними елементами за принципом електромеханічних аналогій. Такий підхід дозволяє розраховувати імпеданси окремих компонентів та аналізувати частотні характеристики системи [4, 5].

Еквівалентна електрична схема середнього вуха включає два зв'язані контури – послідовний і паралельний. Послідовний контур моделює основний шлях передачі коливань і складається з індуктивності  $L$  – маси слухових кісточок; ємності  $C_1$  – податливості барабанної перетинки; опору  $R$  – втрат енергії через демпфування. Паралельний контур описує вплив барабанної порожнини і слухової труби. Ємність  $C_2$  моделює гнучкість повітряного об'єму

барабанної порожнини; індуктивності  $L_2$  – еквівалентна маса повітря в слуховій трубі.

Моделювання внутрішнього вуха, зокрема завитки, є найскладнішим та найбільш дискусійним питанням в акустиці слуху та психоакустиці. На сьогодні не існує єдиної загальноприйнятої моделі, яка б повністю описувала всі аспекти функціонування цієї структури – від гідродинамічних процесів у рідинах завитки та механіки базилярної мембрани до електромеханічного перетворення в волоскових клітинах та нейронного кодування сигналу. Дослідники пропонують різноманітні підходи до моделювання: від спрощених одновимірних моделей, що описують розподіл коливань вздовж базилярної мембрани, до складних тривимірних гідромеханічних моделей з активним зворотним зв'язком від зовнішніх волоскових клітин, кожна з яких має свої переваги та обмеження залежно від конкретних завдань дослідження.

## Приклади розв'язування задач

### Задача 6.1

Обчислити параметри еквівалентної схеми зовнішнього вуха людини для частоти резонансу  $f_0 = 4$  кГц і  $R_n = 2$  кОм.

Побудувати графіки частотної залежності модуля і аргумента передатної функції даної схеми.

#### ***Розв'язання:***

На рис. 6.1 показана еквівалентна схема зовнішнього вуха людини.

Параметри моделі визначаються за формулами:

$$R_r = R_n = 2 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

$$L = \frac{2R_n}{\pi f_0} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 10^3}{\pi \cdot 4 \cdot 10^3} = \frac{1}{\pi} \approx 0,32 \text{ Гн};$$

$$C = \frac{1}{8\pi f_0 R_H} = \frac{1}{8 \cdot \pi \cdot 4 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^3} = 4,97 \cdot 10^{-9} \text{ Ф};$$

$$R = 6R_H = 6 \cdot 2 \cdot 10^3 \text{ Ом.}$$

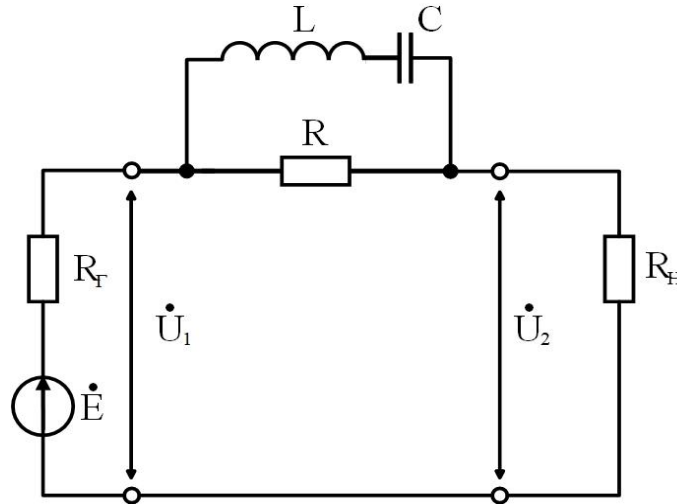


Рис. 6.1. Схема електричного кола, передатна характеристика якої дорівнює частотній характеристиці коефіцієнта передачі зовнішнього вуха

Комплексна передатна характеристика електричного кола:

$$K_U(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}, \quad (6.1)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{i}R_H = \frac{\dot{U}_1}{Z_{\text{зар}}}R_H, \quad (6.2)$$

$$Z_{\text{зар}} = R_H + \frac{\left(j\omega L + \frac{1}{j\omega C}\right)R}{j\omega L + \frac{1}{j\omega C} + R}. \quad (6.3)$$

Після підстановки (6.3) в (6.2), а потім в (6.1), отримаємо вираз для комплексної передатної характеристики електричного кола, представленого на рис. 6.1:

$$K_U(j\omega) = \frac{R_H}{R_H + \frac{j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)R}{j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) + R}}$$

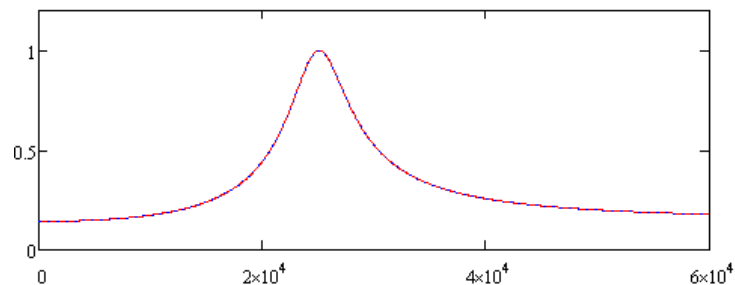
Як відомо з теорії комплексних чисел, модуль комплексного числа знаходять за формулою

$$A = |\dot{A}| = \sqrt{(Re(\dot{A}))^2 + (Im(\dot{A}))^2}, \quad (6.4)$$

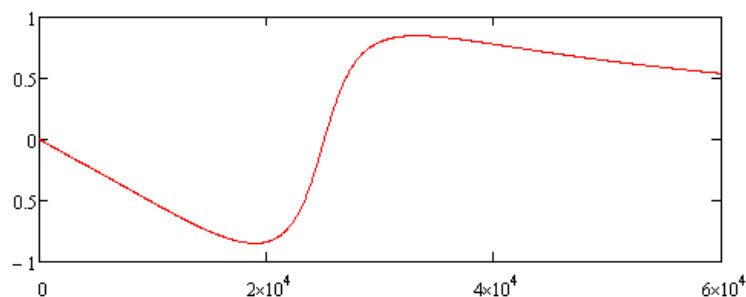
а аргумент

$$\varphi = \arctg \frac{Im(\dot{A})}{Re(\dot{A})}. \quad (6.5)$$

Графіки частотної залежності модуля (амплітудно-частотна характеристика (АЧХ)) і аргументу (фазо-частотна характеристика (ФЧХ)) передатної функції еквівалентної схеми зовнішнього вуха людини наведені на рис. 6.2.



а



б

Рис. 6.2. Амплітудно-частотна (а) та фазо-частотна (б) характеристики еквівалентної схеми зовнішнього вуха людини

### Задача 6.2

Розрахувати параметри еквівалентної схеми середнього вуха людини на частоті  $f_1 = 1$  кГц.

#### Розв'язання:

На рис. 6.3 показана еквівалентна електрична схема середнього вуха людини.

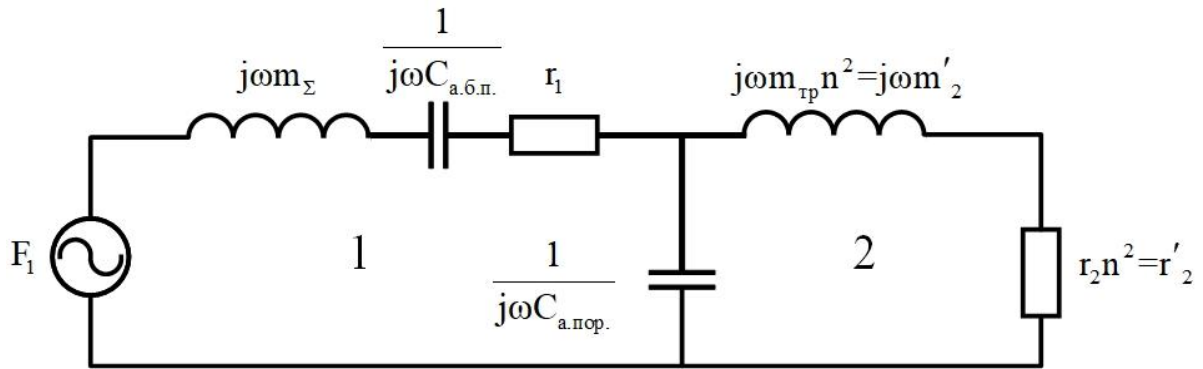


Рис. 6.3. Схема електричного аналога середнього вуха людини

Проведемо розрахунок цієї схеми.

$$\omega m_{\Sigma} = 2\pi f_1 (m_{\text{мол}} + m_{\text{к}} + m_{\text{с}} + m_{\text{б.п.}}), \quad (6.6)$$

де  $m_{\text{мол}} = 25$  мГ – маса молоточка,  $m_{\text{к}} = 30$  мГ – маса коваделка,  $m_{\text{с}} = 4$  мГ – маса стремінця,  $m_{\text{б.п.}}$  – маса барабанної перетинки.

$$m_{\text{б.п.}} = \delta S_{\text{б.п.}} \rho = \delta \pi a^2 \rho, \quad (6.7)$$

де  $\delta = 0,074$  мм – товщина барабанної перетинки;  $a = 5,5$  мм – усереднене значення радіуса барабанної перетинки;  $\rho = 10^3$  кг/м<sup>3</sup> – густина.

Підставивши всі числові дані в формули (6.6) і (6.7), отримаємо, що

$$\omega m_{\Sigma} \approx 0,4 \text{ кг/с.}$$

Розрахуємо  $C_{\text{а.б.пор.}}$  і  $C_{\text{а.б.п.}}$  – акустичні гнучкості барабанної порожнини і перетинки відповідно.

$$C_{a.б.пор.} = \frac{V_{б.пор.}}{\rho_0 c_0^2 S_{б.пор.}^2} = 0,8 \cdot 10^{-3} \frac{М}{Н}. \quad (6.8)$$

В формулі (6.8) використані наступні числові значення фізичних величин:  $V_{б.пор.} = 1 \text{ см}^3$  – фізичний об'єм барабанної порожнини;  $\rho_0 = 1,2 \text{ кг/м}^3$  – густина повітря;  $c_0 = 340 \text{ м/с}$  – швидкість звуку в повітрі;  $S_{б.пор.} = S_{б.п.}$  – площа перерізу барабанної порожнини.

$$C_{a.б.п.} = \frac{V_{б.п.}}{\rho_0 c_0^2 S_{б.п.}^2} = 0,35 \cdot 10^{-3} \frac{М}{Н}. \quad (6.9)$$

В формулі (6.9)  $V_{б.п.}$  – еквівалентний об'єм барабанної перетинки. Значення визначаються експериментально за тимпанограмами. В табл. 6.1 наведені еквівалентні об'єми в максимумі тимпанограми і при нульовому тиску.

Таблиця 6.1

Експериментальні значення параметрів барабанної перетинки для розрахунків

$f, \text{ Гц}$	226	660	1000
$V_{б.п.}, \text{ см}^3$	0,54	0,57; 0,67	0,44; 0,54
$Z_a \cdot 10^{-8}, \text{ кг/с} \cdot \text{ м}^4$	1,79	0,59; 0,5	0,5; 0,41

Враховуючи (6.8) і (6.9), отримаємо:

$$\frac{1}{\omega_1 \cdot C_{a.б.пор.}} = 0,2 \frac{\text{кг}}{\text{с}};$$

$$\frac{1}{\omega_1 \cdot C_{a.б.п.}} = 0,9 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Опір втрат внаслідок передачі звукової енергії через систему звукових кісточок у внутрішнє вухо

$$r_1 = \frac{\rho_0 \cdot c_0^2}{\omega_p \cdot V_{б.п.}(\omega_p)} = 0,5 \cdot 10^8 \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{ м}^4}.$$

Маса повітря, що рухається як єдине ціле, в євстахієвій трубці

$$m_{\text{тр}} = \rho_0 V_{\text{тр}} = 4,15 \cdot 10^{-7} \text{ кг},$$

де  $V_{\text{тр}} = \frac{1}{3} S_0 l_{\text{тр}} = 345 \text{ мм}^3$ , оскільки площа отвору з барабанної порожнини в євстахієву трубку згідно вихідних даних дорівнює  $S_0 = 28 \text{ мм}^2$ , довжина євстахієвої трубки становить  $l_{\text{тр}} = 37 \text{ мм}$ .

Коефіцієнт трансформації

$$n = \frac{S_{\text{б.п.}}}{S_0} = \frac{95 \cdot 10^{-6}}{28 \cdot 10^{-6}} \approx 3,4.$$

Тоді

$$\omega_1 \cdot m_{\text{тр}} \cdot n^2 = 4,5 \cdot 10^{-2} \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Опір втрат повітря, що коливається, на тертя об стінки євстахієвої труби

$$r_2 = \frac{\rho_0}{4\pi c_0} \omega_1^2 S_0^2 = 8,69 \cdot 10^{-2} \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}.$$

$$r_2 \cdot n^2 = 100,5 \cdot 10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}.$$

### Задачі для самостійного розв'язку

1. Зовнішнє вухо людини представлено у вигляді резонансного  $RLC$ -контуру, підключеного до джерела з внутрішнім опором  $R_r = 1 \text{ кОм}$  і навантаженням  $R_n = 2 \text{ кОм}$ . Резонансна частота слухового проходу  $f_0 = 3 \text{ кГц}$ , ємність еквівалентної схеми  $C = 5 \text{ нФ}$ , добротність контуру  $Q = 2$ .

Визначити:

- а) індуктивність  $L$  і опір  $R$  еквівалентної схеми;
- б) індуктивний і ємнісний опори на резонансній частоті;
- в) повний еквівалентний опір схеми  $Z_{\text{заг}}$  на резонансній частоті;
- г) коефіцієнт передачі за напругою  $K_U$  на резонансній частоті.

Відповідь: а)  $L = 0,56$  Гн;  $R = 5,3$  кОм; б)  $X_L = X_C \approx 10,6$  кОм; в)  $Z_{\text{заг}} \approx 8,3$  кОм; г)  $K_U \approx 0,24$ .

2. Барабанна порожнина має об'єм  $V_{\text{б.пор.}} = 0,9$  см<sup>3</sup>, площа барабанної перетинки  $S_{\text{б.п.}} = 90$  мм<sup>2</sup>. Еквівалентний об'єм барабанної перетинки  $V_{\text{б.п.}} = 0,50$  см<sup>3</sup>. Євстахієва труба має площу отвору  $S_0 = 25$  мм<sup>2</sup> та довжину  $l_{\text{тр}} = 35$  мм.

Визначити акустичну гнучкість барабанної порожнини  $C_{\text{а.б.пор.}}$  і барабанної перетинки  $C_{\text{а.б.п.}}$ ; коефіцієнт трансформації  $n$  між барабанною перетинкою та євстахієвою трубою; об'єм євстахієвої труби  $V_{\text{тр.}}$ .

Відповідь: а)  $C_{\text{а.б.пор.}} = 0,8 \cdot 10^{-3}$  м/Н;  $C_{\text{а.б.п.}} = 0,45 \cdot 10^{-3}$  м/Н;  $n = 3,6$ ;  $V_{\text{тр.}} = 291,7$  мм<sup>3</sup>.

3. Для моделі середнього вуха на частоті  $f = 1$  кГц відомі наступні параметри: акустична гнучкість барабанної перетинки  $C_{\text{а.б.п.}} = 0,4 \cdot 10^{-3}$  м/Н, еквівалентний об'єм барабанної перетинки  $V_{\text{б.п.}} = 0,48$  см<sup>3</sup>, маса повітря в євстахієвій трубці  $m_{\text{тр}} = 4 \cdot 10^{-7}$  кг, коефіцієнт трансформації  $n = 3,2$ .

Визначити:

а) опір  $\frac{1}{\omega \cdot C_{\text{а.б.п.}}}$  на робочій частоті;

б) опір втрат  $r_1$  внаслідок передачі звукової енергії у внутрішнє вуха;

в) приведений опір маси повітря євстахієвої труби  $\omega \cdot m_{\text{тр}} \cdot n^2$  на робочій частоті;

г) порівняти значення опорів із п. а) і п. в) і зробити висновок про домінуючий характер опору.

Відповідь: а) 0,398 кг/с; б)  $4,6 \cdot 10^7$  кг/(с·м<sup>4</sup>); в) 0,026 кг/с; г) ємнісний опір у 15 разів більший, переважає пружний характер.

4. Середнє вуха людини має наступні параметри: маса молоточка  $m_{\text{мол}} = 23$  мг, маса коваделка  $m_{\text{к}} = 28$  мг, маса стремінця  $m_{\text{с}} = 3,5$  мг. Барабанна перетинка має радіус 5,2 мм та товщину 0,070 мм.

Визначити:

- а) масу барабанної перетинки  $m_{б.п.}$ ;
- б) сумарну приведену масу системи слухових кісточок разом з барабанною перетинкою;
- в) значення параметра  $\omega m_{\Sigma}$  на частоті 1 кГц;
- г) як зміниться  $\omega m_{\Sigma}$ , якщо частота збільшиться до 2 кГц?

Відповідь: а) 5,95 мг; б) 60,45 мг; в) 0,380 кг/с; г) 0,760 кг/с (збільшилася в 2 рази).

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 7

### ЗВУКИ МОВИ ТА ЇХ ФІЗИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

#### Короткі теоретичні відомості

Мовлення людини є складним акустичним процесом, що виникає в результаті взаємодії дихальної системи, голосових зв'язок та резонаторів мовного тракту. З фізичної точки зору мовні звуки являють собою пружні хвилі, які поширюються в повітрі у вигляді коливань тиску. Основними фізичними параметрами звуку є частота, період коливань, довжина хвилі, амплітуда та інтенсивність. Ці величини визначають висоту, гучність і тембр звуку.

Під час мовлення повітряний потік із легень проходить через голосові зв'язки, які знаходяться у гортані. Під дією повітряного потоку зв'язки починають періодично відкриватися і закриватися, утворюючи коливання повітряного тиску. Частота цих коливань називається *основною частотою голосу*  $f_0$ . Вона визначає висоту голосу людини. Основна частота пов'язана з періодом коливань голосових зв'язок  $T$  [3]

$$T = \frac{1}{f_0}.$$

Під час поширення звуку в повітрі утворюється хвиля певної довжини. *Довжина хвилі* залежить від швидкості поширення звуку в середовищі та частоти коливань і визначається формулою

$$\lambda = \frac{c}{f},$$

де  $c$  – швидкість звуку в повітрі (приблизно 340 м/с),  $f$  – частота коливань.

Важливою характеристикою мовних звуків є *інтенсивність звуку*, яка визначає гучність сприйняття звуку.

Мовні звуки мають складний спектр. Основна частота, що виникає внаслідок коливань голосових зв'язок, супроводжується *гармоніками* – коливаннями з частотами, кратними основній. Якщо основна частота дорівнює

$f_0$ , то гармоніки матимуть частоти  $2f_0$ ;  $3f_0$ ;  $4f_0$ ; ..... Сукупність цих складових формує спектр голосу.

Особливу роль у формуванні тембру та розпізнаванні голосних звуків відіграють **форманти** – частоти резонансу голосового тракту. Значення формант залежать від конфігурації артикуляційних органів – положення язика, губ і нижньої щелепи і не залежать від висоти голосу ( $f_0$ ) [3]. Для голосних звуків найбільш важливими є перші дві форманти:  $F_1$  – пов’язана переважно з висотою підняття язика;  $F_2$  – характеризує передньо-заднє положення язика в ротовій порожнині. Саме сукупність значень  $F_1$  і  $F_2$  дозволяє розрізняти різні голосні звуки, наприклад [а], [і], [у]. Спектр голосного звуку складається з гармонік основної частоти, але найбільша енергія концентрується поблизу частот формант.

### Приклади розв’язування задач

#### Задача 7.1

Основна частота чоловічого голосу становить 120 Гц, жіночого – 220 Гц.

Визначте період коливань голосових зв’язок та довжину хвилі утвореного звуку для чоловічого та жіночого голосу; порівняйте отримані результати.

#### Розв’язання:

Період коливань чоловічих голосових зв’язок:

$$T_1 = \frac{1}{f_{01}} = \frac{1}{120} = 0,0083 \text{ с} \approx 8,3 \text{ мс.}$$

Період коливань жіночих голосових зв’язок:

$$T_2 = \frac{1}{f_{02}} = \frac{1}{220} = 0,0045 \text{ с} \approx 4,5 \text{ мс.}$$

Довжина хвилі для чоловічого голосу:

$$\lambda_1 = \frac{c}{f_{01}} = \frac{340}{120} = 2,83 \text{ м.}$$

Довжина хвилі для жіночого голосу:

$$\lambda_2 = \frac{c}{f_{02}} = \frac{340}{220} = 1,55 \text{ м.}$$

Для порівняння результатів знайдемо відношення

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{f_{02}}{f_{01}} = \frac{220}{120} = 1,83.$$

Чоловічий голос має період і довжину хвилі майже у 2 рази більшу, ніж жіночий.

**Відповідь:** 8,3 мс; 4,5 мс; чоловічий голос має період і довжину хвилі майже у 2 рази більшу, ніж жіночий.

### **Задача 7.2**

Під час спокійного мовлення на відстані 1 м від рота співрозмовника інтенсивність звуку становить  $I_1 = 10^{-6}$  Вт/м<sup>2</sup>. Під час крику інтенсивність зростає до значення  $I_2 = 10^{-3}$  Вт/м<sup>2</sup>.

Визначте:

- а) рівень звуку спокійного мовлення;
- б) рівень звуку під час крику;
- в) на скільки збільшується рівень звуку під час крику порівняно зі спокійним мовленням;
- г) на якій відстані інтенсивність крику дорівнюватиме інтенсивності спокійного мовлення на відстані 1 м?

### **Розв'язання:**

- а) Рівень звуку спокійного мовлення:

$$L_1 = 10 \lg \frac{I_1}{I_0} = 10 \lg \frac{10^{-6}}{10^{-12}} = 60 \text{ дБ.}$$

- б) Рівень звуку крику:

$$L_2 = 10 \lg \frac{I_2}{I_0} = 10 \lg \frac{10^{-3}}{10^{-12}} = 90 \text{ дБ.}$$

- в) Збільшення рівня звуку:

$$\Delta L = L_2 - L_1 = 90 - 60 = 30 \text{ дБ.}$$

Альтернативний спосіб:

$$\Delta L = 10 \lg \frac{I_2}{I_1} = 10 \lg \frac{10^{-3}}{10^{-6}} = 30 \text{ дБ.}$$

Збільшення на 30 дБ означає збільшення інтенсивності у 1000 разів, тобто крик у 1000 разів інтенсивніший за нормальне мовлення.

г) Для точкового джерела інтенсивність звуку обернено пропорційна квадрату відстані від джерела і дорівнює

$$I = \frac{P}{4\pi r^2},$$

де  $P$  – потужність джерела;  $r$  – відстань від джерела.

Для одного джерела на різних відстанях

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$$

$$r_2 = \sqrt{\frac{I_1 \cdot r_1^2}{I_2}} = \sqrt{\frac{10^{-3} \cdot 1}{10^{-6}}} = \sqrt{1000} \approx 31,6 \text{ м.}$$

**Відповідь:** а) 60 дБ; б) 90 дБ; в) на 30 дБ; г) 31,6 м.

### **Задача 7.3**

Під час вимови голосного звуку [а] основна частота голосу становить  $f_0 = 200$  Гц. Спектральний аналіз показує наявність гармонік з частотами 200 Гц, 400 Гц, 600 Гц, 800 Гц, 1000 Гц, 1200 Гц. Значення перших двох формант  $F_1 = 800$  Гц,  $F_2 = 1200$  Гц.

Визначте:

- а) номери гармонік, які потрапляють у діапазон першої форманти (700-900 Гц);
- б) номери гармонік у діапазоні другої форманти (1100-1300 Гц);
- в) які гармоніки будуть найбільш підсилені резонансами голосового тракту?;
- г) як зміниться спектр, якщо основна частота зросте до 400 Гц (дитячий голос)?

**Розв'язання:**

- а) Голосові зв'язки створюють гармонічний ряд частот

$$f_k = k \cdot f_0, k = 1, 2, 3, \dots$$

Підсилення тих гармонік, які збігаються з формантами, визначає тембр голосу.

Гармоніки в діапазоні першої форманти (700-900 Гц):

$k = 3: f_3 = 600$  Гц – не потрапляє;

$k = 4: f_4 = 800$  Гц – потрапляє в діапазон;

$k = 5: f_5 = 1000$  Гц – не потрапляє.

б) Гармоніки в діапазоні другої форманти (1100-1300 Гц):

$k = 6: f_6 = 1200$  Гц – потрапляє в діапазон.

в) Голосовий тракт діє як резонатор, посилюючи гармоніки, що потрапляють в формантну область. Найбільше будуть підсилені: 4-та гармоніка (800 Гц) – точно збігається з  $F_1$  і 6-та гармоніка (1200 Гц) – точно збігається з  $F_2$ . Це створює характерний тембр звуку [а].

г) Якщо  $f'_0 = 400$  Гц, то в діапазон першої форманти потрапляє гармоніка

$k = 2: f'_2 = 800$  Гц,

а в діапазон другої форманти потрапляє

$k = 3: f'_2 = 1200$  Гц.

При  $f_0 = 200$  Гц гармоніки розташовані через кожні 200 Гц. При  $f'_0 = 400$  Гц гармоніки розташовані через кожні 400 Гц – спектр стає "рідшим", менше гармонік потрапляє в діапазон формант.

**Відповідь:** а) четверта гармоніка; б) шоста гармоніка; в) четверта та шоста гармоніки; г) спектр стає рідшим, і в області формант присутня менша кількість гармонік.

#### **Задача 7.4**

Температурна залежність швидкості поширення звуку у повітрі описується емпіричним співвідношенням:

$$c = 331 + 0,6T,$$

де  $T$  – температура у  $^{\circ}\text{C}$ ,  $c$  – швидкість звуку у м/с [7].

Розрахувати, як змінюються формантні частоти при зміні температури повітря у голосовому тракті від  $20^{\circ}\text{C}$  (при вдиханні прохолодного повітря) до

37°C (нормальна температура в області гортані/трахеї). Зробити висновок, чи впливає температура тіла на акустичні властивості мовлення.

### ***Розв'язання***

Для моделі голосового тракту у вигляді труби, закритої з одного боку, формантні частоти визначаються за формулою:

$$f_n = \frac{(2n - 1)c}{4L},$$

де  $n = 1, 2, 3, \dots$  – номер резонансу;  $c$  – швидкість звуку в повітрі;  $L$  – довжина труби.

Для температури 20°C

$$c = 331 + 0,6 \cdot 20 = 343 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Для температури 37°C

$$c' = 331 + 0,6 \cdot 37 = 353,2 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Оскільки форманти прямопропорційні швидкості звуку, то їх відношення при підвищенні температури на 17°C дорівнює:

$$\frac{f'_n}{f_n} = \frac{c'}{c} = \frac{353,2}{343} = 1,03,$$

що становить 3% і відповідає межах природної варіативності мовлення однієї людини.

***Відповідь:*** збільшуються на 3%, що відповідає межах варіативності мовлення людини.

### **Задачі для самостійного розв'язку**

1. Дитина має основну частоту голосу  $f_0 = 280$  Гц. Під час вимови голосного звуку в спектрі присутні гармоніки до 10-ї включно. Визначити номер гармоніки, яка має довжину хвилі 61 см.

Відповідь: друга гармоніка.

2. Під час публічного виступу оратор говорить на відстані 2 м від мікрофона з

інтенсивністю звуку  $I_1 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ Вт/м}^2$ . Для підсилення емоційності він підвищує голос, і інтенсивність зростає до значення  $I_2 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/м}^2$  на тій же відстані.

На скільки децибел збільшився рівень звуку? На якій відстані від мікрофона інтенсивність підвищеного голосу дорівнюватиме інтенсивності нормального голосу на відстані 2 м?

Відповідь: на 6 дБ; на відстані 4 м.

3. Диктор радіо під час ефіру підтримує основну частоту голосу  $f_0 = 110 \text{ Гц}$ . Виміряна інтенсивність звуку на відстані 15 см від мікрофона дорівнює  $I = 8 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/м}^2$ . Швидкість звуку в студії за температури  $22^\circ\text{C}$  становить 344 м/с.

Визначити: а) період коливань голосових зв'язок диктора; б) довжину хвилі основного тону; в) рівень звуку на заданій відстані від мікрофона; г) на якій відстані від диктора рівень звуку зменшиться до 50 дБ?

Відповідь: а) 9,1 мс; б) 3,13 м; в) 79 дБ; г) 4,2 м.

4. Під час запису мовлення в студії при температурі  $18^\circ\text{C}$  перші дві формантні частоти голосного звуку дорівнюють 700 Гц і 1200 Гц. Після ввімкнення обігрівача температура підвищилася до  $28^\circ\text{C}$ .

Чи вплине така зміна температури на розбірливість мовлення?

Відповідь: не вплине.

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 8

### МОДЕЛІ ГОЛОСОВОГО ТРАКТУ

#### Короткі теоретичні відомості

**Модель голосових зв'язок як струни.** Голосові зв'язки – це парні складки слизової оболонки гортані, що здійснюють коливання під дією потоку повітря з легень. Для спрощеного аналізу частоти коливань голосових зв'язок використовують модель натягнутої струни з певною товщиною та масою [3].

Основна частота коливань голосових зв'язок визначається за формулою:

$$f_0 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}},$$

де  $L$  – довжина струни (для нашої задачі – довжина голосових зв'язок);  $T$  – сила натягу;  $\mu$  – лінійна густина (маса одиниці довжини).

В свою чергу, лінійна густина

$$\mu = \rho hb,$$

де  $\rho$  – густина матеріалу (для голосових зв'язок обираємо значення густини для м'язово-сполучної тканини,  $\rho = 1100$  кг/м<sup>3</sup>);  $h$  – товщина;  $b$  – ширина.

Таким чином,

$$f_0 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\rho hb}}.$$

**Модель голосового тракту як акустичного резонатора.** Голосовий тракт (порожнина від голосових зв'язок до губ) виконує функцію акустичного фільтра, що формує характерне забарвлення (тембр) голосу. Найпростіша модель голосового тракту – циліндрична труба, закрита з одного кінця (голосові зв'язки) і відкрита з іншого (губи).

Для такої труби резонансні частоти (форманти) визначаються:

$$f_n = \frac{(2n - 1)c}{4L},$$

де  $n = 1, 2, 3, \dots$  – номер форманти;  $c$  – швидкість звуку в повітрі;  $L$  – довжина голосового тракту.

## Приклади розв'язування задач

### Задача 8.1

Розрахувати частоти основного тону чоловічого, жіночого та дитячого голосу, використовуючи для апроксимації голосових зв'язок модель струни. Вихідні анатомічні дані наведені в табл.8.1.

Таблиця 8.1

### Параметри голосових зв'язок для розрахунку частоти коливань

Група	Довжина голосових зв'язок, $L$	Товщина голосових зв'язок, $h$	Ширина голосових зв'язок, $b$	Сила натягу зв'язок, $T$
Чоловіки	2,0 см	3,5 мм	2,5 мм	0,2 Н
Жінки	1,4 см	2,5 мм	2,0 мм	0,12 Н
Діти	0,9 см	1,5 мм	1,5 мм	0,06 Н

Визначити, на скільки октав частота голосу дитини вища за частоту чоловічого голосу. Як зміниться частота чоловічого голосу, якщо під час співу виконавець збільшить натяг голосових зв'язок в 1,5 рази?

### Розв'язання:

В якості моделі голосових зв'язок використаємо модель натягнутої струни з певною товщиною та масою.

Тоді для чоловічого голосу

$$f_{01} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\rho h b}} = \frac{1}{2 \cdot 2 \cdot 10^{-2}} \sqrt{\frac{0,2}{1100 \cdot 3,5 \cdot 10^{-3} \cdot 2,5 \cdot 10^{-3}}} = 113,95 \text{ Гц.}$$

Для жіночого голосу

$$f_{02} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\rho h b}} = \frac{1}{2 \cdot 1,4 \cdot 10^{-2}} \sqrt{\frac{0,12}{1100 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-3}}} = 166,82 \text{ Гц.}$$

Для дитячого голосу

$$f_{03} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\rho h b}} = \frac{1}{2 \cdot 0,9 \cdot 10^{-2}} \sqrt{\frac{0,06}{1100 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}}} = 273,53 \text{ Гц.}$$

Співвідношення частот голосів дитини та чоловіка в октавах:

$$\frac{f_{03}}{f_{01}} = 2^n;$$

$$\frac{273,53}{113,95} = 2^n;$$

$$2,4 = 2^n \Rightarrow n = 1,26,$$

тобто голос дитини вищий за голос чоловіка приблизно на 1,26 октави.

Оскільки частота голосу прямо пропорційна  $\sqrt{T}$ , то збільшення сили натягу зв'язок в 1,5 рази призведе до збільшення частоти голосу в  $\sqrt{1,5}$ , тобто в 1,22 рази.

**Відповідь:** 113,95 Гц; 166,82 Гц; 273,53 Гц; на 1,26 октави; в 1,22 рази.

### **Задача 8.2**

Голосовий тракт людини можна змоделювати у вигляді циліндричної труби, відкритої з одного кінця (рот) і закритої з іншого (голосові зв'язки). Довжина голосового тракту дорослого чоловіка становить 17 см.

Визначте значення трьох перших формантних частот голосового тракту. Які голосні звуки можуть бути утворені при таких резонансах?

#### **Розв'язання:**

Для труби, закритої з одного кінця, резонансні частоти визначаються формулою:

$$f_n = \frac{(2n - 1)c}{4L},$$

де  $n = 1, 2, 3, \dots$  – номер резонансу;  $c$  – швидкість звуку в повітрі;  $L$  – довжина труби.

Перша форманта:

$$F_1 = \frac{(2 \cdot 1 - 1) \cdot 340}{4 \cdot 0,17} = 500 \text{ Гц.}$$

Друга форманта:

$$F_2 = \frac{(2 \cdot 2 - 1) \cdot 340}{4 \cdot 0,17} = 1500 \text{ Гц.}$$

Третя форманта:

$$F_3 = \frac{(2 \cdot 3 - 1) \cdot 340}{4 \cdot 0,17} = 2500 \text{ Гц.}$$

Голосні звуки характеризуються положенням перших двох формант (див. табл. 8.2).

Таблиця 8.2

### Значення формантних частот для голосних звуків [3]

Голосні	Формантні частоти, Гц			
	F1	F2	F3	F4
у	300	625	2500	3320
о	535	780	2500	3220
а	700	1080	2600	3410
е	440	1800	2550	3500
і	240	2250	3200	3700
и	300	1480	2230	3450

За отриманими значеннями перших двох формантних частот  $F_1 = 500$  Гц,  $F_2 = 1500$  Гц – це близько до звуку [e].

**Відповідь:** 500 Гц; 1500 Гц; 2500 Гц; звук е.

### Задача 8.3

За умови задачі 8.2 визначте, як зміняться формантні частоти, якщо людина витягне губи вперед, збільшивши довжину мовного тракта на 2 см?

#### Розв'язання:

При витягуванні губ  $L_1=0,19$  м:

Перша форманта:

$$F'_1 = \frac{(2 \cdot 1 - 1) \cdot 340}{4 \cdot 0,19} = 447 \text{ Гц.}$$

Друга форманта:

$$F'_2 = \frac{(2 \cdot 2 - 1) \cdot 340}{4 \cdot 0,19} = 1342 \text{ Гц.}$$

Третя форманта:

$$F'_3 = \frac{(2 \cdot 3 - 1) \cdot 340}{4 \cdot 0,19} = 2237 \text{ Гц.}$$

Зміни:

$$\Delta F_1 = 500 - 447 = 53 \text{ Гц (зменшення на 10,6\%);}$$

$$\Delta F_2 = 1500 - 1342 = 158 \text{ Гц (зменшення на 10,5\%);}$$

$$\Delta F_3 = 2500 - 2237 = 263 \text{ Гц (зменшення на 10,5\%).}$$

**Відповідь:** зменшаться на 53 Гц; 158 Гц і 263 Гц.

### Задачі для самостійного розв'язку

1. У співака-баритона довжина голосових зв'язок становить 1,8 см, товщина 3 мм та ширина 2,3 мм. Під час співу в нижньому регістрі сила натягу зв'язок становить 0,15 Н, а в верхньому – 0,35 Н.

Визначити частоту основного тону в нижньому та верхньому регістрах. На скільки напівтонів відрізняються ці частоти?

Відповідь: 123,6 Гц; 188,6 Гц; на 7 напівтонів.

2. Голосовий тракт дитини має довжину 12 см. Під час вимови голосного звуку виміряні формантні частоти:  $F_1 = 650$  Гц,  $F_2 = 2200$  Гц.

Визначити теоретичні значення перших двох формант голосового тракту використовуючи модель циліндричної труби, порівняти їх з експериментальними значеннями. Зробити висновок, який голосний звук найбільш імовірно вимовляє дитина.

Відповідь: 708 Гц; 2125 Гц. Звук близький до [i].

3. Жінка з довжиною голосових зв'язок  $L = 1,5$  см, товщиною  $h = 2,8$  мм та шириною  $b = 2,2$  мм співає ноту ля першої октави (440 Гц).

Визначити необхідну силу натягу голосових зв'язок для отримання цієї частоти. Як зміниться частота, якщо під час співу внаслідок втоми натяг зменшиться на 15%?

Відповідь: 0,206 Н; б) 405,7 Гц.

4. Довжина голосового тракту чоловіка 16,5 см. Під час вимови звуку [y] він округлює губи, збільшуючи ефективну довжину тракту до 18,5 см.

Визначити:

а) значення перших двох формант для нейтрального (початкового) положення;

б) значення перших двох формант при вимові звуку [y];

в) як змістилися форманти при округленні губ?

Відповідь: а) 515 Гц; 1545 Гц; б) 459 Гц; 1378 Гц; в) зменшилися на 56 Гц та 167 Гц відповідно.

5. Порівняти частоти основного тону і визначити різницю цих частот в октавах для двох співаків – тенора з довжиною голосових зв'язок 1,6 см та баса з довжиною голосових зв'язок 2,2 см. Товщина та ширина зв'язок у обох виконавців однакові ( $h = 3,2$  мм,  $b = 2,4$  мм).

Відповідь: 144,4 Гц; 105 Гц; 0,46 октави.

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 9

### ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОВНИХ СИГНАЛІВ

#### Короткі теоретичні відомості

Динамічний діапазон мовного сигналу – це різниця між максимальним і мінімальним рівнями сигналу, виражена в децибелах:

$$D = 10\lg \frac{P_{max}}{P_{min}} = 20\lg \frac{U_{max}}{U_{min}} = L_{max} - L_{min}.$$

Знання динамічного діапазону необхідне для проектування систем запису, передачі та відтворення мовлення, щоб уникнути спотворень та втрати інформації.

Пік-фактор характеризує відношення пікової (максимальної миттєвої) потужності до середньої потужності сигналу:

$$\Pi = 10\lg \frac{P_{max}}{P_{сер}}.$$

Для типового мовного сигналу пік-фактор становить 10-15 дБ. Високий пік-фактор обумовлений тим, що під час вимови вибухових приголосних звуків ([п], [т], [к]) виникають короткочасні імпульси з високою амплітудою, тоді як голосні звуки мають більш стабільну, але меншу амплітуду. Пік-фактор важливий при проектуванні підсилювачів та систем обробки сигналів для забезпечення достатнього динамічного діапазону без спотворень (кліпінгу).

Відношення сигнал/шум характеризує якість мовного сигналу на фоні перешкод:

$$SNR = L_c - L_{ш} = 10\lg \frac{P_c}{P_{ш}},$$

де  $L_c$  – рівень корисного сигналу,  $L_{ш}$  – рівень шуму. Для забезпечення задовільної розбірливості мовлення SNR повинно становити не менше 15-20 дБ.

## Приклади розв'язування задач

### Задача 9.1

Під час аналізу мовного сигналу, записаного у студійних умовах, було виміряно акустичні параметри голосу диктора. Максимальна потужність звуку під час вимови голосного вигуку становила  $P_{max} = 2$  мВт, а мінімальна потужність під час вимови тихого приголосного звуку [с] дорівнювала  $P_{min} = 0,002$  мВт.

Визначити динамічний діапазон мовного сигналу цього диктора у децибелах. Порівняти отриманий результат з типовим динамічним діапазоном людської мови та зробити висновок про особливості голосу цього диктора.

### Розв'язок

$$D = 10 \lg \frac{P_{max}}{P_{min}} = 10 \lg \frac{2 \cdot 10^{-3}}{0,002 \cdot 10^{-3}} = 30 \text{ дБ.}$$

### Типові значення динамічного діапазону

Тип мовлення	Динамічний діапазон
Шепіт	20-25 дБ
Спокійна розмова	30-35 дБ
Нормальне мовлення	40-50 дБ
Емоційне мовлення	50-60 дБ
Крик, вигук	60-70 дБ
Нормальне мовлення	40-50 дБ

**Відповідь:** 30 дБ.

### Задача 9.2

У системі цифрової обробки мовних сигналів застосовується адаптивний еквайзер для підвищення розбірливості мови в умовах шуму. Відомо, що

підсилення другої форманти (в діапазоні 1500-2000 Гц) на 18 дБ дозволяє значно покращити розпізнавання голосних звуків.

Якщо корисний мовний сигнал має потужність 60 дБ відносно опорного рівня, а рівень фонового шуму становить 45 дБ, то:

а) у скільки разів (за потужністю) збільшиться корисний сигнал після підсилення формантної області на +18 дБ?

б) яке буде співвідношення сигнал/шум до і після підсилення?

### ***Розв'язок***

а) підсилення на +18 дБ означає, що рівень потужності збільшується на 18 дБ, тобто

$$\Delta L = 10 \lg \frac{P_2}{P_1} = 10 \lg K,$$

де  $K$  – коефіцієнт підсилення по потужності.

Знайдемо коефіцієнт підсилення:

$$18 = 10 \lg K;$$

$$\lg K = 1,8;$$

$$K = 10^{1,8} \approx 63,1,$$

тобто потужність корисного сигналу збільшиться приблизно у 63 рази.

б) відношення сигнал/шум до підсилення:  $L_c = 60$  дБ;  $L_{ш} = 45$  дБ

$$SNR_1 = 60 - 45 = 15 \text{ дБ.}$$

Після підсилення формант:  $L_c = 60 + 18 = 78$  дБ;  $L_{ш} = 45$  дБ

$$SNR_2 = 78 - 45 = 33 \text{ дБ.}$$

Т.ч., після підсилення маємо покращення відношення сигнал/шум на 18 дБ.

***Відповідь:*** а) потужність корисного сигналу збільшиться у 63 рази; б)  $SNR_1 = 15$  дБ;  $SNR_2 = 33$  дБ.

### ***Задача 9.3***

При проектуванні підсилювача для системи гучного зв'язку необхідно врахувати динамічний діапазон мовного сигналу. Відомо, що для типового мовного сигналу пік-фактор становить 12 дБ. Середній рівень потужності

мовного сигналу на виході мікрофона становить -10 дБм (відносно опорного рівня 1 мВт).

Визначте:

- а) Який максимальний (піковий) рівень сигналу слід очікувати?
- б) Який мінімальний динамічний діапазон повинен забезпечити підсилювач, щоб уникнути обрізання пікових значень сигналу?
- в) У скільки разів пікова потужність перевищує середню потужність (у лінійній шкалі)?
- г) Яку середню та пікову потужність в абсолютних одиницях (мВт) матиме сигнал?

**Розв'язок**

- а) Знаходимо піковий рівень:

$$L_{max} = П + L_{сер} = 12 - 10 = 2 \text{ дБм.}$$

Якщо в середньому мікрофон видає сигнал з рівнем -10 дБм, то під час вимови приголосних звуків (наприклад, [п], [т], [к]) виникають короткочасні піки, рівень яких досягає +2 дБм.

б) Щоб уникнути кліпінгу (спотворення сигналу через перевищення максимально припустимого рівня, який полягає в обрізанні пікових значень) динамічний діапазон підсилювача повинен охоплювати весь діапазон від мінімального до максимального рівня сигналу.

Якщо ми враховуємо тільки пік-фактор (без додаткових запасів), то:

$$D_{min} = L_{max} - L_{min}.$$

Однак зазвичай вважають, що мінімальний корисний сигнал перебуває на рівні шумів підсилювача. Якщо ми приймаємо робочий діапазон від середнього рівня до пікового:

$$D_{min} = П = 12 \text{ дБ.}$$

Підсилювач повинен мати динамічний діапазон не менше 12 дБ, але для надійної роботи зазвичай передбачають запас і обирають підсилювач з динамічним діапазоном 60-90 дБ.

- в) переводимо значення пік-фактора з дБ у лінійну шкалу:

$$\Pi = 10 \lg \frac{P_{max}}{P_{сер}} = 10 \lg K \Rightarrow$$

$$K = 10^{\frac{\Pi}{10}} = 10^{\frac{12}{10}} = 10^{1,2} \approx 15,85.$$

г) Якщо опорна потужність  $P_0 = 1$  мВт, то середня потужність

$$P_{сер} = P_0 \cdot 10^{\frac{L_{сер}}{10}} = 10^{-3} \cdot 10^{\frac{-10}{10}} = 0,1 \text{ мВт.}$$

Пікова потужність:

$$P_{max} = P_0 \cdot 10^{\frac{L_{max}}{10}} = 10^{-3} \cdot 10^{\frac{2}{10}} \approx 1,59 \text{ мВт.}$$

**Відповідь:** а) 2 дБм; б) 12 дБ; в)  $\approx$  в 16 разів; г) 0,1 мВт; 1,59 мВт.

#### **Задача 9.4**

В студії звукозапису диктор вимовляє голосний звук [а] з постійною гучністю, після чого різко припиняє фонацію. Миттєві значення звукового тиску мовного сигналу після припинення мовлення змінюються за законом:

$$p(t) = p_0 e^{-17,3t}$$

де  $p_0$  – значення тиску в початковий момент часу,  $t$  – час у секундах.

Визначити, на скільки зменшується середній звуковий тиск за час 200 мс.

#### **Розв'язок**

Середнє значення функції на інтервалі  $[0; T]$ :

$$p_{сер} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt.$$

Для заданого часу  $t = 200 \text{ мс} = 0,2 \text{ с}$ :

$$\begin{aligned} p_{сер} &= \frac{1}{0,2} \int_0^{0,2} p_0 e^{-17,3t} dt = \frac{p_0}{0,2 \cdot (-17,3)} e^{-17,3t} \Big|_0^{0,2} = \\ &= -\frac{p_0}{3,46} (e^{-3,46} - 1) = 0,28 p_0. \end{aligned}$$

**Відповідь:** середній звуковий тиск під час реверберації за перші 200 мс зменшується на 72% від початкового значення.

## Задачі для самостійного розв'язку

1. У мовному сигналі, починаючи з частоти 1000 Гц спектральна щільність потужності спадає зі швидкістю -6 дБ/октаву. На частоті 1000 Гц спектральна щільність має рівень -20 дБ (відносно опорного рівня). Який рівень спектральної щільності буде на частоті 4000 Гц?

Відповідь: -32 дБ.

2. Спрощена модель мовного сигналу містить три гармонічні компоненти з частотами  $f_1 = 200$  Гц,  $f_2 = 600$  Гц,  $f_3 = 1000$  та амплітудами звукового тиску  $P_{m1} = 0,2$  Па,  $P_{m2} = 0,1$  Па,  $P_{m3} = 0,02$  Па.

Визначити середньоквадратичне значення сумарного сигналу і рівень звукового тиску.

Відповідь: 0,16 Па; 78 дБ.

3. Під час запису мовного сигналу було встановлено, що максимальна напруга сигналу становить 0,8 В, а мінімальна 0,02 В. Визначити динамічний діапазон сигналу.

Відповідь: 32 дБ.

4. Під час передачі мовленнєвої програми рівень сигналу на вході приймача становить 65 дБ, а рівень шуму 48 дБ.

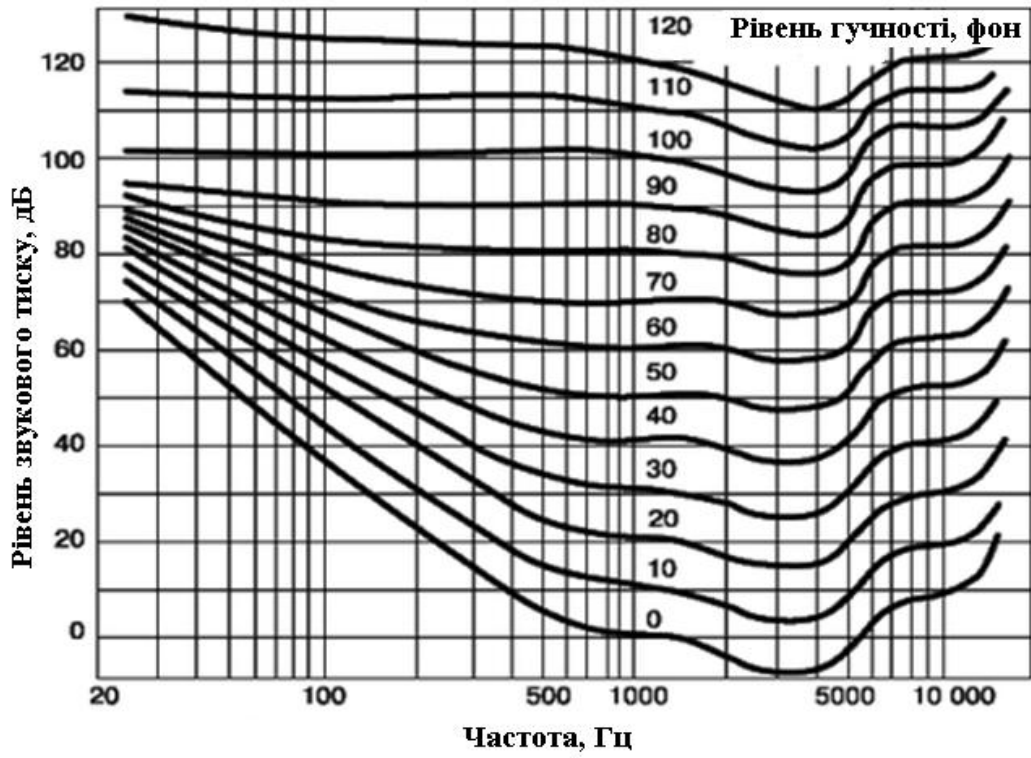
Визначити відношення потужностей сигналу і шуму. Чи буде забезпечена задовільна розбірливість мови?

Відповідь:  $\approx 50$ . Розбірливість буде задовільною.

Примітка: для висновку про задовільну розбірливість мови розрахуйте  $SNR$ .

# ДОДАТКИ

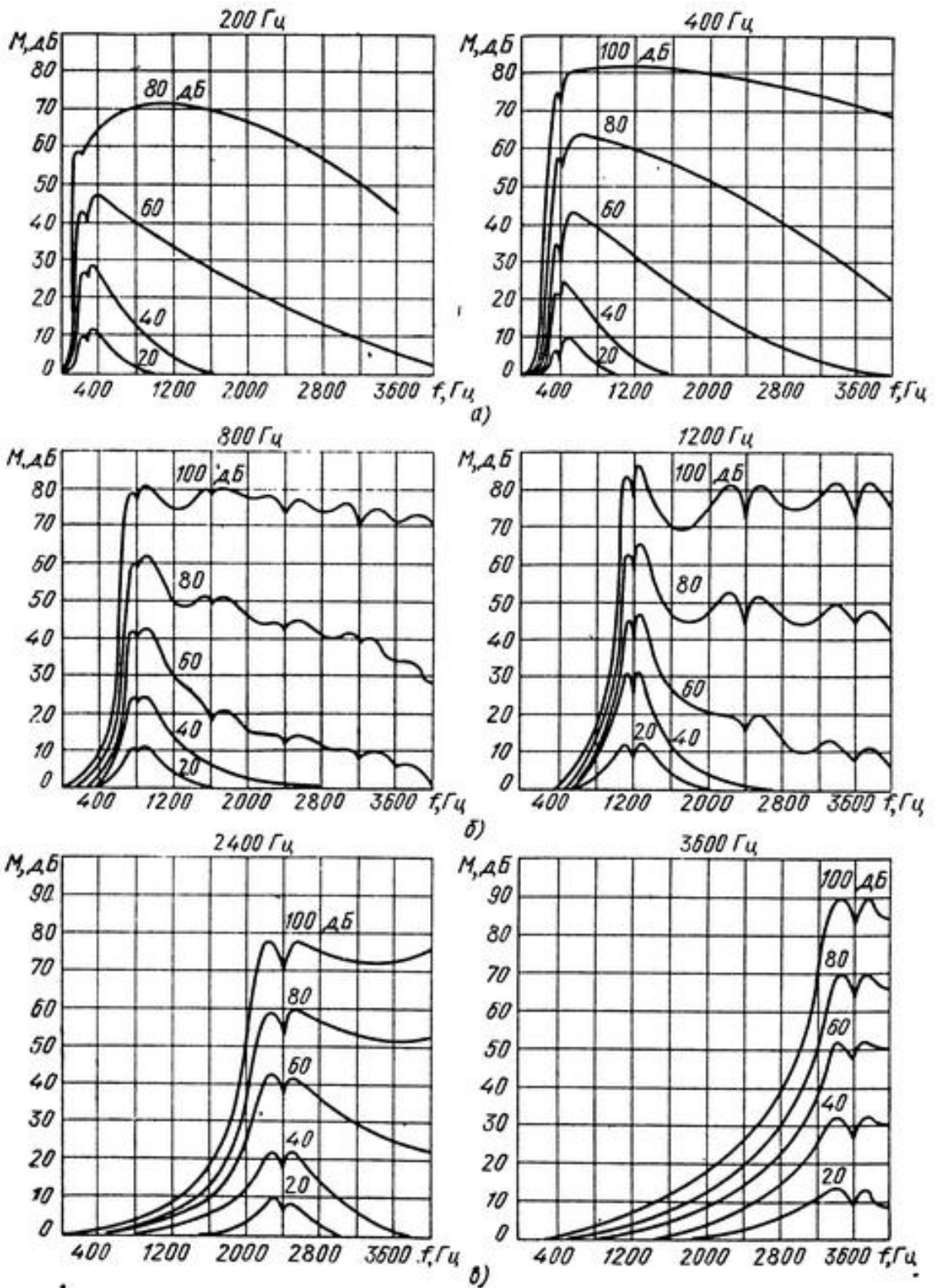
## Криві рівного рівня гучності [3]



## Частотні групи (критичні смуги) [3]

Барк, номер частотної смуги	Критична смуга (діапазон), Гц	Ширина критичної смуги, Гц	Центральна частота критичної смуги, Гц
0	20-100	80	50
1	100-200	100	150
2	200-300	100	250
3	300-400	100	350
4	400-510	110	450
5	510-630	120	570
6	630-770	140	700
7	770-920	150	840
8	920-1080	160	1000
9	1080-1270	190	1170
10	1270-1480	210	1370
11	1480-1720	240	1600
12	1720-2000	280	1850
13	2000-2320	320	2150
14	2320-2700	380	2500
15	2700-3150	450	2900
16	3150-3700	550	3400
17	3700-4400	700	4000
18	4400-5300	900	4800
19	5300-6400	1100	5800
20	6400-7700	1300	7000
21	7700-9500	1800	8500
22	9500-12000	2500	10500
23	12000-15500	3500	13500

Криві маскуванія [3]



## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Акустика слуху: конспект лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 171 «Електроніка», освітньої програми «Акустичні електронні системи та технології обробки акустичної інформації» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: К. С. Дрозденко, О. І. Дрозденко. – Електронні текстові дані (1 файл: 7,67 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 99 с.
2. Дідковський В.С. та ін. Практикум з технічної акустики: Навчальний посібник / За ред. В.С. Дідковського. – Київ: 2003.
3. Акустична техніка. Т4. Основи архітектурної та фізіологічної акустики: Навч. посібник / Дідковський В.С., Луньова С.А. – Київ, 2001. – 424 с.
4. Найда М. С. Фізичні моделі барабанної перетинки середнього вуха людини / Найда М. С., Дідковський В. С., Найда С. А. // Мікросистеми, Електроніка та Акустика : науково-технічний журнал. – 2018. – Т. 23, № 6(107). – С. 66–73].
5. Найда С. А. Моделювання механо-акустичних процесів у середньому вусі людини / С. А. Найда, М. С. Найда, В. С. Дідковський // Акустичний вісник. – 2017. – Т. 19, № 2. – С. 38–49.
6. Луньова С., Дідковський В., Педченко О. Акустика мовотворення: навчальний посібник. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018. – 140 с. ISBN: 978-613-7-32891-0.
7. Beranek L., Mellow T. Acoustics: Sound Fields and Transducers. – Academic Press, 2012.