

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до виконання практичних занять з дисципліни

**«Теоретичні основи акустики»**

для студентів усіх форм навчання за спеціальністю  
123 «Комп'ютерна інженерія»

Затверджено  
редакційно-видавничою радою  
університету,

протокол № 1 від 25.02.2021 р.

Харків  
НТУ «ХПІ»  
2021

Методичні вказівки до виконання практичних занять з дисципліни «Теоретичні основи акустики» усіх форм навчання за спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія» / упоряд. С. М. Порошин, В. В. Усик. – Харків: НТУ «ХП», 2021. – 51 с.

Укладачі: С. М. Порошин  
В. В. Усик

Рецензент А. В. Статкус

Кафедра мультимедійних інформаційних технологій і системи

## ЗМІСТ

Вступ	4
1. Розрахунок основних показників звукового поля	5
2. Розрахунок резонансних та антирезонансних частот у трубі.	
Суб'єктивна оцінка звукового поля	10
3. Хвилева теорія. Отримання спектра власних частот приміщення	18
4. Поглинання звукової енергії в приміщенні	20
5. Розрахунок частотної залежності стандартного часу реверберації в приміщенні	25
6. Розрахунок часу запізнювання відбитих сигналів у приміщенні	34
7. Розрахунок електродинамічної голівки гучномовця	37
Список літератури	50

## ВСТУП

Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Теоретичні основи акустики» для студентів усіх форм навчання за спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія» підготовлені відповідно до робочої навчальної програми з дисципліни «Теоретичні основи акустики», яка вивчається студентами кафедри мультимедійних інформаційних технологій і систем.

Виконання практичних завдань проводиться індивідуально кожним студентом.

У результаті виконання практичних занять студенти повинні:

- знати: основні властивості звукових сигналів та звукового поля, методи моделювання та оцінки звукового поля в приміщенні, принципи проєктування приміщень з урахуванням вимог до акустичних властивостей;

- вміти: аналізувати звукове поле приміщення, проводити акустичну експертизу приміщень, проводити розрахунок та моделювання акустичних властивостей приміщення.

Методичні вказівки містять сім практичних занять, що складаються з таких підрозділів, як:

- мета роботи;
- завдання до виконання практичних занять;
- порядок виконання роботи;
- варіанти індивідуальних завдань.

# 1. РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПОКАЗНИКІВ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ

**Основні положення та співвідношення [1, с. 4–9]**

Швидкість звуку в повітрі при нормальному тиску (760 мм. рт. ст) можна отримати за формулою, м/с:

$$c = 331.4 + 0.607 \cdot t, \quad (1.1)$$

де  $t$  – температура повітря (°C).

Якщо період коливань  $T$  (с), то частота коливань  $f = 1/T$  (Гц), а довжина звукової хвилі, яка дорівнює відстані між сусідніми фронтами, що знаходяться в однаковій фазі, м:

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

де  $c$  – швидкість звуку, м/с;

$T$  – період коливань, с;

$f$  – частота коливань, Гц.

В акустиці, радіомовленні та електрозв'язку за рівень параметра приймають величину, що пропорційна логарифму відносного значення цього параметра. Таким чином, при використанні десяткових логарифмів для параметра  $K$  рівень

$$N = \alpha \cdot \lg \left( \frac{K}{K_0} \right),$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт пропорційності, який визначається розміром обраних логарифмічних одиниць;

$K$  – значення фізичного параметра;

$K_0$  – умовне значення параметра (умовне нульове значення параметра).

Для визначення рівнів акустичних величин використовують такі вирази:

– для енергетичних параметрів

$$L_e = 10 \lg \frac{K}{K_0},$$

– для лінійних

$$L_l = 20 \lg \frac{K}{K_0}.$$

Якщо  $K_0$  унормовано, то відповідний рівень параметра називають абсолютним, у всіх інших випадках рівень називають відносним. Зазвичай прикметник «абсолютний» для стислості опускають.

За умовне (нормоване) значення нульового рівня інтенсивності звуку прийнята інтенсивність, яка дорівнює  $10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup>. Абсолютний рівень інтенсивності в децибелах, дБ:

$$L_I = 10 \lg \left( \frac{I}{I_0} \right) = 10 \lg \left( \frac{I}{10^{-12}} \right),$$

де  $I$  – рівень інтенсивності, Вт/м<sup>2</sup>.

Рівень по звуковому тиску у децибелах для повітря визначають щодо звукового тиску за величиною, що відповідає нульовому значенню рівня інтенсивності для питомого акустичного опору, рівного 400 кг/м<sup>2</sup>с, таким чином рівень визначається виразом, дБ:

$$L_p = 20 \lg \left( \frac{p}{p_0} \right) = 20 \lg \left( \frac{p}{2 \cdot 10^{-5}} \right),$$

де  $p_0$  – умовне діюче значення для нульового рівня по звуковому тиску ( $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Па);

$p$  – діюче значення звукового тиску, Па.

Рівень густини енергії в децибелах для повітря прийнято визначати щодо густини, що відповідає нульовому значенню інтенсивності для швидкості звуку, який дорівнює 333 м/с, таким чином рівень визначається з виразу, дБ:

$$L_\varepsilon = 10 \lg \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) = 10 \lg \left( \frac{\varepsilon}{3 \cdot 10^{-15}} \right),$$

де  $\varepsilon_0 = 3 \cdot 10^{-15}$  Дж/м<sup>3</sup> – умовне значення нульового рівня густини енергії;  
 $\varepsilon$  – густина енергії Дж/м<sup>3</sup>.

### Приклади розв'язання задач

1.1. Знайти довжину хвилі на  $f = 500$  Гц при  $t = -10$  °С та тиску 760 мм. рт. ст.

*Розв'язок*

1. Знайдемо швидкість звуку при температурі  $t = -10$  °С. Для цього скористаємося формулою (1.1).

$$c = 331,4 + 0,607 \cdot t = 331,4 + 0,607 \cdot (-10) = 325,33 \quad \text{м/с.}$$

2. Скористаємося формулою (1.2) для розрахунку довжини хвилі на частоті  $f = 500$  Гц.

$$\lambda = \frac{325,33}{500} = 0,65 \text{ м.}$$

1.2. Задані рівні інтенсивності звуку, що розвивається чотирма джерелами  $L_{I1} = 54$ ;  $L_{I2} = 62$ ;  $L_{I3} = 60$ ;  $L_{I4} = 58$  дБ. Знайти сумарне значення рівня.

*Розв'язок*

1. Переведемо рівні у відносні значення для енергетичного параметра. Оскільки для отримання рівня інтенсивності необхідно скористатися формулою

$$L_e = 10 \lg K,$$

тоді відносне значення енергетичної величини буде дорівнювати

$$K = 10^{0,1 \cdot L_e}.$$

Проведемо перерахунок усіх рівнів інтенсивності кожного джерела у відносне значення

$$K_{62} = 10^{0,1 \times 62} = 1,585 \cdot 10^6;$$

$$K_{60} = 10^{0,1 \times 60} = 1 \cdot 10^6;$$

$$K_{58} = 6,31 \cdot 10^5 = 0,631 \cdot 10^6;$$

$$K_{54} = 0,2512 \cdot 10^6.$$

2. Знайдемо сумарне значення відносних величин:

$$K_{\Sigma} = 1,585 \cdot 10^6 + 1 \cdot 10^6 + 0,631 \cdot 10^6 + 0,2512 \cdot 10^6 = 3,467 \cdot 10^6.$$

3. Сумарне значення переведемо в рівень сумарного значення інтенсивності звуку:

$$L_{\Sigma I} = 10 \lg(3,467 \cdot 10^6) = 65,4 \text{ дБ.}$$

1.3. Знайти рівень інтенсивності звуку, рівень звукового тиску (при нормальних атмосферних умовах –  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  і  $760 \text{ мм. рт. ст.}$ ). Інтенсивність звуку  $I = 2 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/м}^2$ ; звуковий тиск  $p = 0,25 \text{ Па}$ .

*Розв'язок*

1. Для знаходження рівня звукового тиску скористаємося формулою

$$L_p = 20 \lg \frac{p \text{ Па}}{2 \cdot 10^{-5}} = 20 \lg \frac{0,25}{2 \cdot 10^{-5}} = 81,94 \text{ дБ.}$$

2. Для знаходження рівня інтенсивності звуку при відомому значенні інтенсивності скористаємося формулою

$$L_I = 10 \lg \frac{I_{Bm}}{10^{-12}} = 10 \lg \frac{2 \cdot 10^{-4}}{10^{-12}} = 10 \lg 2 \cdot 10^8 = 83,1 \text{ дБ.}$$

1.4. Знайти інтенсивність та звуковий тиск при заданих рівнях інтенсивності  $L_I = 100 \text{ дБ}$  та звукового тиску  $L_p = 100 \text{ дБ}$  (при нормальних атмосферних умовах).

*Розв'язок*

1. Знаючи формули розрахунку рівнів акустичних величин, можна отримати вирази для отримання абсолютних значень акустичних величин. Таким чином, для отримання значення інтенсивності звуку отримуємо вираз

$$I = I_0 10^{0,1 \cdot L_I} = 10^{-12} \cdot 10^{0,1 \cdot 100} = 0,01 \text{ Вт/м}^2.$$

2. Для отримання значення звукового тиску скористаємося формулою

$$p = p_0 10^{\frac{L_p}{20}} = 2 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{0,05 \cdot 100} = 2 \text{ Па.}$$

### Задачі для самостійного розв'язання

1.5. Знайти довжину хвилі на частоті  $f$  при температурі повітря  $t$  та нормальному тиску (760 мм. рт. ст).

Номер варіанта	$f$ , Гц	$t$ , °С
1	10	0
2	0,01	-15
3	2000	30
4	258	25
5	389	-25
6	650	10
7	0,01	5
8	12	-5
9	75	35
10	1500	-12
11	10000	7
12	12000	2
13	175	-3
14	150	23
15	50	22
16	125	-18
17	4000	-6
18	450	7
19	1250	-15
20	780	12

1.6 Знайти сумарне значення рівня інтенсивності звуку, що розвивається кількома джерелами.

Номер варіанта	Ряд заданих рівнів, дБ
1	2
1	25;12;15;18
2	34;40;30
3	70; 65;72;80
4	67;70;75
5	35;30;42;40
6	24;30;35
7	85;83;90;82
8	76;74;80;75

Продовження табл.

1	2
9	10;8;15;12
10	55;60;67
11	50;60;57;62;
12	87;80;92
13	18;20;15;21;
14	16;14;20;18;
15	45;40;48
16	33;35;41;40
17	71;74;67
18	122;58;100;75
19	45;75;60;60
20	70;98;46;70

1.7. Знайти рівень інтенсивності звуку, рівень звукового тиску (при норм. атм. умовах –  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  и 760 мм. рт. ст).

<i>Номер варіанта</i>	<i>Інтенсивності звуку, Вт/м<sup>2</sup></i>	<i>Звуковий тиск, Па</i>
1	$3 \cdot 10^{-4}$	0,5
2	$0,125 \cdot 10^{-5}$	0,35
3	$1 \cdot 10^{-4}$	1
4	$4 \cdot 10^{-5}$	1,4
5	$2,5 \cdot 10^{-4}$	1,25
6	$3,75 \cdot 10^{-5}$	0,35
7	$4 \cdot 10^{-4}$	1,1
8	$0,4 \cdot 10^{-5}$	3,4
9	$2,1 \cdot 10^{-4}$	1,75
10	$1,15 \cdot 10^{-5}$	0,25
11	$3 \cdot 10^{-4}$	0,12
12	$15 \cdot 10^{-5}$	0,125
13	$11 \cdot 10^{-4}$	1
14	$5 \cdot 10^{-5}$	2
15	$4,2 \cdot 10^{-4}$	2,5
16	$3,12 \cdot 10^{-5}$	2,7
17	$1,2 \cdot 10^{-4}$	3
18	$5,7 \cdot 10^{-5}$	4
19	$3,32 \cdot 10^{-4}$	3,54
20	$4 \cdot 10^{-5}$	0,15

1.8. Знайти інтенсивність та звуковий тиск при нормальних атмосферних умовах.

<i>Номер варіанта</i>	<i>Рівень параметра, дБ</i>
1	2
1	20
2	50

Продовження табл.

1	2
3	34
4	150
5	250
6	500
7	45
8	57
9	125
10	450
11	350
12	200
13	180
14	80
15	75
16	65
17	75
18	132
19	149
20	155

## 2. РОЗРАХУНОК РЕЗОНАНСНИХ ТА АНТИРЕЗОНАНСНИХ ЧАСТОТ У ТРУБИ. СУБ'ЄКТИВНА ОЦІНКА ЗВУКОВОГО ПОЛЯ

**Основні положення та співвідношення [1, с. 15–20, с. 51–55]**

1. Відбиття звуку.

Ефективність відбиття характеризується коефіцієнтом відбиття.

В акустиці коефіцієнтом відбиття називають відношення інтенсивності відбитої звукової хвилі  $I_{\text{відб}}$  до інтенсивності падаючої хвилі  $I_{\text{пад}}$ , таким чином, коефіцієнт відбиття

$$\alpha_{\text{отр}} = \frac{I_{\text{відб}}}{I_{\text{пад}}}.$$

Ефективність відбиття залежить від ступеня відмінності акустичних опорів обох середовищ: якщо падаюча хвиля має звуковий тиск  $p_{\text{пад}}$ , то звуковий тиск у відбитої хвилі

$$p_{\text{відб}} = p_{\text{пад}} \frac{\delta_{\text{пад}} - \delta_{\text{відб}}}{\delta_{\text{пад}} + \delta_{\text{відб}}},$$

де  $\delta_{\text{відб}}$  і  $\delta_{\text{пад}}$  – питомі акустичні опору середовища, яке відбиває і середовища, в якому розглядаються явища відображення.

Коефіцієнт відображення за інтенсивністю визначається за формулою

$$\alpha_{\text{відб}} = \left| \frac{\delta_{\text{пад}} - \delta_{\text{відб}}}{\delta_{\text{пад}} + \delta_{\text{відб}}} \right|^2.$$

## 2. Резонансні та антирезонансні частоти труби.

Частоти

$$\omega = \frac{n\pi c}{l} \quad \text{або} \quad f = \frac{nc}{2l},$$

для яких довжина хвилі пов'язана з довжиною труби співвідношенням  $l = \frac{n\lambda}{2}$  (де  $n$  – будь-яке ціле число), вхідний питомий акустичний опір чисто активний і мінімальний. Такі частоти називаються *резонансними*.

Частоти

$$\omega = \frac{(2n-1)\pi c}{2l} \quad \text{або} \quad f = \frac{(2n-1)c}{4l},$$

для яких довжина хвилі пов'язана з довжиною труби співвідношенням  $l = \frac{(2n-1)\lambda}{4}$ , де вхідний питомий акустичний опір має чисто реактивний характер і за величиною досягає максимуму. Такі частоти називають *антирезонансними*.

## 3. Гучність та рівень гучності звуку

Під рівнем гучності цього звуку розуміється рівень звукового тиску рівногучного з даними еталонного звуку на частоті 1000 Гц.

Рівень гучності вимірюється в спеціальних одиницях – фонах.

$$L_N = 20 \lg \left( \frac{p_N}{p_0} \right),$$

де  $p_N$  – ефективне значення звукового тиску синусоїдального сигналу з частотою 1 кГц, який при фронтальному падінні звукової хвилі і прослуховуванні двома вухами сприймається як рівногучний з оцінюваним звуком.

Для кількісної оцінки абсолютної гучності була прийнята спеціальна одиниця сон. Гучність в 1 сон – це гучність синусоїдального звуку з частотою 1000 Гц і рівнем 40 дБ.

Рівню гучності  $L_N = 40$  фон відповідає гучність  $N = 1$  сон;

$$N = 2^{(L_N - 40)/10} \text{ (сон)}.$$

## Приклади розв'язання задач

2.1. Знайти коефіцієнт відбиття та відсоток відбиття звукової хвилі або падіння на межу поділу двох середовищ. Середовище № 1 – повітря. Середовище № 2 – солоня вода.

Розв'язок

1. Коефіцієнт відбиття визначимо за формулою

$$\alpha_{\text{відб}} = \left| \frac{\delta_{\text{пад}} - \delta_{\text{відб}}}{\delta_{\text{пад}} + \delta_{\text{відб}}} \right|^2.$$

2. За табл. 2.1 та 2.2 отримаємо значення питомих акустичних опорів для середовища, в якому падає звукова хвиля, та середовища, від якого звукова хвиля відбивається:

$$\delta_{\text{пад}}(\text{повітря } (t = 20^\circ)) = 413 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2\text{с}};$$

$$\delta_{\text{відб}}(\text{солоня вода}) = 1,55 \cdot 10^6 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2\text{с}}.$$

3. Підставивши формулу для розрахунку коефіцієнта відбиття, отримуємо

$$\alpha_{\text{відб}} = \left| \frac{413 - 1,55 \cdot 10^6}{413 + 1,55 \cdot 10^6} \right|^2 = 0,99.$$

Якщо виразити в процентах, то отримуємо, що 99 % всієї енергії звукової хвилі відбивається від поверхні солоня води.

Таблиця 2.1 – Швидкість звуку та питомий акустичний опір

Середовище	Температура, °С	Густина $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Швидкість звуку $c$ , м/с	Питомий акустичний опір $\rho \cdot c$ , кг/(м <sup>2</sup> ·с)
Водяна пара	100	0,58	405	230
Повітря	0	1,29	331	428
Повітря	20	1,20	343	413
Гелій	0	0,18	970	172
Вода прісна	15	999	1430	$1,43 \cdot 10^6$
Вода солоня 3,5 %-на	15	1027	1500	$1,55 \cdot 10^6$

Таблиця 2.2 – Швидкість звуку та питомий акустичний опір

Матеріал	Густина $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Швидкість звуку, м/с		Питомий акустичний опір $\rho \cdot c$ , кг/(м <sup>2</sup> ·с) · 10 <sup>6</sup>	
		У неомеж. середов.	В поздовжн. стрижні	У неомеж. середов.	В поздовжн. стрижні
Залізо	7800	5850	5170	45,6	40,4
Дуб	700	4170	1520	2,92	1,06
Сосна	500	5030	1450	2,77	0,8
Лід	916	–	3200	–	2,93
Пробка	240	–	500	–	0,12
Каучук натуральний	950	–	30	–	0,028
Мармур	2600	–	3810	–	9,9
Граніт	2700	–	3950	–	10,7
Плестіглас	1180	–	2820	–	3,3
Скло	3250	5660	5300	18,5	17,3

2.2. Знайти перші п'ять резонансних і антирезонансних частот для труби довжиною 1,5 м при температурі повітря ( $t = 20^\circ\text{C}$ ).

*Розв'язок*

1. Для труби довжиною 1,5 м ( $t = 20^\circ\text{C}$ ) резонансними будуть

$$n = 1 \quad f_{1p} = \frac{c}{2l} = \frac{343}{2 \cdot 1,5} = 114,33 \text{ Гц};$$

$$n = 2 \quad f_{2p} = \frac{c \cdot 2}{2 \cdot l} = \frac{343}{1,5} = 228 \text{ Гц};$$

$$n = 3 \quad f_{3p} = \frac{c \cdot 3}{2 \cdot l} = \frac{3 \cdot 343}{2 \cdot 1,5} = 343 \text{ Гц};$$

$$n = 4 \quad f_{4p} = \frac{c \cdot 4}{2 \cdot l} = \frac{4 \cdot 343}{2 \cdot 1,5} = 458 \text{ Гц};$$

$$n = 5 \quad f_{5p} = \frac{c \cdot 5}{2 \cdot l} = \frac{5 \cdot 343}{2 \cdot 1,5} = 572 \text{ Гц};$$

2. Антирезонансні частоти

$$n = 1 \quad f_{1ap} = \frac{2 \cdot 1 - 1}{4} \cdot \frac{c}{l} = \frac{1}{4} \cdot \frac{343}{1,5} = 57,167 \text{ Гц};$$

$$n = 2 \quad f_{2ap} = \frac{2 \cdot 2 - 1}{4} \cdot \frac{343}{1,5} = \frac{3}{4} \cdot \frac{343}{1,5} = 171,5 \text{ Гц};$$

$$n = 3 \quad f_{3ap} = \frac{2 \cdot 3 - 1}{4} \cdot \frac{343}{1,5} = \frac{5}{4} \cdot \frac{343}{1,5} = 286,3 \text{ Гц};$$

$$n = 4 \quad f_{4ap} = \frac{2 \cdot 4 - 1}{4} \cdot \frac{343}{1,5} = \frac{7}{4} \cdot \frac{343}{1,5} = 400,8 \text{ Гц};$$

$$n = 5 \quad f_{5ap} = \frac{2 \cdot 5 - 1}{4} \cdot \frac{343}{1,5} = \frac{9}{4} \cdot \frac{343}{1,5} = 515,3 \text{ Гц};$$

2.3. Заданий чистий фон з  $f = 200$  Гц та рівнем звукового тиску  $p = 60$  дБ. Знайти його рівень гучності і гучність.

*Розв'язок*

1. За рис. 2.1 знаходимо значення рівня гучності для заданого звукового тиску.

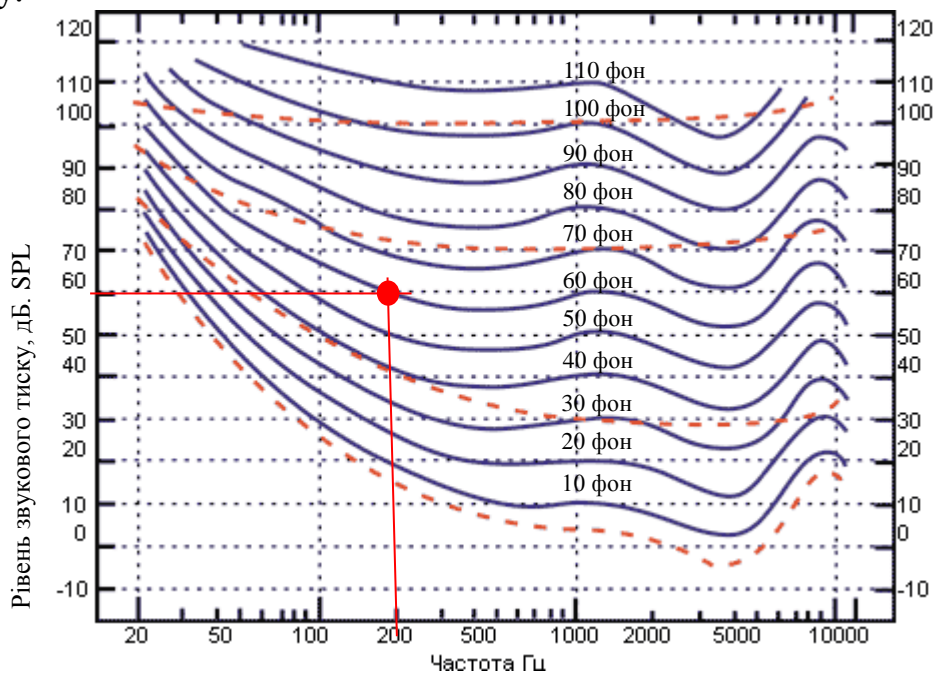


Рисунок 2.1 – Криві рівної гучності для різних значень рівня сигналу

Отриманий рівень гучності  $L_N = 60$  фон.

2. Для перерахунку рівня гучності в гучність скористаємося номограмами (рис. 2.2).

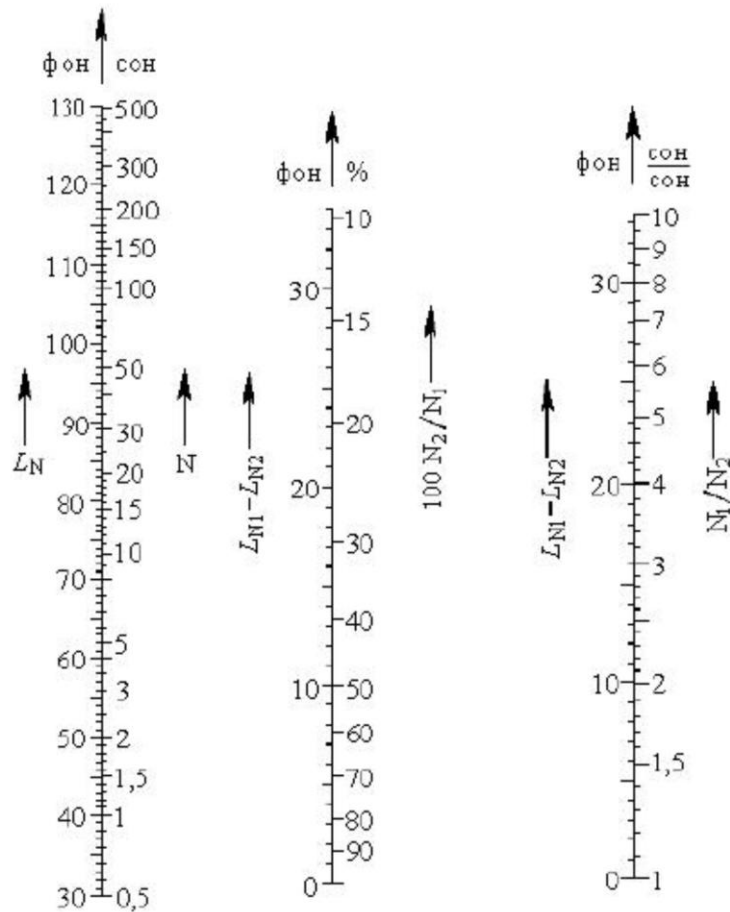


Рисунок 2.2 – Номограми для перерахунку рівнів гучності

Рівню гучності 60 фон відповідає гучність  $N = 4$  сон.

2.4. Заданий початковий рівень гучності  $L_{N1} = 80$  фон, його рівень змінився до рівня гучності  $L_{N2} = 70$  фон. На скільки в процентному та кількісному співвідношенні зміниться гучність?

*Розв'язок*

1. Для вирішення поставленого завдання скористаємося номограмами, показаними на рис. 2.2.

Оскільки існуючий рівень гучності  $L_{N1} = 80$  фон знизився до  $L_{N2} = 70$  фон, то загальна зміна рівня гучності дорівнює

$$L_{N1} - L_{N2} = 10 \text{ фон.}$$

Зниження рівня гучності на 10 фон відповідає зниженню гучності на 50 %. При цьому відбулося зниження гучності в 2 рази.

## Задачі для самостійного розв'язання

2.1. Знайти коефіцієнт відображення і відсоток відбиття звукових хвиль при падінні на межу розділу двох середовищ.

Номер варіанта	Середовище №1	Середовище №2
1	повітря ( $t = 0^\circ$ )	вода прісна
2	водяна пара	скло
3	вода прісна	залізо
4	вода солоня	дуб
5	повітря ( $t = 20^\circ$ )	лід
6	гелій	лід
7	повітря ( $t = 0^\circ$ )	пробка
8	водяна пара	граніт
9	вода прісна	сосна
10	вода солоня	скло
11	повітря ( $t = 20^\circ$ )	мармур
12	гелій	повітря ( $t = 20^\circ$ )
13	повітря ( $t = 0^\circ$ )	каучук
14	водяна пара	скло
15	вода прісна	граніт
16	вода солоня	лід
17	повітря ( $t = 20^\circ$ )	пробка
18	гелій	скло
19	вода прісна	пробка
20	вода солоня	залізо

2.2 Знайти резонансні та антирезонансні частоти для труби довжиною  $l$ , м.

Номер варіанта	$l$ , м	$t$ , $^\circ\text{C}$
1	10	0
2	0,1	-15
3	2	30
4	2	25
5	2,5	-25
6	5,5	10
7	8	5
8	12	-5
9	11,5	35
10	2,7	-12
11	10,1	7
12	4,5	2
13	8,2	-3
14	3,2	23
15	3	22
16	1,45	-18
17	6,2	-6
18	10,3	0
19	0,75	12
20	1,29	25

2.3. Заданий чистий тон з  $f$  (Гц) та рівнем звукового тиску  $L_p$  (дБ). Знайти рівень гучності і гучність тону.

Номер варіанта	$f$ , Гц	$L_p$ , дБ
1	500	40
2	100	80
3	200	70
4	2000	80
5	4000	80
6	5000	10
7	3000	50
8	300	60
9	60	100
10	10000	80
11	6000	0
12	30	70
13	60	90
14	2000	50
15	5000	110
16	10000	60
17	4000	20
18	550	50
19	650	75
20	7000	80

2.4. Заданий початковий рівень гучності  $L_{N1}$  (фон), його рівень змінився до рівня гучності  $L_{N2}$  (фон). На скільки в процентному і кількісному співвідношенні зміниться гучність?

Номер варіанта	$L_{N1}$ , фон	$L_{N2}$ , фон
1	10	27
2	60	85
3	25	32
4	70	90
5	75	96
6	33	25
7	42	69
8	40	72
9	56	75
10	15	32
11	70	83
12	25	47
13	40	44
14	35	60
15	15	42
16	97	115
17	91	99
18	75	125
19	80	60
20	119	50

### 3. ХВИЛЕВА ТЕОРІЯ. ОТРИМАННЯ СПЕКТРУ ВЛАСНИХ ЧАСТОТ ПРИМІЩЕННЯ

**Основні положення та співвідношення** [1, с. 87–88]

Для розрахунку спектра власних частот приміщення з лінійними розмірами  $l \times b \times h$  використовують вираз, отримане для об'ємного резонатора в формі прямокутного паралелепіпеда

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{p}{l}\right)^2 + \left(\frac{q}{b}\right)^2 + \left(\frac{n}{h}\right)^2},$$

де  $l, b, h$  – лінійні розміри;  
 $p, q, n$  – будь-які цілі числа.

Залежно від значень коефіцієнтів  $p, q, n$  прийнята така класифікація типів стоячих хвиль, що утворюються в приміщенні:

- осьові, коли два з трьох коефіцієнтів дорівнюють нулю;
- дотичні, коли один з коефіцієнтів дорівнює нулю;
- косі, коли жоден з коефіцієнтів не дорівнює нулю.

#### **Приклади розв'язання задач**

3.1. Провести розрахунок та побудувати спектр власних частот для приміщення прямокутної форми з лінійними розмірами  $l = 10$  м,  $b = 5$  м,  $h = 4$  м.

#### *Розв'язок*

Для розрахунку резонансних частот приміщення скористаємося можливостями Microsoft Excel або OpenOffice Calc (рис. 3.1). Отриманий спектр власних частот поданий на рис. 3.2.

Початкові дані			Власні частоти приміщення				
l=	10	м	№	Значення параметрів			f, Гц
				p	q	n	
b=	5	м	1	1	0	0	17.2
h=	4	м	2	0	1	0	34.3
			3	0	0	1	42.9
			4	1	1	0	38.3
			5	0	1	1	54.9
			6	1	1	1	57.5
			7	2	0	0	34.3
			8	0	2	0	68.6
			9	0	0	2	85.8
			10	2	2	0	76.7
			11	0	2	2	109.8
			12	2	2	2	115.0
			13	2	0	1	54.9
			14	2	1	0	48.5
			15	2	1	1	64.7
			16	0	2	1	80.9
			17	1	2	0	70.7
			18	1	2	1	82.7
			19	3	0	0	51.5
			20	0	3	0	102.9

Рисунок 3.1 – Знімок екрана з частиною таблиці для розрахунку резонансних частот приміщення, що виконана у Microsoft Excel

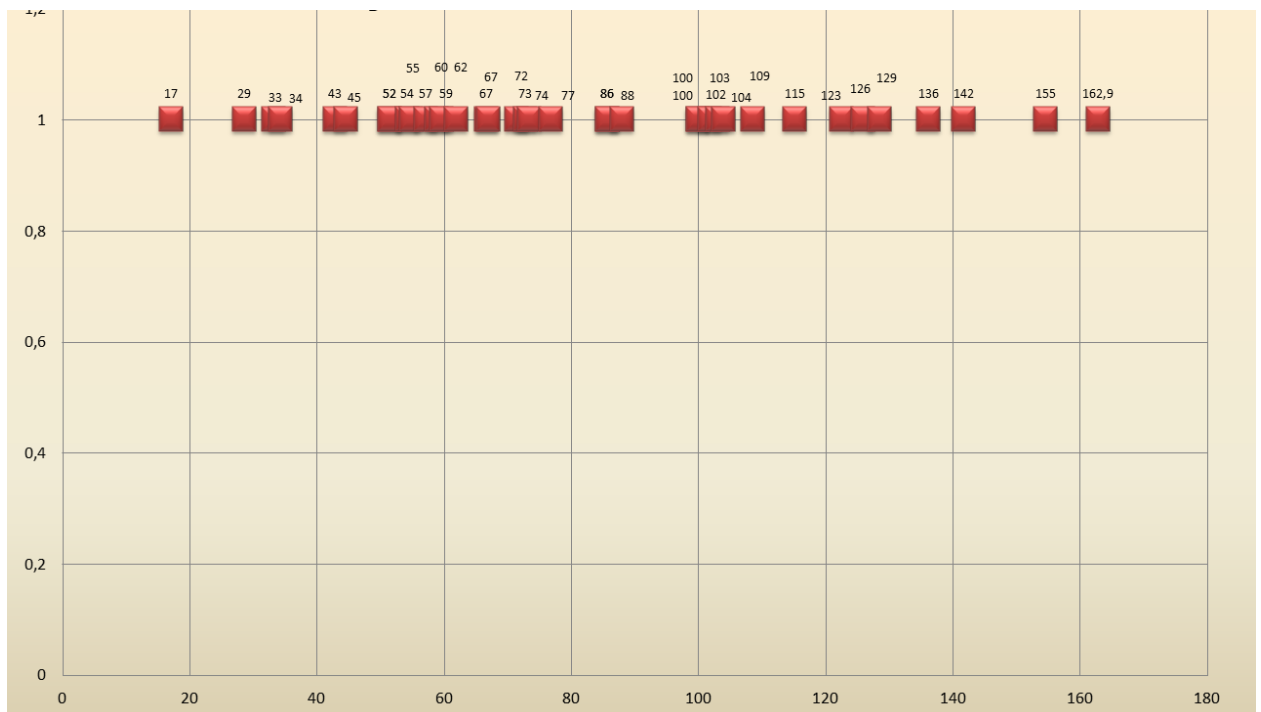


Рисунок 3.2 – Знімок екрана з частиною спектра власних частот приміщення, що виконаний у Microsoft Excel

### Задачі для самостійного розв'язання

3.2. Провести розрахунок і побудувати спектр власних частот для приміщення прямокутної форми з лінійними розмірами  $l \times b \times h$  (розміри приміщення вказані в табл. 3.1).

Таблиця 3.1

Номер варіанта	Довжина $l$ , м	Ширина $b$ , м	Висота $h$ , м
1	8	5	3
2	10	4	3
3	15	6	4
4	14	7	3
5	16	10	5
6	11	4	3
7	18	9	6
8	8	4	3
9	20	10	4
10	18	12	6
11	10	6	4
12	12	7	3
13	14	8	6
14	9	6	3
15	12	8	4
16	18	12	6
17	25	17	7
18	45	20	12
19	5	3	3
20	5	5	5

## 4. ПОГЛИНАННЯ ЗВУКОВОЇ ЕНЕРГІЇ В ПРИМІЩЕННІ

### Основні положення та співвідношення [1, с. 89–96]

1. Середня довжина та середній час пробігу звукової хвилі в приміщенні.

Величину  $l_{\text{сер}}$  можна знайти як відношення шляху, що пройшла звукова хвиля в одиницю часу, с, до загальної кількості відображень за цей час  $(n_1 + n_2 + n_3)$  від усіх поверхонь приміщення:

$$l_{\text{сер}} = \frac{4 \cdot V}{S}.$$

Розрахунки показують, що для різних обсягів коефіцієнти  $k_1, k_2, k_3$  мало відрізняються один від одного та близькі до 2.

Середній час вільного пробігу звукової хвилі

$$t_{\text{сер}} = \frac{l_{\text{сер}}}{c} = \frac{4 \cdot V}{c \cdot S}.$$

Середнє число відбиттів звукової хвилі від поверхонь приміщення в одиницю часу

$$n_{\text{сер}} = \frac{1}{t_{\text{сер}}} = \frac{c \cdot S}{4 \cdot V}.$$

2. Процес наростання звукової енергії в приміщенні.

Універсальною енергетичною характеристикою звукового поля в приміщенні є густина звукової енергії

$$\varepsilon_{\text{н}}(t) = \frac{E(t)}{V} = \frac{4 \cdot P_a}{c \cdot \alpha \cdot S} \left[ 1 - e^{\frac{c \cdot S \cdot \ln(1-\alpha)}{4 \cdot V} t} \right].$$

Оскільки коефіцієнт звукопоглинання  $\alpha < 1$ , тому  $\ln(1 - \alpha) < 0$ , показник степеня має від'ємний знак і при  $t \rightarrow \infty$  другий співмножник прагне до нуля. Тому в сталому режимі

$$\varepsilon(t) \rightarrow \varepsilon_0 = \frac{4 \cdot P_a}{c \cdot \alpha \cdot S}.$$

Величина  $\varepsilon_0$  називається сталою густиною звукової енергії в приміщенні. У сталому режимі потужність, що поглинається поверхнями приміщення, дорівнює потужності, що випромінюється джерелом звуку.

Якщо  $\alpha \leq 0,2$ , то справедливо співвідношення  $-\ln(1 - \alpha) = \alpha$  та тоді можна спростити

$$\varepsilon(t) = \frac{4 \cdot P_a}{c \cdot \alpha \cdot S} \left[ 1 - e^{\frac{-c \cdot S \cdot \alpha}{4 \cdot V} t} \right].$$

3. Процес спаду звукової енергії в приміщенні.

Процес спаду звукової енергії в приміщенні описується виразом

$$\varepsilon_{\text{сп}}(t) = \varepsilon_0 \cdot e^{\frac{c \cdot S \cdot \ln(1-\alpha)}{4 \cdot V} t}.$$

Якщо коефіцієнт звукопоглинання  $\alpha \leq 0,2$ , можна скористатися рівністю  $-\ln(1 - \alpha) = \alpha$  і спростити отриманий вираз

$$\varepsilon_{\text{сп}}(t) = \varepsilon_0 \cdot e^{\frac{-c \cdot S \cdot \alpha}{4 \cdot V} t}.$$

### Приклади розв'язання задач

4.1. Визначити середню довжину вільного пробігу звукової хвилі в приміщенні з лінійними розмірами  $l = 15$  м,  $b = 8$  м,  $h = 3$  м, середній час пробігу звукової хвилі, середнє число відбиттів звукової хвилі в секунду.

*Розв'язок*

1. Знайдемо об'єм і загальну площу приміщення

$$V = 15 \cdot 8 \cdot 3 = 360 \text{ м}^3;$$

$$S = 2(15 \cdot 8 + 15 \cdot 3 + 8 \cdot 3) = 378 \text{ м}^2.$$

2. Для знаходження середньої довжини вільного пробігу, середнього часу вільного пробігу звукової хвилі і середнього числа відбиттів звукової хвилі в секунду скористаємося відомими формулами

$$l_{\text{сер}} = \frac{4 \cdot V}{S} = 3,81 \text{ м};$$

$$t_{\text{сер}} = \frac{4 \cdot V}{c_{\text{зв}} \cdot S} = 0,011 \text{ с};$$

$$t_{\text{сер}} = \frac{4 \cdot V}{c_{\text{зв}} \cdot S} = 0,011 \text{ шт.}$$

4.2. Отримати значення густини звукової енергії, яке буде накопичено в приміщенні з лінійними розмірами  $l = 15$  м,  $b = 8$  м,  $h = 3$  м після включення джерела звуку потужністю  $P_a = 90$  Вт, значення щільності енергії в сталому режимі і щільність звукової енергії після виключення джерела. Середній коефіцієнт звукопоглинання  $\alpha_{\text{сер}} = 0,4$ .

*Розв'язок*

1. Для отримання графіка наростання щільності звукової енергії від часу і графіка спаду щільності звукової енергії скористаємося можливостями Microsoft Excel або OpenOffice Calc (рис. 4.1–4.2).

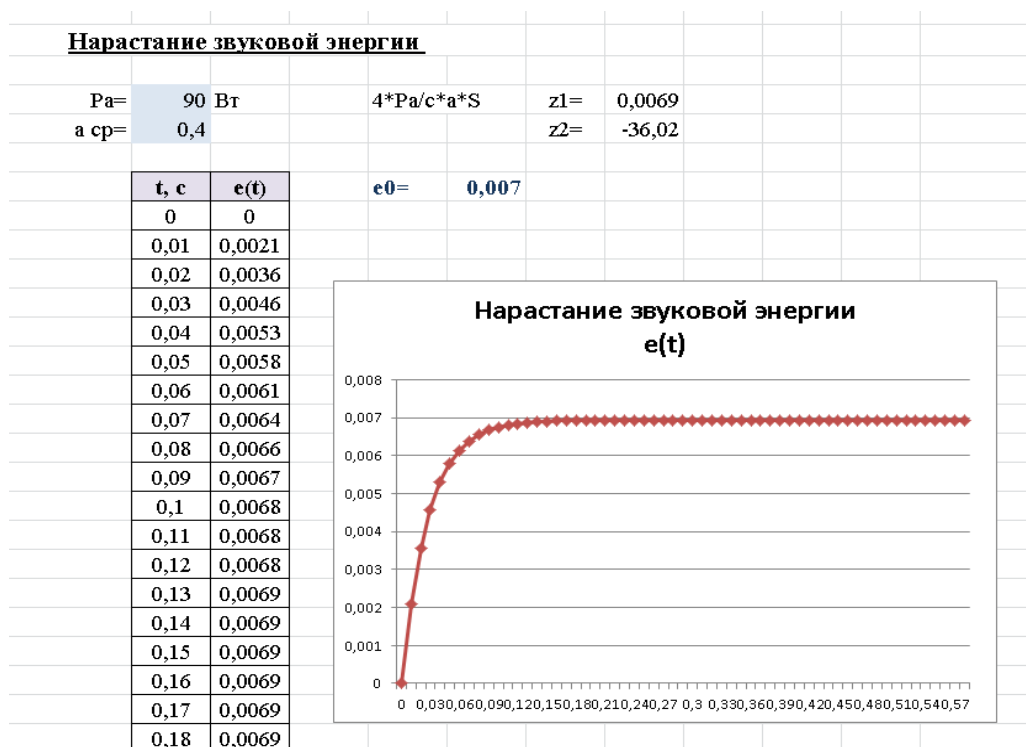


Рисунок 4.1 – Знімок екрана з таблицею та графіком наростання густини звукової енергії в приміщенні

**Спад звукової енергії**

t, c	e(t)
0	0,006941552
0,01	0,00484223
0,02	0,003377803
0,03	0,002356259
0,04	0,00164366
0,05	0,001146571
0,06	0,000799815
0,07	0,000557928
0,08	0,000389195
0,09	0,000271491
0,1	0,000189385
0,11	0,000132109
0,12	9,21558E-05
0,13	6,42853E-05
0,14	4,48436E-05
0,15	3,12816E-05
0,16	2,18212E-05
0,17	1,52218E-05
0,18	1,06183E-05
0,19	7,40704E-06
0,2	5,16694E-06
0,21	3,60431E-06
0,22	2,51427E-06
0,23	1,75388E-06



Рисунок 4.2 – Знімок екрана з таблицею та графіком спаду густинизвукової енергії в приміщенні

**Задачі для самостійного розв’язання**

4.3. Визначити середню довжину вільного пробігу звукової хвилі в приміщенні з лінійними розмірами  $l \times b \times h$ , середній час пробігу звукової хвилі, середнє число відбиттів звукової хвилі в секунду.

Таблиця 4.1

Номер варіанта	Довжина $l$ , м	Ширина $b$ , м	Висота $h$ , м
1	2	3	4
1	8	5	3
2	10	4	3
3	15	6	4
4	14	7	3
5	16	10	5
6	11	4	3
7	18	9	6
8	8	4	3
9	20	10	4
10	18	12	6
11	10	6	4
12	12	7	3
13	14	8	6
14	9	6	3
15	12	8	4

Продовження табл. 4.1

1	2	3	4
16	18	12	6
17	25	17	7
18	45	20	12
19	5	3	3
20	5	5	5

4.4. Отримати значення густини звукової енергії, яке буде накопичено в приміщенні після включення джерела звуку потужністю  $P_a$  (Вт), значення густини енергії в сталому режимі та густину звукової енергії після виключення джерела.

Розміри приміщення наведені у табл. 4.1, значення потужності джерела і середній коефіцієнт звукопоглинання у табл. 4.2.

Таблиця 4.2

<i>Номер варіанта</i>	$P_a$ , Вт	$a_{\text{сеп}}$
1	35	0,01
2	40	0,12
3	100	0,1
4	50	0,15
5	75	0,07
6	80	0,06
7	65	0,18
8	125	0,12
9	250	0,11
10	200	0,08
11	75	0,04
12	45	0,02
13	135	0,01
14	100	0,09
15	110	0,17
16	75	0,12
17	82	0,4
18	75	0,05
19	105	0,07
20	78	0,2

## 5. РОЗРАХУНОК ЧАСТОТНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ СТАНДАРТНОГО ЧАСУ РЕВЕРБЕРАЦІЇ В ПРИМІЩЕННІ

**Основні положення та співвідношення** [5, с. 410–419, 6, с. 186–292]

Для отримання графіка частотної залежності часу реверберації в приміщенні потрібно використовувати такий алгоритм.

1. Створити таблицю для розрахунку еквівалентної площі звукопоглинання (рис. 5.1).

№ п/п	Поверхности, материалы	Площадь, м <sup>2</sup>	Эквивалентная площадь звукопоглощения, м <sup>2</sup> на частотах:											
			125 Гц		250 Гц		500 Гц		1000 Гц		2000 Гц		4000 Гц	
			α	α*S	α	α*S	α	α*S	α	α*S	α	α*S	α	α*S
Таблица 1														

Рисунок 5.1 – Таблица для розрахунку еквівалентного фонду звукопоглинання

2. Заповнити таблицю

Необхідно ввести назви огорожувальної поверхні, оздоблювального матеріалу та площі поверхні (рис. 5.2).

№ п/п	Поверхности, материалы	Площадь, м <sup>2</sup>	Эквивалентная площадь звукопоглощения, м <sup>2</sup> на частотах:											
			125 Гц		250 Гц		500 Гц		1000 Гц		2000 Гц		4000 Гц	
			α	α*S	α	α*S	α	α*S	α	α*S	α	α*S	α	α*S
1	<b>Стены:</b> PLAST/TILE, штукатурка рельефная по ж/б	500.00												

Рисунок 5.2 – Приклад заповнення таблиці для однієї поверхні

Ввести коефіцієнти звукопоглинання для оздоблювального матеріалу в таблицю (рис. 5.3). Коефіцієнти звукопоглинання для матеріалів є інформацією, що знаходиться у довідниках.

№ п/п	Поверхности, материалы	Площадь, м <sup>2</sup>	Эквивалентная площадь звукопоглощения, м <sup>2</sup> на частотах:											
			125 Гц		250 Гц		500 Гц		1000 Гц		2000 Гц		4000 Гц	
			α	α*S	α	α*S	α	α*S	α	α*S	α	α*S	α	α*S
1	<b>Стены:</b> PLAST/TILE, штукатурка рельефная по ж/б	500.00	0.01		0.01		0.02		0.03		0.04		0.05	

Рисунок 5.3 – Коефіцієнти звукопоглинання для матеріалу обробки стіни

Розрахувати еквівалентну звукопоглинання для даного матеріалу та поверхні на кожній розрахунковій частоті (рис. 5.4).

№ п/п	Поверхности, материалы	Площадь, м2	Эквивалентная площадь звукопоглощения, м2 на частотах											
			125 Гц		250 Гц		500 Гц		1000 Гц		2000 Гц		4000 Гц	
			a	a*S	a	a*S	a	a*S	a	a*S	a	a*S	a	a*S
1	Стены: PLAST/TILE, штукатурка рельефная по ж/б	500.00	0.01	5.00	0.01		0.02		0.03		0.04		0.05	

$$500 * 0.01 = 5.00$$

$S$ 
 $\alpha$ 
 $S * \alpha$

№ п/п	Поверхности, материалы	Площадь, м2	Эквивалентная площадь звукопоглощения, м2 на частотах											
			125 Гц		250 Гц		500 Гц		1000 Гц		2000 Гц		4000 Гц	
			a	a*S	a	a*S	a	a*S	a	a*S	a	a*S	a	a*S
1	Стены: PLAST/TILE, штукатурка рельефная по ж/б	500.00	0.01	5.00	0.01	5.00	0.02	10.00	0.03	15.00	0.04	20.00	0.05	25.00

Рисунок 5.4 – Приклад розрахунку еквівалентного звукопоглинання

Виконати розрахунок еквівалентного звукопоглинання для всіх поверхонь, що обгороджують, і додаткового фонду звукопоглинання (людей, крісел, меблів і т.д.).

*!!!! Розрахунок часу реверберації проводять при 75 % заповненні залу слухачами. Для розрахунку кількості слухачів (якщо не дано в умові) керуються такими міркуваннями: на 1 слухача припадає 10 м<sup>3</sup> від загального об'єму приміщення.*

Для кожної частоти знаходять середнє значення коефіцієнта поглинання на кожній частоті за формулою

$$\alpha_{\text{сер},f} = \frac{\sum A_f}{\sum S}$$

Розраховується значення ревербераційного коефіцієнта поглинання

$$\alpha'_{\text{сер},f} = -\ln(1 - \alpha_{\text{сер},f})$$

Значення стандартного часу реверберації на кожній частоті отримують за формулою

$$T_{p,f} = \frac{0.164 \cdot V}{S \cdot \alpha'_{\text{сер},f}}$$

На частотах 2 000 та 4 000 Гц розрахунок ведемо за формулою

$$T_{p,f} = \frac{0.164 \cdot V}{S \cdot \alpha'_{\text{сер},f} + 4 \cdot \mu V}$$

де  $V$  – обсяг приміщення і дорівнює 2 600 м<sup>3</sup>;

$\mu$  – коефіцієнт загасання звуку в повітрі (табл. 5.1);

$S$  – сумарна площа всіх поверхонь.

Таблиця 5.1 – Показник загасання звуку в повітрі при температурі 18–20 °С

Відносна вологість повітря, %	Значення $m$ , $\text{м}^{-1}$ , на середньгеометричних частотах, Гц				
	125	500	2000	4000	8000
30	0,00015	0,00064	0,0032	0,0095	0,034
40	0,00015	0,0006	0,0027	0,0075	0,027
50	0,00014	0,00058	0,0024	0,0061	0,0215
60	0,00014	0,00056	0,0022	0,0055	0,0182
70	0,00014	0,00055	0,002	0,0051	0,0156

3. Розраховується оптимальний час реверберації для приміщення залежно від призначення (рис. 5.5).

1. Для речевих аудиторій	$T_{\text{опт}} = 0.3 \cdot \lg(V) - 0.05$	9. Зали камерної музики, зали оперних театрів	$T_{\text{опт}} = 0.4 \cdot \lg(V) - 0.05$
2. Для оперних театрів	$T_{\text{опт}} = 0.4 \cdot \lg(V) - 0.15$	10. Для багатоцільових залів, залів драм.театрів, спортзалів	$T_{\text{опт}} = 0.37 \cdot \lg(V) - 0.1$
3. Для симфонічної музики	$T_{\text{опт}} = 0.5 \cdot \lg(V) - 0.3$	11. Для лекційних залів, залів засідань, зали драм.театрів, кінозали, пасажирські зали	$T_{\text{опт}} = 0.3 \cdot \lg(V) - 0.03$
4. Для студій концертних	$T_{\text{опт}} = 0.5 \cdot \lg(V) - 0.1$	12. Для багатоцільових залів, обладнаних системою звукоусилення	$T_{\text{опт}} = 0.25 \cdot \lg(V) + 0.15$
5. Для студій малих музикальних	$T_{\text{опт}} = 0.45 \cdot \lg(V) - 0.3$		
6. Для речевих студій	$T_{\text{опт}} = 0.4 \cdot \lg(V) - 0.4$		
7. Для ораторій і органної музики	$T_{\text{опт}} = 0.6 \cdot \lg(V) - 0.2$		
8. Для залів симфонічної музики	$T_{\text{опт}} = 0.5 \cdot \lg(V) - 0.2$		

Рисунок 5.5 – Формули для розрахунку оптимального часу реверберації

Проводять розрахунок нижньої та верхньої межі стандартного часу реверберації (рис. 5.6).

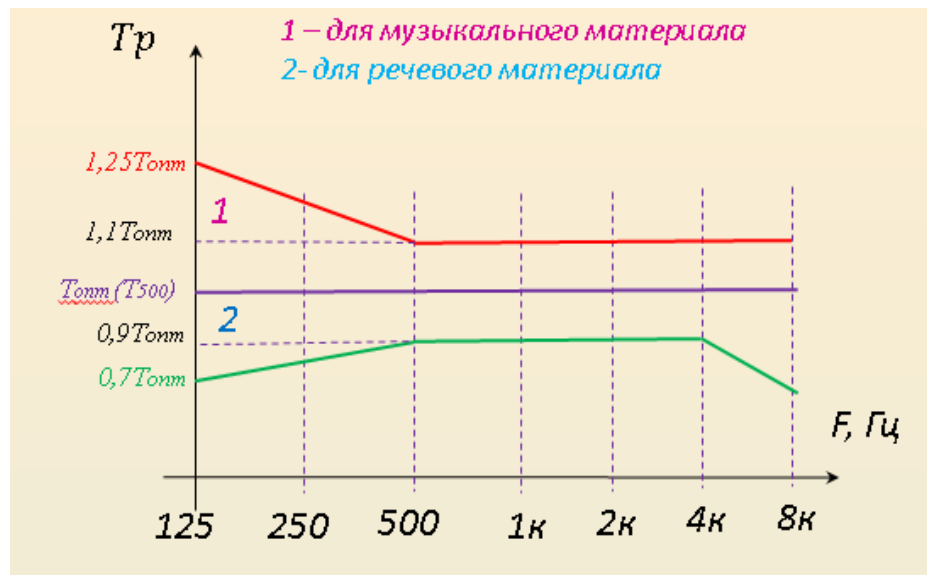


Рисунок 5.6 – Межі відхилень від оптимального значення стандартного часу реверберації

4. Проводять аналіз графіка частотної залежності стандартного часу реверберації. Якщо графік не потрапляє у встановлені межі, то проводять заміну матеріалів на поверхнях приміщення і заново перераховують частотну залежність часу реверберації.

### Приклади розв'язання задач

5.1. Отримати графік залежності часу реверберації на всіх октавних частотах у приміщенні багатоцільового залу з лінійними розмірами  $25 \times 10 \times 10$  м. Оздоблювальні матеріали: стіни бічні та стеля – штукатурка рельєфна по з/б, стіна передня – пофарбована цегла; стіна задня – ДСП 12 мм з повітряним проміжком 5–10 см; підлога – палубний брус; стільці – м'які, обшиті тканиною.

#### Розв'язок

1. Використовуючи довідникові дані про коефіцієнти звукопоглинання, створюється таблиця для розрахунку еквівалентної площі звукопоглинання (рис. 5.7).

№ п/п	Поверхности, материалы	Площадь, м <sup>2</sup>	Эквивалентная площадь звукопоглощения, м <sup>2</sup> на частотах:											
			125 Гц		250 Гц		500 Гц		1000 Гц		2000 Гц		4000 Гц	
			α	α*S	α	α*S	α	α*S	α	α*S	α	α*S	α	α*S
1	Стены: PLASTITILE, штукатурка рельефная по ж/б	500.00	0.01	5.00	0.01	5.00	0.02	10.00	0.03	15.00	0.04	20.00	0.05	25.00
2	Стены передняя PNTD BRICK, окрашенная стена	100.00	0.01	1.00	0.01	1.00	0.02	2.00	0.02	2.00	0.02	2.00	0.03	3.00
3	Стена задняя: PLYWD 1/2, ДСП 12 мм с зазором 5-10 см	100.00	0.30	30.00	0.25	25.00	0.20	20.00	0.17	17.00	0.15	15.00	0.10	10.00
4	Пол: WOODFLR HWD, палубный брус-сцена	250.00	0.15	37.50	0.11	27.50	0.10	25.00	0.07	17.50	0.06	15.00	0.07	17.50
5	Потолок: PLASTITILE, штукатурка рельефная по ж/б	250.00	0.01	2.50	0.01	2.50	0.02	5.00	0.03	7.50	0.04	10.00	0.05	12.50
7	Зрители, сидящие на мягк. стульях	188	0.50	92.00	0.70	128.80	0.85	156.40	0.95	174.80	0.95	174.80	0.9	165.60
8	Кресло мягк., обитое тканью с пор. заполн. сид. и спин.	62	0.15	9.15	0.20	12.20	0.20	12.20	0.25	15.25	0.3	18.30	0.3	18.30

$\Sigma S$        $\Sigma A_{125}$        $\Sigma A_{250}$        $\Sigma A_{500}$        $\Sigma A_{1000}$        $\Sigma A_{2000}$        $\Sigma A_{4000}$

AΣ	1450.00		177.15		202.00		230.60		249.05		255.10		251.90
a'cp	$\Sigma A_{125}/\Sigma S$	→	0.12	$\Sigma A_{250}/\Sigma S$	→	0.14	0.16		0.17		0.18		0.17
a'cp	$-\ln(1-a'cp)$	→	0.13	→	0.15	→	0.17	→	0.19	→	0.19	→	0.19
Tr			2.16		1.87		1.62		1.49		1.34		1.23

Рисунок 5.7 – Приклад розрахунку стандартного часу реверберації на відповідних частотах

2. Розраховується оптимальний час реверберації та визначаються межі допустимих відхилень від оптимального часу реверберації для багатоцільового залу розмірами 25 x 10 x 10 м (рис. 5.8):

$$T_{\text{опт}} = 0,25 \cdot \lg V + 0,15;$$

$$V = 25 \cdot 10 \cdot 10 = 2\,500 \text{ м}^3;$$

$$T_{\text{опт}} = 0,9995 = 1 \text{ с.}$$

f	T <sub>опт</sub>	Tr	Нижня межа	Верхня межа
125	1	2,16	0,7	1,25
250	1	1,87	0,8	1,18
500	1	1,62	0,9	1,1
1000	1	1,49	0,9	1,1
2000	1	1,34	0,9	1,1
4000	1	1,23	0,9	1,1

Рисунок 5.8 – Приклад розрахунку оптимального часу реверберації і визначення меж допустимих відхилень від оптимального часу реверберації

3. Будується графік частотної залежності часу реверберації при існуючих матеріалах (рис. 5.9).

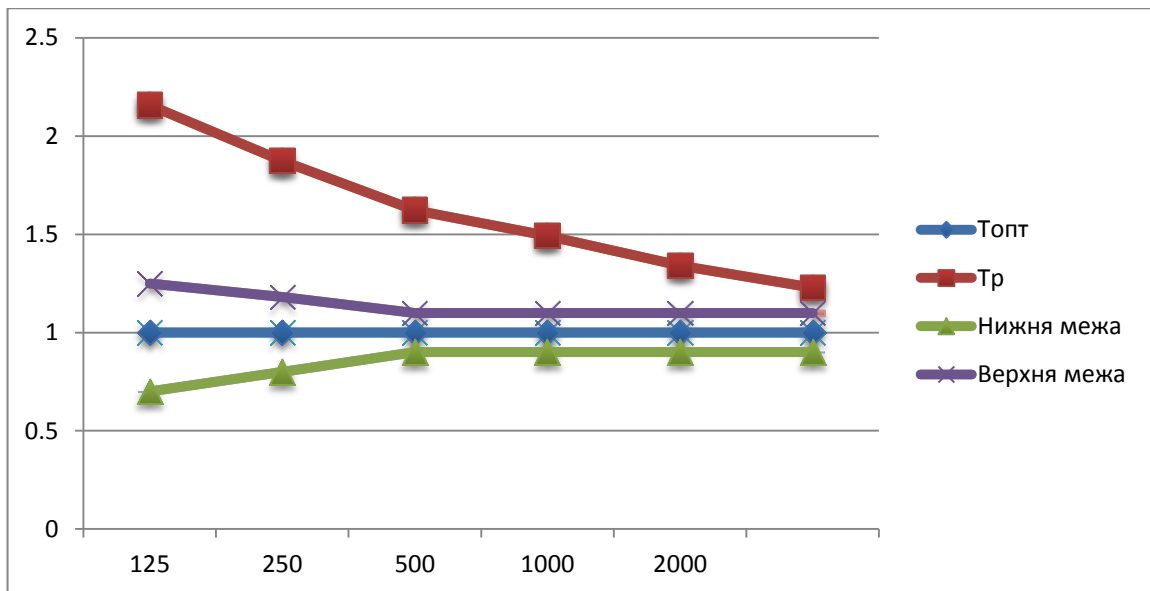


Рисунок 5.9 – Графік частотної залежності стандартного часу реверберації з вихідними матеріалами

4. Аналіз графіка частотної залежності часу реверберації показує, що час реверберації у приміщенні не вкладається у межі допустимих відхилень від оптимального значення. Графік знаходиться набагато вище, ніж межі, це говорить про надлишковий час реверберації, що неодмінно призведе до зниження розбірливості мовного та музикального контенту. Для усунення такого недоліку потрібно провести заміну оздоблювальних матеріалів на огорожувальних поверхнях на матеріали, що більш поглинають.

Наприклад, якщо провести заміну матеріалу на площі 600 м<sup>2</sup> (бічні стіни та задня стінка) з штукатурки рельєфної по з/б на ДСП 12 мм повітряним проміжком 5–10 см, то частотна залежність часу реверберації потрапить у встановлені межі (рис. 5.10–5.11).

№ п/п	Поверхности, материалы	Площадь, м <sup>2</sup>	Эквивалентная площадь звукопоглощения, м <sup>2</sup> на частотах:											
			125 Гц		250 Гц		500 Гц		1000 Гц		2000 Гц		4000 Гц	
			α	α*S	α	α*S	α	α*S	α	α*S	α	α*S	α	α*S
1	Стены PLYWD 1/2, ДСП 12 мм с зазором 5-10 см	600.00	0.30	180.00	0.25	150.00	0.20	120.00	0.17	102.00	0.15	90.00	0.10	60.00
2	Стена задняя: PLYWD 1/2, ДСП 12 мм с зазором 5-10 см	100.00	0.30	30.00	0.25	25.00	0.20	20.00	0.17	17.00	0.15	15.00	0.10	10.00
3	Пол: WOODFLR HWD, палубный брус-сцена	250.00	0.15	37.50	0.11	27.50	0.10	25.00	0.07	17.50	0.06	15.00	0.07	17.50
4	Потолок: PLAST/TILE, штукатурка рельефная по ж/б	250.00	0.01	2.50	0.01	2.50	0.02	5.00	0.03	7.50	0.04	10.00	0.05	12.50
5	Зрители, сидищие на мягк. стульях	188	0.50	92.00	0.70	128.80	0.85	156.40	0.95	174.80	0.95	174.80	0.9	165.60
6	Кресло мягк., обитое тканью с пор. заполн. сид. и спин.	62	0.15	9.15	0.20	12.20	0.20	12.20	0.25	15.25	0.3	18.30	0.3	18.30
	<b>A<sub>Σ</sub></b>	1450.00		351.15		346.00		338.60		334.05		323.10		283.90
	<b>a<sub>ср</sub></b>			0.24		0.24		0.23		0.23		0.22		0.20
	<b>a'<sub>ср</sub></b>			0.28		0.27		0.27		0.26		0.25		0.22
	<b>Тр</b>			1.00		1.02		1.04		1.06		1.04		1.09

Рисунок 5.10 – Таблица розрахунку стандартного часу реверберації з заміною матеріалів на стінах

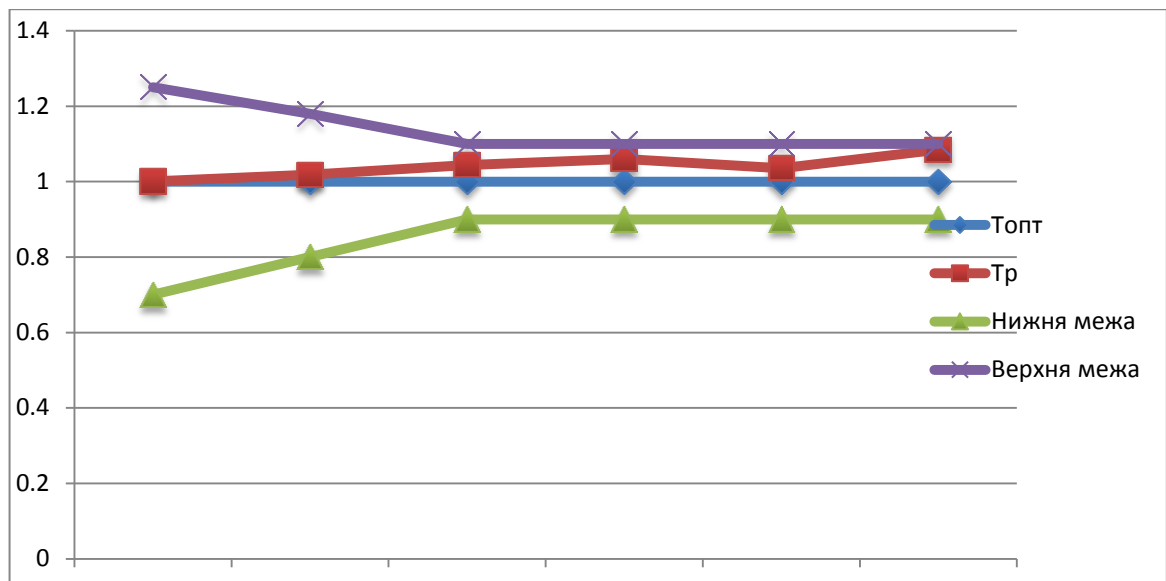


Рисунок 5.11 – Графік частотної залежності стандартного часу реверберації після заміни матеріалів

### Задачі для самостійного розв’язання

5.1. Отримати графік залежності часу реверберації на всіх октавних частотах у приміщенні розміри, призначення та оздоблення якого наведені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2

Номер варіанта	Тип приміщення	Довж./Шир./Вис., м	Двері, шт./м	Вікна, шт./м	Матеріал	Інше
1	2	3	4	5	6	7
1	Зал засідань	12x7x4	2/ 1,9x 2,2	4/ 1,5x 1,5	Стіни – бетонні, гладкі, не пофарбовані, підлога – лінолеум, стеля – гіпсова штукатурка; стільці – м’які, обшиті тканиною; двері – соснова деревина	Стіл – дерев’яний (1/4x1,2 шт/м), екран – 2,5x1,5 м
2	Спортивна зала	35x25x 12	4/ 1,9x 2,0	10/ 2x2	Стіни – цегляні не обштукатурені, підлога – ковролін, стеля – штукатурка по металевій сітці з повітряною порожниною позаду; стільці – соснова деревина; двері – монолітна лакована деревина	Висота огорожі – 1,0 м навколо всього поля; підйом трибун – 3 м
3	Спортивна зала	37x24x 11	6/ 1,8x2	12/ 2x1,5;	Стіни і стеля – дерев’яно-волокниста плитка, підлога – дерев’яний паркет по асфальту; стільці – соснова деревина; двері – монолітна лакована деревина	Висота огорожі – 1,0 м навколо всього поля; підйом трибун – 4 м

Продовження табл. 5.2

1	2	3	4	5	6	7
4	Театр опери та балету	37x15x 10	4/ 1,6x2	1/ 2x1,5	Стіни – дерев'яно-волокниста плитка, підлога – паркет на шпонках, стеля – гіпсова штукатурка; стільці м'які, обшиті тканиною; двері – дерев'яні пофарбовані	Планшет сцени – 9x1 м; підйом – на 1 м; балкон – 3,5x0,5 м на висоті 3,5 м (по ширині залу)
5	Кінотеатр	27x15x 10	4/ 1,6x 2,0	2/ 1,5x2	Стіни – бетонні, гладкі, пофарбовані масляною фарбою, підлога – лінолеум, стеля – штукатурка по металевій сітці з повітряною порожниною позаду; крісла шкіряні на поролоні; двері, сцена – соснова деревина	Планшет сцени – 5x1 м; (по ширині залу) екран – 12x4 м
6	Драматичний театр	25x10x 9	6/ 1,8x 1,9	1/2x1	Стіни – штукатурка алебастрова, гладка по дерев'яному обрешетуванню, підлога – лінолеум, стеля – штукатурка по металевій сітці з повітряною порожниною позаду; стільці – м'які, обшиті тканиною; двері – монолітна лакована деревина	Балкон – 3x1,0 м на висоті 4 м (по ширині залу); планшет сцени – 6x1,2 м; (по ширині залу)
7	Зал для органної музики	30x16x 8	4/ 1,6x 2,0	1/ 1x3	Стіни і стеля – дерев'яно-волокниста плитка, підлога – дерев'яний паркет по асфальту; двері – монолітна лакована деревина; крісла м'які, обшиті тканиною	Планшет сцени – 10x1,2 м; балкон під орган – 2,5x0,5 м на висоті 3 м (по ширині залу)
8	Театр опери та балету	26x12x 10	5/ 0,9x 2,50	4/ 2,5x2	Стіни і стеля – вапняна штукатурка по обрешетуванню, підлога – паркет на шпонках; стільці – крісла м'які, обшиті тканиною; двері – монолітна лакована деревина	Планшет сцени – 6,5x1 м; підйом – 1,5 м; балкон – 4x1,2 м (по ширині залу)
9	Багатоцільовий зал	18x11x 7	6/ 0,9x 2,2	2/ 1x 1,5	Стіни – дерев'яно-волокниста плитка, підлога – паркет на шпонках, стеля – гіпсова штукатурка; стільці м'які, обшиті тканиною; двері подвійні – дерев'яні пофарбовані	Планшет сцени – 6x1 м; підйом – 1,1 м; балкон – 3x0,5 м на висоті 3 м (по ширині залу)

Продовження табл. 5.2

1	2	3	4	5	6	7
10	Зал для органної музики	29x12x8	4/ 1,5x 2,2	1/ 2x1	Стіни – цегляні, обштукатурені, підлога лінолеум, стеля – штукатурка по металевій сітці з повітряною порожниною позаду; крісла – м'які, обшиті тканиною; двері – соснова деревина	Планшет сцени – 10x1,2 м; балкон під орган – 3x0,5м на висоті 3 м (по ширині залу)
11	Багатоцільовий зал	30x10x8	4/ 1,9x2,2	2/ 2x1	Стіни, стеля – вапняна штукатурка, підлога – паркет на балках; стільці – соснова деревина	Планшет сцени – 6 x1,0 м; (по ширині залу), підйом – 0,7 м;
12	Студія звукозапису	10x5x3,5	1/ 0,9x 2,0	1/ 2x1	Стіни, стеля – штукатурка по металевій сітці з повітряною порожниною позаду, підлога – лінолеум; крісла м'які, обшиті тканиною; двері – монолітна лакована деревина	Стіл – монолітна лакована деревина (2/1,2x1 шт/м)
13	Студія звукозапису	10x9x4	1/ 0,8x1, 9	1/ 1x1,5	Стіни – цегляні не обштукатурені, підлога – ковролін, стеля – соснова панель завтовшки 19 мм; крісла м'які, обшиті тканиною; двері – монолітна лакована деревина	Стіл – монолітна лакована деревина (2/1,7x0,8 шт/м)
14	Кінотеатр	16x11x6	4/ 1,8x 2,0	2/ 1x1,5	Стіни і стеля – вапняна штукатурка по обрешетуванню, підлога – паркет на шпонках; двері – монолітна лакована деревина; стільці – напівм'які, обшиті тканиною	Підйом – 1,5 м; екран – 8x4,5 м
15	Радіостудія	8x3x4	1/ 0,8x 1,8	1/ 1x1,7	Стіни – дерев'яно-волокниста плитка, підлога – паркет на шпонках, стеля – гіпсова штукатурка; крісла – шкіряні на поролоні; двері – монолітна лакована деревина	Стіл – монолітна лакована деревина (1/1,2x0,7 шт/м)
16	Лекційний зал	20x9,5x3,5	1/2x2	4/ 2,5x 1,5;	Підлога – паркетна; парти – дерев'яні; стеля і стіни покриті гіпсовою штукатуркою; стільці – дерев'яні	Столи – дерев'яні (7x2/1,2x0,8 шт/м), дошка – дерев'яна (3x1,5 м)

Продовження табл. 5.2

1	2	3	4	5	6	7
17	Спортивна зала	40x15x 15	4/ 1,8x 2,2	10/ 1x0,7 5	Стіни і стеля – дерев'яно-волокниста плитка, підлога – дерев'яний паркет по асфальту; двері – монолітна лакована деревина; стільці – соснова деревина	Висота огорожі – 1,2 м навколо всього поля; підйом трибун – 4 м
18	Зал засідань	9x6x 3,5	1/ 1,8x 1,9	4/ 1,5x 1,5	Стіни і стеля – бетонні, гладкі, пофарбовані масляною фарбою, підлога – дерев'яний паркет по асфальту; стільці – напівм'які, обшиті тканиною; двері – соснова деревина	Стіл – монолітна лакована деревина (1/6x1,8 шт/м)
19	Радіостудія	8x7x3	1/ 0,8x 1,9	1/ 2x1,5	Стіни – бетонні, гладкі, не пофарбовані, підлога – лінолеум, стеля – гіпсова штукатурка; стільці – м'які, шкіряні на поролоні; двері – соснова деревина	Стіл – монолітна лакована деревина (2/1,2x0,8 шт/м)
20	Лекційний зал	12x8x 3	4/ 1,6x 2,2	2/ 0,5x 2,5	Стіни – бетонні, гладкі, пофарбовані масляною фарбою, стеля – гіпсова штукатурка; підлога – паркет по асфальту, стільці та двері – монолітна лакована деревина	В аудиторії 2 рядка по 6 парт у кожному ряду (1,2x0,7м), дошка – дерев'яна (2,5x1 м)

## 6. РОЗРАХУНОК ЧАСУ ЗАПІЗНЮВАННЯ ВІДБИТИХ СИГНАЛІВ У ПРИМІЩЕННІ

### Основні положення та співвідношення [5, с.140–151]

Для подання структури відображень у часі в будь-якому місці залу необхідно провести розрахунок довжини шляху, а відповідно запізнювання  $n$ -го відбиття в порівнянні з прямим сигналом. Схема розрахунку подана на рис. 6.1–6.2.

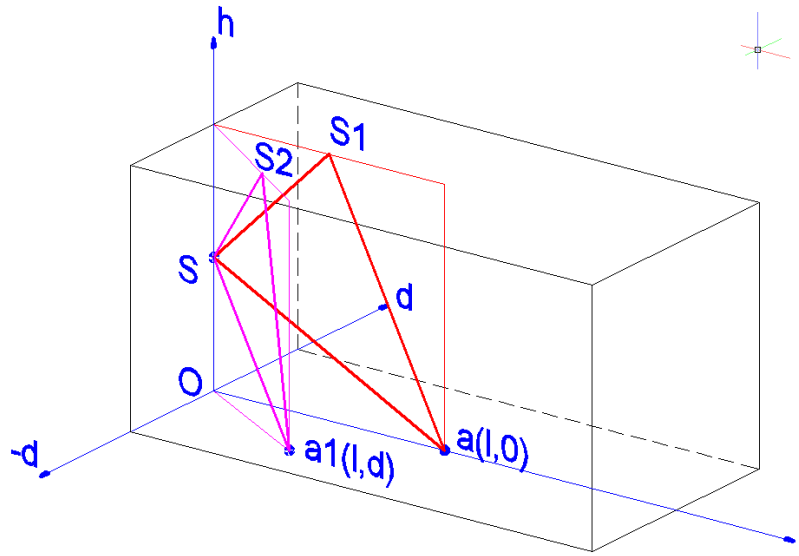


Рисунок 6.1 – Геометрична побудова для розрахунку часу запізнення першого відбиття від стелі

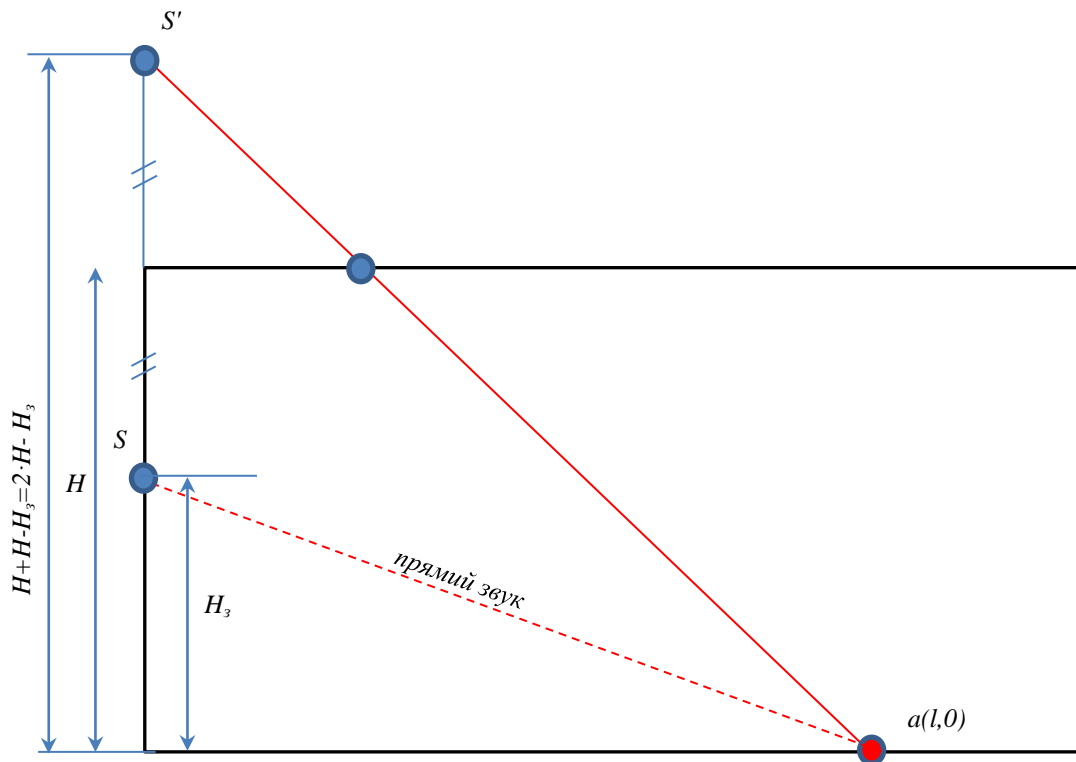


Рисунок 6.2 – Схема розрахунку часу запізнювання відбитого звуку від прямого звуку

Для випадку, коли  $a(l,0)$ :

– довжина прямого шляху променя  $S_a = \sqrt{l^2 + H_3^2}$ ;

– довжина відбитого променя  $SS_1 + S_1a = \sqrt{(2H - H_3)^2 + l^2}$ .

Для випадку, коли  $a(l,d)$ :

– довжина прямого шляху променя  $S_{a1} = \sqrt{l^2 + d^2 + H_3^2}$ ;

– довжина відбитого променя  $SS_1 + S_1a = \sqrt{(2H - H_3)^2 + l^2 + d^2}$ .

Різниця шляхів прямого і відбитого променів у загальному вигляді:

$$\Delta r = \sqrt{(2H - H_3)^2 + d^2 + l^2} - \sqrt{d^2 + l^2 + H_3^2}.$$

Час запізнювання відбитого звуку після прямого:

$$t = 3 \cdot \left( \sqrt{(2H - H_3)^2 + d^2 + l^2} - \sqrt{d^2 + l^2 + H_3^2} \right), \text{ мс.}$$

*! Формула справедлива, якщо все лінійні розміри виражені в метрах (м), а одиниця виміру часу – мс.*

### Приклади розв'язання задач

6.1. Провести розрахунок часу запізнювання відображень від стелі у приміщенні з лінійними розмірами  $5 \times 4 \times 4$  м, де джерело звуку розташований в одній з торцевих стін на висоті  $h_3 = 3$  м (по центру стіни), а слухачі в точках з координатами (2,0), (2,1).

*Розв'язок*

Для точки з координатами (2,0)

$$S_a = \sqrt{l^2 + H_3^2} = \sqrt{2^2 + 3^2} = 3,606 \text{ м;}$$

$$SS_1 + S_1a = \sqrt{(2 \times 4 - 3)^2 + 2^2} = 5,385 \text{ м;}$$

$$\Delta r = 5,385 - 3,606 = 1,78.$$

$$\Delta t_1 = 3 \times 1,78 = 5,339 \text{ мс.}$$

Для точки з координатами (2,1)

$$S_a = \sqrt{3^2 + 2^2 + 1^2} = 3,742 \text{ м;}$$

$$SS_1 = \sqrt{(2 \times 4 - 3)^2 + 2^2 + 1^2} = 5,477 \text{ м;}$$

$$\Delta r = 5,477 + 3,742 = 1,736;$$

$$\Delta t_2 = 5,207 \text{ мс.}$$

### Задачі для самостійного розв'язання

6.2. Провести розрахунок часу запізнювання відображень від стелі в приміщенні з лінійними розмірами  $l \times b \times h$  м, де джерело звуку розташований в одній з торцевих стін на висоті  $h_3$  (м) (по центру стіни), а слухачі в точках з координатами  $(l_1, d_1)$ ,  $(l_2, d_2)$ ,  $(l_3, d_3)$ .

Таблиця 6.1

Номер варіанта	Довжина $l$ , м	Ширина $b$ , м	Висота $h$ , м	Висота підвісу $h_3$ , м	Координати слухача, м		
					$(l_1, d_1)$	$(l_2, d_2)$	$(l_3, d_3)$
1	8	5	3	2,5	(6;0)	(6;1)	(6;1,5)
2	10	4	4	3	(5;0)	(5;0,5)	(5;1,5)
3	15	6	4	3	(10;0)	(10;2,5)	(10;0,5)
4	14	7	5	4	(5;0)	(5;2)	(5;1)
5	16	10	5	3,5	(8;0)	(8;2)	(8;4)
6	11	4	3	2,5	(5;0)	(5;1,5)	(5;0,5)
7	18	9	6	5	(17;0)	(17;3)	(17;-3)
8	8	4	3	2,5	(5;0)	(5;1)	(5;4)
9	20	10	4	3	(18;0)	(18;4)	(18;-4)
10	18	12	6	4,5	(12;0)	(12;4)	(12;1)
11	10	6	4	3	(8;0)	(8;1)	(8;2)
12	12	7	3	2,5	(10;0)	(10;2,5)	(10;1,5)
13	14	8	6	4,5	(13;0)	(13;2,5)	(13;0,5)
14	9	6	3	2,5	(5;0)	(5;2)	(5;0,5)
15	12	8	4	3	(10;0)	(10;3)	(10;1)
16	13	10	5	3,5	(10;0)	(10;4)	(10;0,5)
17	22	14	4	3	(20;0)	(5;5)	(10;1,5)
18	12	10	8	6	(6;0)	(7;3)	(7;0,5)
19	14	10	5	3	(8;0)	(4;2)	(4;4)
20	30	20	10	8	(25;0)	(10;8)	(10;2)

## 7. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОЇ ГОЛОВКИ ГУЧНОМОВЦЯ

### Основні положення та співвідношення [1, с. 17–40]

Вихідними даними для проектування електродинамічної головки гучномовця є такі параметри: номінальна потужність  $P_e$ , Вт; повний опір гучномовця  $Z_{em}$ , Ом; діапазон частот  $f_n - f_6$ , Гц; нерівномірність частотної характеристики  $N$ , дБ; середній номінальний звуковий тиск  $P_n$ , Па; коефіцієнт нелінійних спотворень на нижній граничній частоті  $K_f$ , %; умови експлуатації  $t$ , °С.

Метою розрахунку є визначення параметрів звукової котушки, дифузора і магнітного ланцюга.

#### Розрахунок звукової котушки

1. Виходячи з заданого коефіцієнта нелінійних спотворень  $K_f$  на нижній граничній частоті  $f_n$ , по кривій, що показана на рис. 7.1, визначається амплітуда коливань рухомої системи  $X$ , м.

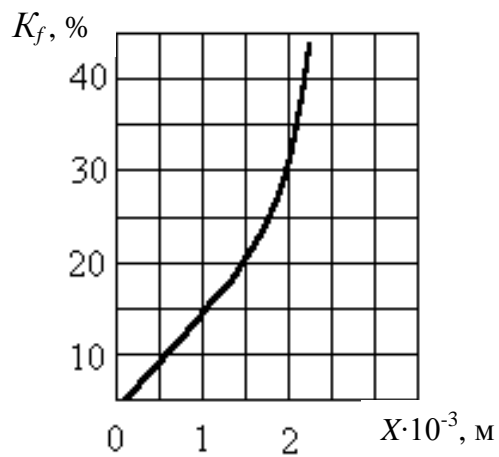


Рисунок 7.1 – Залежність коефіцієнта нелінійних спотворень від амплітуди коливань рухомої системи гучномовця

2. Визначають величину вільного повітряного зазору  $L_3$ , яка залежить від максимальної амплітуди коливань рухомої системи (рис. 7.2).

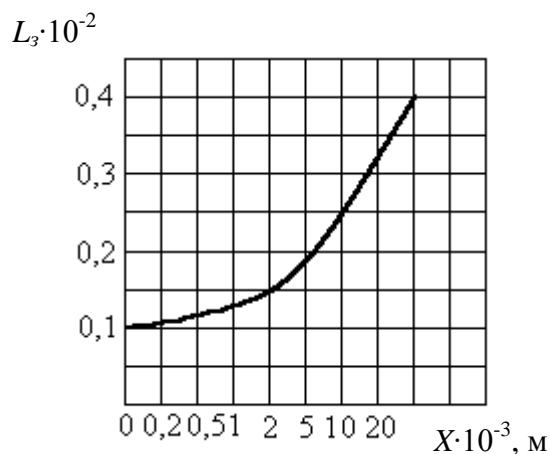


Рисунок 7.2 – Залежність величини вільного повітряного зазору від амплітуди коливань рухомої системи

3. По кривим на рис. 7.3 знаходять питому теплову навантаження  $P_t$  звукової котушки.

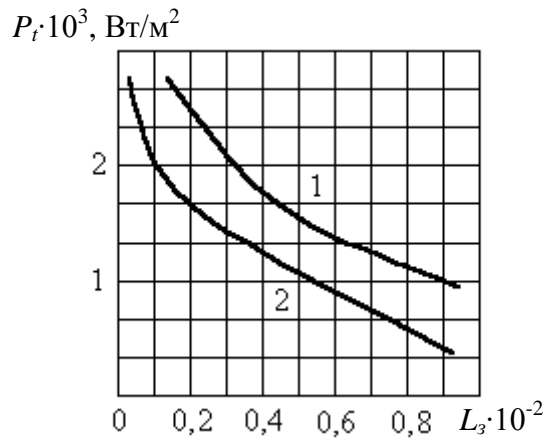


Рисунок 7. 3 – Залежність питомого теплового навантаження звукової котушки від величини вільного повітряного зазору: 1 –  $t = 20^\circ\text{C}$ ; 2 –  $t = 40^\circ\text{C}$

4. Визначають площу бічної поверхні звукової котушки,  $\text{м}^2$ :

$$S_b = \frac{P_c}{P_t} . \quad (7.1)$$

5. Визначають діаметр звукової котушки,  $\text{м}$ :

$$d_k = \sqrt{S_b k_K / \pi} . \quad (7.2)$$

6. Визначають діаметр ядра магнітної ланцюга, ( $\text{м}$ ):

$$d_{кр} = d_k - 2 \cdot L_3 . \quad (7.3)$$

7. Визначають висоту звукової котушки, ( $\text{м}$ ):

$$h_K = \frac{d_K}{k_K} . \quad (7.4)$$

8. Визначають діаметр проводу для звукової котушки, ( $\text{м}$ ):

$$d = \sqrt[3]{\frac{1,75 \cdot d_K^2 \cdot 10^{-7}}{Z_{em} \cdot k_K}} . \quad (7.5)$$

Для малопотужних гучномовців  $k_K = 3 \dots 4$ , для потужних –  $4 \dots 6$ .

За принциповими схемами вибираємо найближчий номінальний діаметр і визначаємо площу перерізу цього проводу  $S_{ПР}$  ( $\text{м}^2$ ).

9. Перевіряємо обраний провід на допустиму густину струму. Густина струму в звуковий котушці,  $\text{А/м}$ :

$$j = \left( \frac{1}{S_{ПР}} \right) \cdot \sqrt{\frac{P_e}{Z_{em}}} . \quad (7.6)$$

На рис. 7.4 наведена залежність допустимої щільності струму повітряної звукової котушки від температури навколишнього середовища.

За значенням температури (умови експлуатації), при якій повинен працювати гучномовець, знаходять допустимі значення густини струму і порівнюють з розрахунковим значенням. Якщо розрахункове значення менше допустимого, то діаметр проводу обраний правильно, інакше необхідно змінити діаметр проводу.

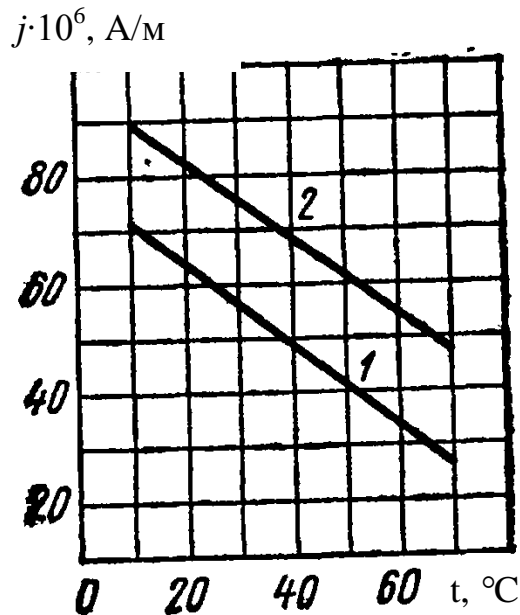


Рисунок 7.4 – Залежність допустимої густини струму повітряної звукової котушки від температури навколишнього середовища: 1 – для широкосмугових і низькочастотних гучномовців; 2 – для високочастотних гучномовців

10. Задаються кількістю шарів звукової котушки  $s$  та визначається кількість витків котушки, шт:

$$\omega = \frac{2 \cdot k_3 \cdot h_K}{d}, \quad (7.7)$$

де  $k_3$  – коефіцієнт заповнення, що дорівнює 0,9...0,95. Кількість шарів звукової котушки обов'язково повинно бути парним.

11. Визначають довжину проводу, м:

$$l = \pi \cdot d_K \cdot \omega. \quad (7.8)$$

12. Вибравши матеріал для каркаса звукової котушки і товщину каркаса  $\delta$ , м, визначають товщину звукової котушки, м:

$$\Delta_K = 2 \cdot d + \delta, \quad (7.9)$$

де  $\delta$  – товщина каркаса (якщо каркас виконаний з кабельного паперу, то товщина дорівнює  $\delta = 1 \cdot 10^{-3}$  м).

13. Визначають масу звукової котушки, (кг):

$$m_K = l \cdot S_{IP} \cdot \gamma. \quad (7.10)$$

### *Розрахунок конструктивних параметрів дифузора*

1. Обирають склад паперової маси дифузора, її щільність  $\gamma$  і модуль пружності  $E$  по табл. 7.1.

Таблиця 7.1 – Характеристики матеріалів, що застосовуються для виготовлення дифузорів

Тип матеріалу	$E \cdot 10^7$ , Па	$\gamma \cdot 10^3$ , кг/м <sup>3</sup>
Папір дифузорний з каніфольно-парафіновим проклеюванням	30	0,6
Дифузор з паперової маси, просоченої цапон-лаком з сухим залишком 0,4 %	1,5	0,4
Шифон або міткаль, просочений розчином 15 %-ного бакелітового лаку	15	0,46

2. Визначають номінальний звуковий тиск гучномовця з урахуванням спаду частотної характеристики на нижній граничній частоті, Па:

$$P'_H = P_H \cdot 10^{-0,05 \cdot N}. \quad (7.11)$$

3. Визначають площу поверхні, що випромінює дифузора, м<sup>2</sup>:

$$S_D = \frac{0,128 \cdot P'_H}{X \cdot f_H^2}. \quad (7.12)$$

4. Обирають форму дифузора.

Для круглих дифузорів діаметр випромінюючої поверхні розраховується за формулою, м:

$$D_D = \sqrt{\frac{4 \cdot S_D}{\pi}}. \quad (7.13)$$

5. Для ефективного відтворення високих частот дифузор повинен мати достатню жорсткість, яка визначається кутом розчину конуса  $\alpha$  (°) або

радіусом кривизни його утворює  $R$ . За рис. 7.5 визначають кут розчину дифузора залежно від межі відтворення високих частот.

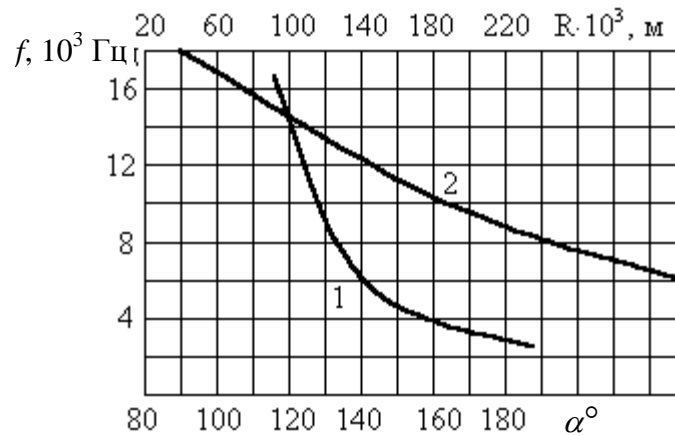


Рисунок 7.5 – Залежність межі відтворення високих частот: 1 – від кута розчину дифузора  $\alpha$ ; 2 – від радіуса кривизни  $R$

6. Визначають статичну масу дифузора, кг:

$$m_D = \frac{S_D \cdot \Delta_D \cdot \gamma}{\sin(\alpha / 2)}. \quad (7.14)$$

де  $\Delta_D$  – товщина дифузора, яку вибирають по табл. 7.2.

Таблиця 7.2 – Залежність товщини дифузора від номінальної потужності гучномовця

Номінальна потужність $P_e$ , Вт	0,1	1	2	5	10
Товщина дифузора в середній частині утворює $\Delta_D$ , мм	0,1	0,2	0,25	0,3	0,4

7. Визначають масу повітря, яка коливається перед дифузором, кг:

$$m_c = 0,435 \cdot D_D^3. \quad (7.15)$$

8. Визначають масу рухомої системи, (кг):

$$m = m_K + m_D + m_c. \quad (7.16)$$

*Розрахунок магнітного ланцюга*

1. Вибирають магнітний ланцюг з кільцевим або керновим магнітом, матеріал постійного магніту та магнітопроводу.

2. Визначають геометричні розміри зазору магнітної ланцюга (рис. 7.6), м:

$$l_3 = \Delta_K + 2 \cdot l_3'. \quad (7.17)$$

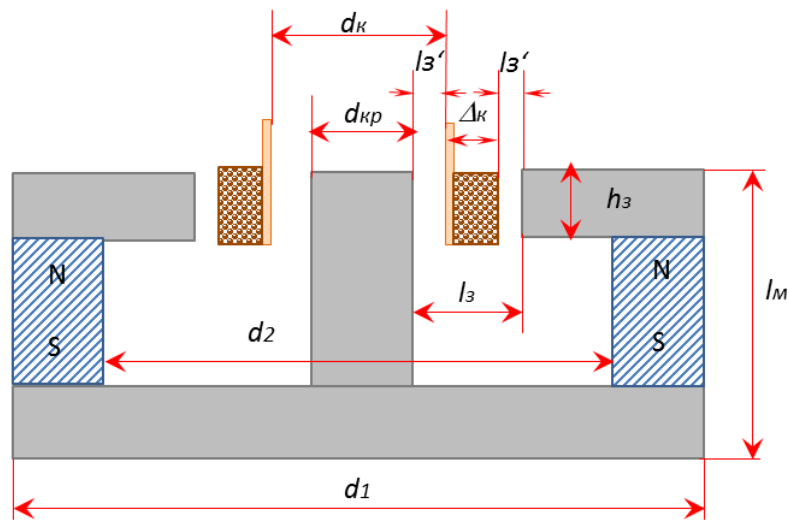


Рисунок 7.6 – Магнітний ланцюг

3. Висота робочого зазору, при якому нелінійні спотворення мінімальні, визначаються виразом, м:

$$h_3 = (0,8...0,9) \cdot h_K. \quad (7.18)$$

4. Визначається необхідна величина індукції в робочому зазорі магнітного ланцюга, Вб/м:

$$B_c = \frac{2\pi \cdot P_H \cdot m}{l \cdot S_D} \cdot \sqrt{\frac{Z_{cm}}{P_c}}. \quad (7.19)$$

5. Визначають обсяг магніту, (м<sup>3</sup>):

$$V_M = \frac{\pi \cdot 4 \cdot d_{KP} \cdot h_3 \cdot l_3 \cdot B_e^2}{B_r \cdot H_{CB} \cdot \eta_M \cdot \mu_0}. \quad (7.20)$$

де  $B_r$  – залишкова індукція, мТл;

$H_{CB}$  – коерцитивна сила, кА/м;

$\eta_M$  – коефіцієнт використання магніту, що дорівнює 0,4...0,6;

$\mu_0$  – магнітна проникність, Гн/м;

6. Визначають магнітну провідність робочого зазору, Вб/А:

$$G_e = \frac{\pi \cdot d_{KP} \cdot h_3}{l_3} \cdot \mu_0. \quad (7.21)$$

7. Визначають довжину магніту, м:

$$l_M = \sqrt{\frac{V_M \cdot B_d \cdot \eta_M}{G_e \cdot (H_{CB} / 2) \cdot 10^9}}. \quad (7.22)$$

8. Знаходять площу перерізу магніту, м<sup>2</sup>:

$$S_M = \frac{V_M}{l_M}. \quad (7.23)$$

9. Внутрішній діаметр магніту визначається за формулою, м:

$$d_2 = d_{KP} \cdot \exp\left(\frac{2 \cdot l_3 \cdot l_M}{k_s \cdot d_{KP} \cdot h_3}\right). \quad (7.24)$$

де  $k_s$  – коефіцієнт, що змінюється від 0,1 до 0,4.

10. Визначають зовнішній діаметр кільцевого магніту, м:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot S_M}{\pi} + d_2^2}. \quad (7.25)$$

### Приклади розв'язання задач

7.1. Провести розрахунок параметрів електродинамічної головки гучномовця, звукової котушки, конструктивних параметрів дифузора і магнітного ланцюга. Вихідні дані для розрахунку є такими:

- номінальна потужність  $P_e = 10$  Вт;
- повний опір гучномовця  $Z_{em} = 6$  Ом;
- діапазон частот  $f_n = 900$   $f_v = 5\,000$  Гц;
- нерівномірність частотної характеристики  $N = 12$  дБ;
- середній номінальний звуковий тиск  $P_n = 0,3$  Па;
- коефіцієнт нелінійних спотворень на нижній граничній частоті  $K_f = 25$  %;
- умови експлуатації  $t = 0..35$  °С.

#### Розв'язок

Для розрахунку параметрів головки гучномовця скористаємося можливостями РТС MathCad. На рис. 7.7–7.12 наведені скріншоти трьох частин розрахунку.

### Розрахунок головки гучномовця

$$\begin{aligned}P_e &:= 10 \text{ Вт} \\Z_{em} &:= 6 \text{ Ом} \\f_n &:= 90 \text{ Гц} \quad f_{y \dots} := 5000 \text{ Гц} \\N_{\dots} &:= 12 \text{ дБ} \\P_n &:= 0.3 \text{ Па} \\k_f &:= 25 \text{ \%}\end{aligned}$$

### Розрахунок звукової котушки

1. Амплітуда коливання рухомої системи

$$X := 1.75 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

2. Величина вільного повітряного зазору

$$l_z' := 0.14 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

3. Питома теплове навантаження

$$P_t := 2.1 \cdot 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

4. Площа бічної поверхні

$$S_b := \frac{P_e}{P_t} \quad S_b = 4.762 \times 10^{-3} \text{ м}^2$$

5. Діаметр звукової котушки

$$k_k := 4$$

$$d_k := \sqrt{S_b \cdot \frac{k_k}{\pi}} \quad d_k = 0.078 \text{ м}$$

6. Діаметр ядра магнітної ланцюга

$$d_{kr} := d_k - 2 \cdot l_z' \quad d_{kr} = 0.075 \text{ м}$$

7. Висота котушки

$$h_k := \frac{d_k}{k_k} \quad h_k = 0.019 \text{ м}$$

8. Діаметр дроту

$$d := \sqrt[3]{1.75 \cdot d_k^2 \cdot \frac{10^{-7}}{Z_{em} \cdot k_k}} \quad d = 3.536 \times 10^{-4} \text{ м}$$

найближчий провід за діаметром 0,35 мм

$$S_{pr} := 0.0099 \text{ площа перетину мідної жили мм}^2$$

9. Щільність струму

$$J := \left( \frac{1}{S_{pr}} \right) \cdot \sqrt{\frac{P_e}{Z_{em}}} \quad J = 130.403 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2} \quad 13.07 \cdot 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}$$

За графіком допустимої щільності струму при температурі 40° знаходимо значення щільності =  $50 \cdot 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}$

Рисунок 7.7 – Знімок екрана з розрахунком звукової котушки

10. Число витків котушки

$$c := 2 \quad kz := 0.9$$

$$w := 2 \cdot kz \cdot \frac{hk}{d} \quad w = 99.095$$

+

11. Визначаємо довжину проводу

$$l := \pi \cdot dk \cdot w \quad l = 24.241 \quad \text{м}$$

12. Товщина звукової котушки

$$\delta := 1.0 \cdot 10^{-3} \quad \text{м}$$

$$\Delta k := 2 \cdot d + \delta \quad \Delta k = 1.707 \times 10^{-3} \quad \text{м}$$

13. Маса звукової котушки

$$\gamma_1 := 8.9 \cdot 10^3 \quad \text{щільність матеріалу проводу котушки (мідь)} \quad \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$mk := l \cdot \text{Spr} \cdot 10^{-6} \cdot \gamma_1 \quad mk = 2.136 \times 10^{-3} \quad \text{кг}$$

Рисунок 7.8 – Продовження розрахунку звукової котушки

### Розрахунок конструктивних параметрів дифузорів

1. Матеріал для дифузора

$$E := 30 \cdot 10^7 \quad \text{Па}$$

$$\gamma := 0.6 \cdot 10^3 \quad \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

2. Номінальна звуковий тиск

$$pn' := Pn \cdot 10^{-0.05 \cdot N} \quad pn' = 0.075 \quad \text{Па}$$

3. Площа поверхні, що випромінює

$$Sd := 0.128 \cdot \frac{pn'}{X \cdot fn^2} \quad Sd = 6.805 \times 10^{-4} \quad \text{м}^2$$

4. Діаметр поверхні, що випромінює

$$Dd := \sqrt{4 \cdot \frac{Sd}{\pi}}$$

$$Dd = 0.029 \quad \text{м}$$

5. Кут розчину конуса

$$\alpha := 140 \quad ^\circ$$

Рисунок 7.9 – Знімок екрана з розрахунком конструктивних параметрів дифузора

6. Статична маса дифузора

$$\Delta d := 0.4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$m_d := S_d \cdot \Delta d \cdot \frac{\gamma}{\sin\left[\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \frac{\pi}{180}\right]} \quad m_d = 1.738 \times 10^{-4} \text{ кг}$$

7. Маса, що сокопивається

$$m_e := 0.435 \cdot D d^3 \quad m_e = 1.109 \times 10^{-5} \text{ кг}$$

8. Маса рухомої системи

$$m := m_k + m_d + m_e \quad m = 2.321 \times 10^{-3} \text{ кг}$$

Рисунок 7.10 – Продовження розрахунку конструктивних параметрів дифузора

### Розрахунок магнітного ланцюга

1. Розмір зазору магнітного ланцюга

$$L_z := \Delta k + 2 \cdot l_z' \quad L_z = 4.507 \times 10^{-3} \text{ м}$$

2. Висота робочого зазору

$$h_z := 0.85 \cdot h_k \quad h_z = 0.017 \text{ м}$$

3. Величина індукції в робочому зазорі

$$B_e := 2 \cdot \pi \cdot P_n \cdot \frac{m \cdot \sqrt{\frac{Z_{em}}{P_e}}}{l \cdot S_d} \quad B_e = 0.205 \quad \frac{\text{Вб}}{\text{м}}$$

4. Обсяг магніту

$$V_d := \frac{1130}{2} \quad \eta_m := 0.6 \quad \mu_0 := 1.2 \cdot 10^{-6}$$

$$H_d := \frac{836}{2}$$

$$V_m := \pi \cdot d_{kr} \cdot h_z \cdot L_z \cdot \frac{(B_e)^2}{B_d \cdot H_d \cdot \eta_m \cdot \mu_0}$$

$$V_m = 4.365 \times 10^{-6} \text{ м}^3$$

Рисунок 7.11 – Знімок екрана з розрахунком магнітного ланцюга

5. Магнітна провідність робочого зазору

$$G_e := \pi \cdot d_{kr} \cdot h_z \cdot \frac{\mu_0}{L_z} \quad G_e = 1.039 \times 10^{-6} \quad \text{Вб / А}$$

6. Довжина магніту

$$l_m := \sqrt{V_m \cdot B_d \cdot \frac{\eta_m}{G_e \cdot H_d \cdot 10^9}} \quad l_m = 5.837 \times 10^{-5} \quad \text{м}$$

7. Площа перетину магніту

$$S_m := \frac{V_m}{l_m} \quad S_m = 0.075 \quad \text{м}^2$$

8. Внутрішній діаметр магніту

$$k_3 := 0.2$$

$$d_2 := d_{kr} \cdot \left[ e^{\left( 2 \cdot \frac{L_z \cdot l_m}{k_3 \cdot h_z \cdot d_{kr}} \right)} \right] \quad d_2 = 0.075 \quad \text{м}$$

8. Внутрішній діаметр магніту

$$k_3 := 0.2$$

$$d_2 := d_{kr} \cdot \left[ e^{\left( 2 \cdot \frac{L_z \cdot l_m}{k_3 \cdot h_z \cdot d_{kr}} \right)} \right] \quad d_2 = 0.075 \quad \text{м}$$

9. Зовнішній діаметр кільцевого магніту

$$d_1 := \sqrt{\left( 4 \cdot \frac{S_m \cdot 10^{-3}}{\pi} \right) + (d_2)^2} \quad d_1 = 0.076 \quad \text{м}$$

Рисунок 7.12 – Продовження розрахунку магнітного ланцюга

### Задачі для самостійного розв'язання

7.2. Провести розрахунок параметрів електродинамічної головки гучномовця, звукової котушки, конструктивних параметрів дифузора і магнітного ланцюга. Вихідні дані для розрахунку наведені в таблиці 7.3.

Таблиця 7.3

Номер варіанта	Номін. потужність $P_e$ , Вт	Повний опір ГГ $Z_{em}$ , Ом	Ном. діапазон частот, Гц	Нерівн. характ. $N$ , дБ	Середній ном. звук. тиск $P_w$ , Па	Коеф. нелін. спотворень на ниж. гран. частоті $K_f$ , %	Умови експлуатації. $t$ , С
1	10	5	100..5000	5	0,3	30	0..25
2	12	5	150..3000	10	0,25	20	-5..35
3	15	6,5	135..5000	12	0,2	25	0..30
4	20	7	500..12000	15	0,35	15	-7..25
5	12	8	250..6000	10	0,15	35	0..25
6	17	8	500...8000	7	0,2	40	-5..35
7	16	7	100..5000	8	0,25	15	0..30
8	15	5	50..5000	9	0,34	25	-7..25
9	13	6,5	35..3000	12	0,27	20	0..25
10	25	5,5	500..12000	11	0,28	34	-5..35
11	20	7,5	250..6000	10	0,29	15	0..30
12	22	6	500...8000	8	0,32	17	-7..25
13	9	5	100..5000	7	0,3	42	0..25
14	12	7	350..8000	9	0,18	40	-5..35
15	10	5,5	750..10000	10	0,19	32	0..30
16	11	7	250..12000	12	0,2	28	-7..25
17	15	8	250..6000	15	0,27	27	0..25
18	14	9	500...8000	7	0,24	29	-5..35
19	18	5	75..2500	5	0,23	31	0..30
20	20	6	3000...15000	9	0,22	35	-7..25

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Тексти лекцій з дисципліни «Теоретичні основи акустики» для студентів усіх форм навчання за спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія» / упоряд. В. В. Усик. – Харків: НТУ «ХПІ», 2021. – 142 с.
2. Сапожков М. А. Электроакустика: учебник для вузов / М.А.Сапожков. – М., «Связь», 1978. – 272 с.
3. Сапожков М. А. Звукофикация открытых пространств / М.А.Сапожков. – М., Радио и связь, 1985. – 304 с.
4. Электроакустика и звуковое вещание: учебное пособие для вузов / И. А. Алдошина, Э. И. Вологдин, А. П. Ефимов и др.; под ред. Ю.А.Ковалгина. – М : Горячая линия-Телеком, Радио и связь, 2007. – 872 с.
5. Дідковський В. С. Акустична техніка. Т.4. Основи архітектурної та фізіологічної акустики: навч. посіб. / В. С. Дідковський, С.А.Луньова. – Київ, 2001.– 424 с.
6. Кнудсен Верн Оливер Архитектурная акустика: пер. с англ. /под ред. Е. А. Копиловича, Л. Д. Брызжева. – Изд. 4-е. – М. : Издательство ЛКИ, 2007. – 520 с.

Навчальне видання

**Методичні вказівки**

до виконання практичних занять з дисципліни

**«Теоретичні основи акустики»**

для студентів усіх форм навчання за спеціальністю

123 «Комп'ютерна інженерія»

Укладачі: ПОРОШИН Сергій Михайлович

УСИК Вікторія Валеріївна

Відповідальний за випуск проф. Порошин С. М.

Роботу рекомендував до друку проф. Заполовський М. Й.

Редактор Н. В. Верстюк

План 2021 р., поз. 94

Підписано до друку 25.06.2021 р. Формат 60 × 84 1/16. Папір офсетний.

RISO-друк. Гарнітура Тайм

Ум.друк.арк. 2.9

Наклад 50 прим. Зам. № 19. Ціна договірна

---

Видавець Видавничий центр НТУ «ХП».

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017 р.

61002, Харків, вул. Кирпичова, 2

---

Видавництво та друк ФО-П Єфименко С.А.

61166, Україна, м. Харків, вул. Коломенська, 27

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців - виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції

ДК № 6869 від 08.08.2019 р.