

1. БІОАКУСТИКА

Велику частину інформації про навколишнє середовище людина отримує за допомогою слухового аналізатору. Джерелом цієї інформації служать різноманітні звуки, в тому числі ті, що складають людське мовлення. Вони мають певні характеристики, які зумовлюють параметри слухового відчуття.

Звук представляє собою поздовжню механічну хвилю, яка розповсюджується в середовищі завдяки коливальним рухам частинок, що містяться у ньому. Для характеристики звуків застосовують всі параметри коливального руху, а також параметри, які описують хвилю у цілому.

Ультразвук відрізняється від чутного звука частотою, деякими особливостями розповсюдження і взаємодії з речовиною. Ультразвук широко застосовується в медицині для діагностики, терапії і хірургії.

Механічні коливання, їх види та основні параметри

Механічні коливання - це рухи тіла, які більш-менш точно повторюються в часі. Прикладами систем, які здійснюють коливання, можуть служити маятники, струни музичних інструментів, автомобільні амортизатори і т.д. У живому організмі механічні коливання здійснюють стінки артерій і вен (артеріальний і венозний пульс), голосові зв'язки під час розмови. Коливальними є рухи легенів і серця.

Всі коливання можна охарактеризувати за допомогою ряду параметрів таких, як період, частота, зміщення, амплітуда.

Період коливань T [секунда, s] - тривалість одного повного коливання. Коливання називаються періодичними, якщо їх період не змінюється з часом, і неперіодичними – в інших випадках.

Лінійна частота коливань ν [Герц] - число коливань в одиницю часу.

Зміщення X [метр] - відстань, на яку відхиляється коливальна система від положення рівноваги.

Амплітуда коливань A [метр] - максимальна величина зміщення.

Форма коливань може бути різною. Особливий інтерес представляють *гармонічні коливання*. Їх відмінна риса полягає в тому, що вони протікають в часі за законом синуса або косинуса. Графік гармонічних коливань представлений на рис. 1.1.

Гармонічні коливання може здійснювати пружинний маятник, який

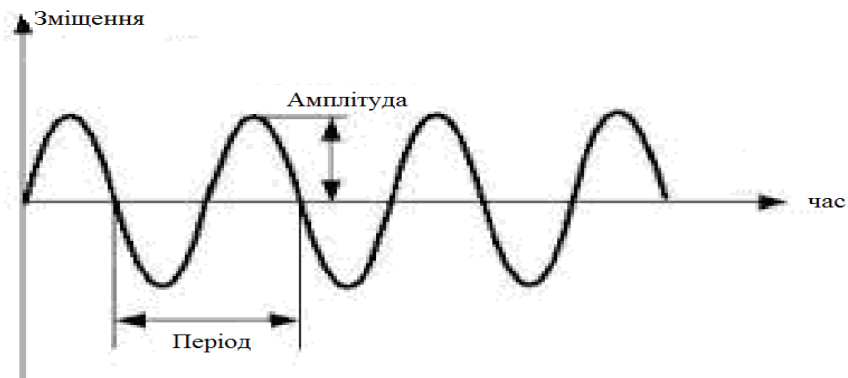


Рис. 1.1 Графік гармонічних коливань

представляє собою вантаж масою m , підвішений на пружині. Якщо записати зміщення маятника в ході його коливань за допомогою будь-якого пристрою, отримаємо синусоїду.

Вільні коливання відбуваються при одноразовому зовнішньому впливі, що виводить коливальну систему із положення рівноваги. У подальшому вони здійснюються за рахунок внутрішніх сил. Вільні коливання тривали б нескінченно довго, тобто вони були б *незатухаючими*, в умовах відсутності сили тертя. В цьому випадку вони би описувались рівняннями:

$$x = A \sin(\omega_0 \cdot t + \varphi_0)$$

$$x = A \cos(\omega_0 \cdot t + \varphi_0)$$

В цих рівняннях x - величина зміщення тіла; A - амплітуда коливань; t - час, ω_0 - циклічна (колова) частота коливань, яка пов'язана з лінійною частотою: $\omega = 2\pi \nu$; φ_0 - початкова фаза.

В рівнянні циклічна частота ω_0 є власною частотою коливальної системи і залежить тільки від її властивостей. Для пружинного маятника:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Вираз в дужках $(\omega_0 t + \varphi_0)$ - фаза коливань, яка визначає стан коливальної системи в будь-який момент часу.

В реальних умовах енергія коливального руху поступово витрачається на подолання тертя, внаслідок чого амплітуда коливань зменшується (рис. 1.2), тобто вільні коливання є *затухаючими*.

Швидкість затухання коливань залежить від властивостей середовища

и коливальної системи. Це відображає коефіцієнт затухання β .

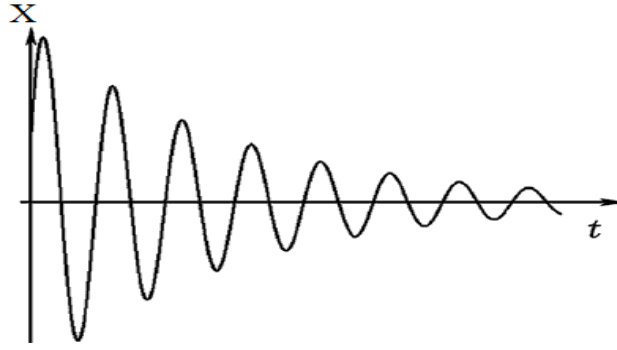


Рис. 1.2 Графік затухаючих гармонічних коливань

Рівняння гармонічних затухаючих коливань має вигляд:

$$X = A_0 \cdot e^{-\beta \cdot t} \sin(\omega \cdot t + \varphi_0)$$

В представленому рівнянні A_0 — початкова амплітуда коливань, яка зменшується в часі по експоненті:

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\beta \cdot t}$$

Частота затухаючих коливань дорівнює:

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$$

Для отримання реальних незатухаючих коливань необхідний вплив зовнішньої сили, робота якої би відновлювала енергію коливальної системи. Коливання, які відбуваються під дією зовнішньої періодичної сили, називаються *вимушеними коливаннями*. Вони здійснюються, наприклад, в органі слуху людини під дією звуків. Вимушені коливання можуть бути гармонічними у випадку впливу на коливальну систему з певною частотою зовнішньої сили постійної амплітуди.

При вимушених коливаннях може спостерігатись явище *резонансу*. Воно виникає, якщо частота зовнішньої періодичної сили близька до власної частоти коливальної системи. Амплітуда коливань досягає при цьому максимальної величини.

Існують коливальні системи, які самі регулюють приплив енергії і можуть коливатися тривалий час. Незгасаючі коливання, що існують при відсутності змінного зовнішнього впливу за рахунок внутрішнього джерела енергії називаються *автоколиваннями*, а системи, що їх здійснюють —

автоколивальними. Амплітуда і частота автоколивань залежать від властивостей самої системи.

Класичним прикладом механічної автоколивальної системи є маятниковий годинник, в якому маятник є тілом, що коливається, пружина або піднята гиря - джерелом енергії, а анкер - регулятором її надходження від джерела до тіла.

Механічні хвилі, їх види

Процес поширення коливань у пружному середовищі називається *механічною хвилею*. Вона виникає внаслідок взаємодії кожної частинки середовища з сусідніми частинками пружними зв'язками. Коливання однієї частинки залучає в коливальний рух сусідні, і він поширюється з певною швидкістю в навколишньому середовищі.

Частинки середовища, які беруть участь в поширенні хвилі, не рухаються разом з нею, а коливаються біля своїх положень рівноваги. Хвиля - це поширення стану коливного руху і його енергії. Тому основною властивістю хвиль є перенесення енергії без перенесення речовини.

Розрізняють два види механічних хвиль: *поперечні і поздовжні* (рис. 1.3). Ці визначення відносять до напрямку, в якому коливаються частинки середовища при розповсюдженні хвилі.

Хвиля називається *поперечною*, якщо коливання частинок середовища відбуваються в напрямку, перпендикулярному напрямку поширення хвилі. Поперечні хвилі можуть виникати тільки в твердих тілах і на вільній поверхні рідини.

Хвиля називається *поздовжньою*, якщо коливання частинок середовища відбуваються в напрямку поширення хвилі. Такі хвилі можуть виникати в твердих, рідких і газоподібних середовищах.

Відстань між найближчими частинками середовища, які коливаються в однаковій фазі, називається *довжиною хвилі*. Довжина хвилі λ дорівнює відстані, на яку поширюються коливання зі швидкістю v в середовищі за один період T :

$$\lambda = v \cdot T$$

Енергетичною характеристикою хвилі служить її *інтенсивність* - енергія, яка переноситься хвилею за одиницю часу через одиницю поверхні, розташованої перпендикулярно напрямку хвилі:

$$I = \frac{E}{t \cdot S}$$

Вимірюється інтенсивність хвилі в Вт/м².



Рис. 1.3 Поперечна (а) і поздовжня (б) хвилі

Ефект Допплера

Ефектом Допплера називається уявна зміна частоти хвиль внаслідок відносного руху їх джерела і приймача. У випадку наближення пристроїв - частота хвилі підвищується, оскільки приймач зустрічає за один і той же інтервал часу більше хвиль, ніж при відсутності руху. Коли джерело хвиль віддаляється від приймача, частота хвиль знижується. Ілюстрація ефекту Допплера приведена на рис. 1.4. Сирена є джерелом звуку, який представляє собою поздовжню механічну хвилю. Коли пожежна машина стоїть на місці (а), обидва спостерігача на тротуарі чують звук її сирени однакової частоти. Коли машина рухається (б), то спостерігач, до якого вона наближається, сприймає звукові хвилі більшої частоти, а той, від якого вона віддаляється – меншої частоти.

Ефект Допплера дозволяє виміряти швидкість руху об'єктів. У медицині на основі ефекту визначають швидкість течії крові в судинах і серці.

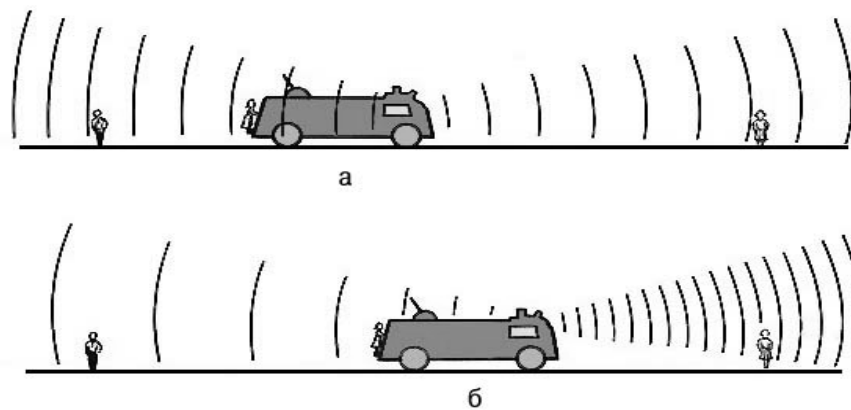


Рис. 1.4. Ілюстрація ефекту Доплера

Фізична природа звуку

Звук є поздовжньою механічною хвилею. Вона утворюється тілами, що коливаються, наприклад, камертоном, струною музичного інструменту, голосовими зв'язками і т.д. На рис. 1.5 показано створення звуку поршнем, який коливається в циліндрі з певною частотою.

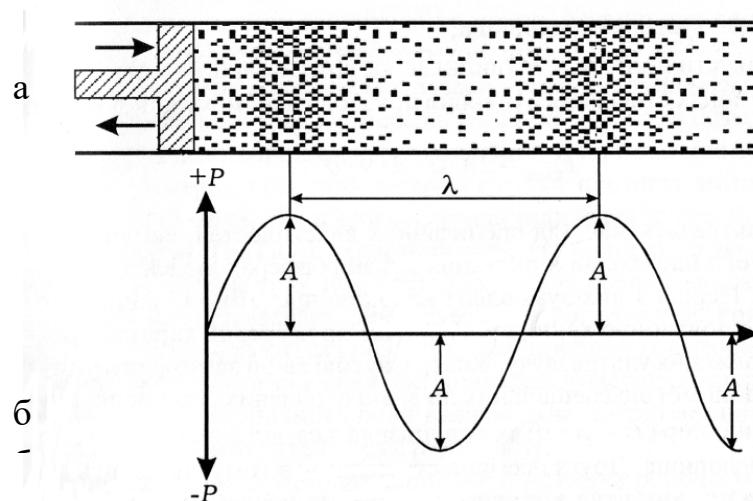


Рис. 1.5 Створення поздовжньої механічної хвилі поршнем, що коливається: а). формування зон стиснення і розрідження частинок середовища (відповідно зон підвищеного і зниженого тиску); б). зміна тиску (P) в середовищі по мірі віддалення від поршня

При переміщеннях поршня виникають зони стиснення і розрідження частинок середовища. Поширення цих зон є позовжньою хвилею. При цьому кожна частинка середовища коливається біля свого положення рівноваги, передаючи наступним енергію звукової хвилі. Частина цієї енергії витрачається на подолання внутрішнього тертя середовищ і розсіюється. Тому з відстанню звукова хвиля згасає. Швидкість звуку залежить від фізичних особливостей середовища. У твердих речовинах і рідинах звук поширюється швидше, ніж в газах. Швидкість звуку в повітрі близько 335 м/с, а у воді – 1430 м/с. Середня швидкість звуку в тканинах тіла людини становить 1570 м/с.

Класифікація звуків

Розрізняють такі види звуків:

1. *Простий тон* - звук, утворений гармонічними коливаннями однієї певної частоти. Його джерелом може бути камертон.

2. *Складний тон* - звук, утворений періодичними, але негармонічними коливаннями (рис. 1.6). Він представляє собою результат накладення один на одного декількох простих тонів. Той з них, що має саму низьку частоту, називається основним тоном. Тони з більш високою частотою, кратною частоті основного тону, називаються обертонами. Складними тонами є звуки музичних інструментів, голосні звуки української мови.

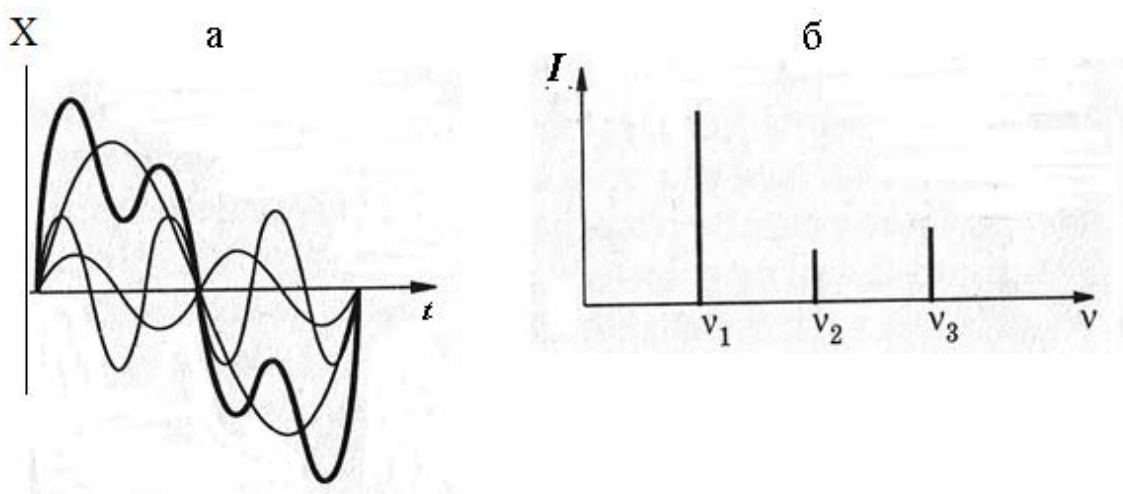


Рис. 1.6 Складний тон: а). графік коливань частинок середовища: жирна лінія відповідає складному тону, три інші – прості тони, що його складають; б). акустичний спектр складного тону

За допомогою спеціальних приладів можна провести спектральний аналіз складного тону - виділити складові його прості тони. Так отримують *акустичний спектр* - діаграму, яка відображає частоти основного тону і обертонів і відповідні їм інтенсивності (рис. 1.6).

3. *Шум* - це звук, в якому частота та інтенсивність коливань змінюються в кожен момент часу незакономірно. Звукові хвилі, які створюють шум, не мають певного періоду і частоти. Тому акустичний спектр шуму – суцільний (рис. 1.7). Прикладами шумів є приголосні звуки.

Область чутності людини

Звуки є джерелом слухових відчуттів людей. Проте людина може чути лише звуки, характеристики яких знаходяться в межах *області чутності* (рис. 1.8). Така область визначається границями, які створюються певними значеннями інтенсивності і частоти звуків.

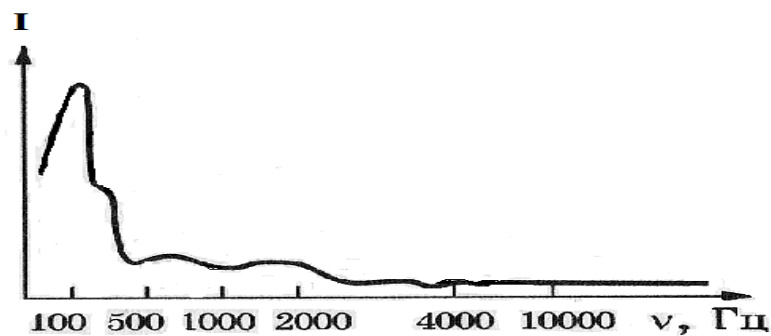


Рис. 1.7 Суцільний акустичний спектр шуму

Мінімальна інтенсивність звуку, яка може викликати слухові відчуття, називається *порогом чутності*. Його середня величина дорівнює 10^{-12} Вт/м². Така інтенсивність відповідає звуковому тиску $2 \cdot 10^{-5}$ Па. При підвищенні інтенсивності звуку вище порога чутності слухове відчуття посилюється.

При досягненні звуком певної інтенсивності виникає біль у вухах, і може наступити зворотна втрата слуху. Мінімальна інтенсивність звуку, яка викликає у людини біль у вухах, називається *порогом больового відчуття*. В середньому його величина становить 10 Вт/м², що відповідає звуковому тиску 63 Па. Больовий поріг є верхньою границею області чутності за інтенсивністю.

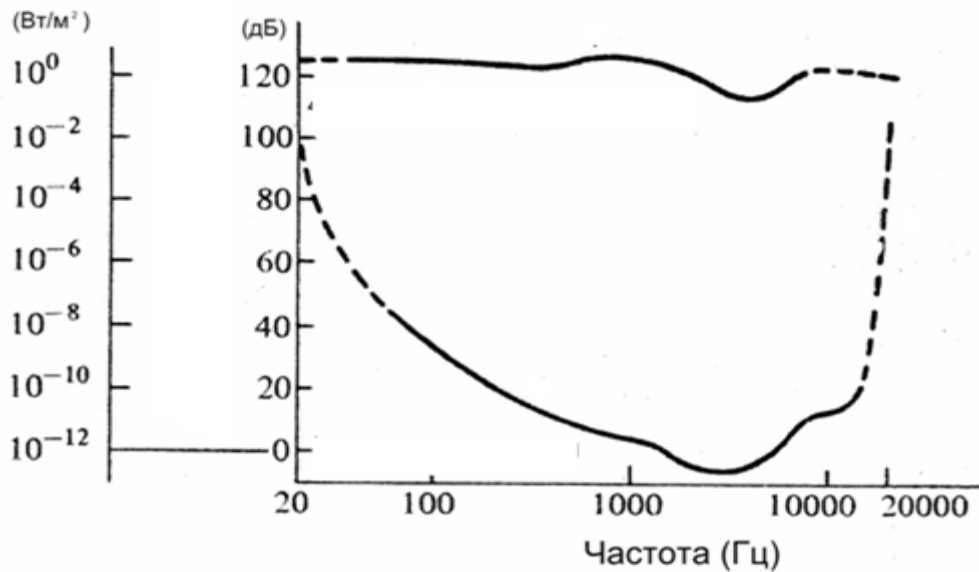


Рис. 1.8 Область чутності

Область чутності людини обмежена також частотою звуків. Хвилі частотою менше 16 Гц називаються *інфразвуком*, а хвилі частотою вище 20 000 Гц - *ультразвуком*. Слухові відчуття у людини викликають звуки, частота яких знаходиться в межах від 16 до 20 000 Гц.

Для оцінки дії енергії звукових хвиль на орган слуху людини користуються їх *рівнем інтенсивності*. Його визначають за допомогою логарифмічної шкали. Теоретичним обґрунтуванням такого підходу є психофізичний *закон Вебера-Фехнера*, обґрунтований експериментально в 19 столітті. Згідно з цим законом, при збільшенні інтенсивності подразника, що діє на сенсорні системи людини, посилення відповідного відчуття відбувається пропорційно логарифму інтенсивності. Слухове відчуття людини характеризують рівнем інтенсивності звуку L :

$$L = \lg \frac{I}{I_0}$$

I – інтенсивність звуку, який чує людина, Вт/м², I_0 – середній поріг чутності (10⁻¹² Вт/м²).

Рівень інтенсивності звуку L вимірюється в одиницях логарифмічної шкали - белах (Б). Збільшення рівня інтенсивності звуку на один бел означає, що його інтенсивність зросла в десять раз. На практиці застосовують децибели (дБ): $10\text{дБ} = 1\text{Б}$.

Згідно з наведеною вище формулою, рівень інтенсивності порога чутності дорівнює 0 дБ, а больового порогу, який на тринадцять порядків вищий, ніж поріг чутності - 130 дБ. Можна навести приклади рівнів інтенсивності деяких звуків: шепітної мови - близько 20 дБ, звичайної розмови - 40 дБ, шуму вулиці зі жвавим рухом - 70 - 80 дБ, звуків великого оркестру - 90 дБ, шуму реактивного двигуна - 120 дБ.

Суб'єктивні характеристики звуку

Звук має *об'єктивні характеристики*, які можуть бути визначені за допомогою вимірювальних приладів. До таких характеристик відносять: інтенсивність, частоту звукових хвиль і їх акустичний спектр.

Людина може описати різні звуки «на слух», за допомогою характеристик, які є *суб'єктивними*. Ними є гучність, висота і тембр. Суб'єктивний опис звуків ґрунтується на реальних їх об'єктивних характеристиках.

Гучність звуку, в основному, визначається рівнем інтенсивності звукової хвилі: чим він більший, тим гучнішим сприймається звук. Однак важливу роль відіграє також частота звукових коливань. Орган слуху людини найбільш чутливий до звукових хвиль частотою від 1000 до 4000 Гц, і тому суб'єктивно вони здаються більш гучними, ніж звукові хвилі такої самої інтенсивності, але іншої частоти. Враховуючи це, застосовують спеціальну шкалу гучності звуку, одиницею виміру якої є *фон*. Гучність звуку в фонах дорівнює:

$$E = k \cdot \lg \frac{I}{I_0},$$

де k - коефіцієнт пропорційності, умовно прийнятий за одиницю для звуку частотою 1000 Гц.

На рис. 1.9 представлені *криві рівної гучності*, які демонструють, що для звуків різних частот вона забезпечується різними рівнями інтенсивності.

Висота звуку для простих тонів визначається їх частотою. Чим вона більше, тим вищим здається звук. Для складних тонів вона залежить, головним чином, від частоти основного тону.

Тембр звуку - це суб'єктивна характеристика, яка представляє собою специфічне забарвлення звуку. Людина відрізняє звуки різних музичних інструментів і голоси різних співаків, навіть якщо вони беруть одну і ту ж ноту, завдяки характерному для звуків тембру. Він залежить, в основному,

від акустичного спектру звуку: від кількості обертонів і рівня їх інтенсивності.

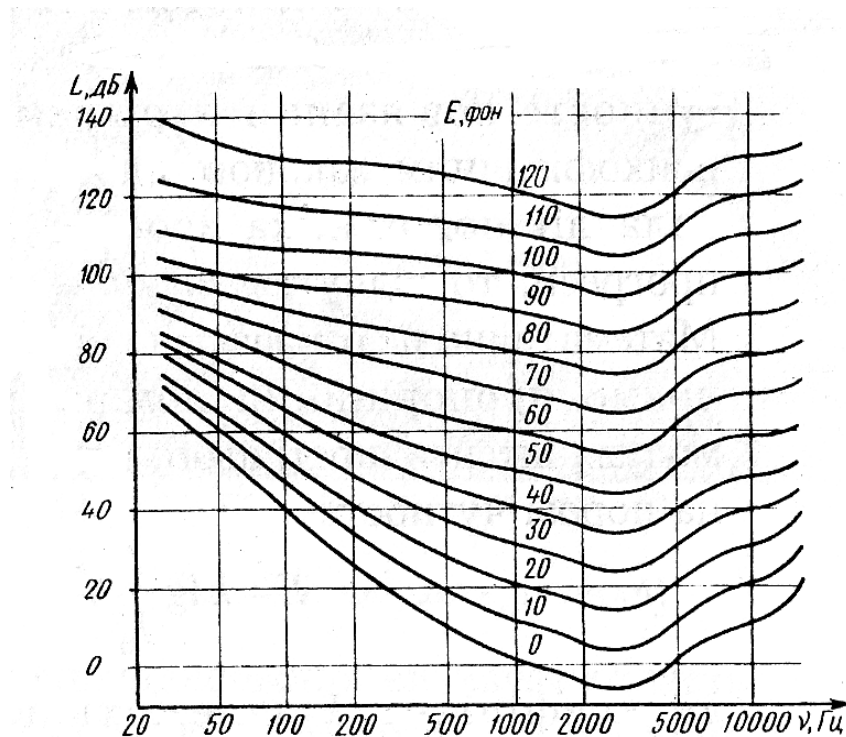


Рис. 1.9 Криві рівної гучності

По горизонталі – частота звуків, Гц ; по вертикалі – рівень інтенсивності, децибели (зліва); гучність, *фони* (в центрі). Кожна крива відповідає певній гучності звуків в фонах

Аудіометрія

Діагностику порушень слуху людини проводять за допомогою *аудіометрії* – методу дослідження гостроти слуху шляхом пред'явлення стандартних за частотою та інтенсивністю звуків.

Для проведення аудіометрії застосовують спеціальний прилад - *аудіометр*, який представляє собою генератор електричних гармонічних коливань, що перетворюються динаміком в механічні звукові хвилі. Вони є простими тонами, частоту яких можна змінювати при обстеженні в частотних межах області чутності. Аудіометр дозволяє регулювати рівень інтенсивності звуку, який подається через навушники до пацієнта. Задають певну частоту звуку і плавно підвищують його інтенсивність, починаючи з мінімальної. Пацієнт повідомляє лікаря, як тільки почує звук. Його інтенсивність, при якому це відбувається, є порогом чутності для звуку даної частоти. Аналогічні дії виконуються для звуків інших частот. На підставі

отриманих даних будують *аудіограму* - криву, яка відображає порогови чутності звуків різних частот. Аналіз аудіограми необхідний для діагностики гостроти слуху і його порушень.

Контрольні питання:

1. Що таке механічні коливання? Якими вони бувають за формою?
2. Охарактеризуйте звук за фізичною природою.
3. Назвіть основні фізичні характеристики звуку та одиниці їх вимірювання.
4. Приведіть класифікацію звуків і охарактеризуйте їх.
5. Що таке поріг чутності і больовий поріг?
6. Як область чутності людини обмежена за частотою звуків?
7. Що таке суб'єктивні характеристики звуку? Назвіть їх.
8. Приведіть закон Вебера-Фехнера.
9. Що таке гучність звуку? Від чого вона залежить?
10. Який показник вимірюють для побудови аудіограми?

Оберіть правильну відповідь:

1. Проаналізуйте, яка властивість характерна тільки для гармонічних коливань:

- | | |
|--------------------------------|----------------------------------|
| А. вони мають постійну частоту | Б. вони мають постійну амплітуду |
| В. їх графіком є синусоїда | Г. вони є періодичними |
| Д. вони є незатухаючими. | |

2. Визначте частоту коливань, якщо тіло за 10 секунд здійснило 20 повних циклів:

- А. 2 Гц Б. 10 Гц В. 20 Гц Г. 200 Гц Д. 0,5 Гц

3. Проаналізуйте, для звукових хвиль якої частоти поріг чутності має найменше значення:

- А. 16 Гц Б. 1000 Гц В. 3000 Гц Г. 10000 Гц Д. 20000 Гц

4. Визначте рівень інтенсивності звуку частотою 1000 Гц, якщо його інтенсивність була 10^{-9} Вт/м^2 :

- А. 9 дБ Б. 10 дБ В. 12 дБ Г. 30 дБ Д. 100 дБ

5. Проаналізуйте, в якій з відповідей усі три характеристики звуку є

об'єктивними:

- А. гучність, тембр, частота
- Б. інтенсивність, частота, акустичний спектр
- В. частота, гучність, акустичний спектр
- Г. інтенсивність, тембр, частота
- Д. швидкість, висота, частота

6. Проаналізуйте, в якій з відповідей усі три характеристики звуку є суб'єктивними:

- А. інтенсивність, тембр, частота
- Б. інтенсивність, частота, акустичний спектр
- В. частота, гучність, акустичний спектр
- Г. гучність, тембр, висота
- Д. швидкість, висота, частота

7. Рівень інтенсивності звуку складає 40 дБ. У скільки разів його інтенсивність перевищує порогову інтенсивність?

- А. в 10 раз
- Б. в 100 раз
- В. 1000 раз
- Г. 10000 раз

8. Визначте, на скільки змінився рівень інтенсивності звуку, якщо його інтенсивність збільшилась в 100 разів:

- А. 10 Дб
- Б. 20дБ
- В. 50 дБ
- Г. 2 дБ
- Д. 100 дБ

9. Визначте, який компонент є основним тоном складного тону:

- А. що має найменшу частоту
- Б. що має найбільшу частоту
- В. що має найбільшу висоту
- Г. що швидше розповсюджується
- Д. що має менший поріг чутності

10. Оцініть, як змінилась гострота слуху людини до звуків, якщо у неї збільшились пороги чутності:

- А. зменшилась
- Б. збільшилась
- В. не змінилась

2. УЛЬТРАЗВУК І ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ В МЕДИЦИНІ

Методи отримання ультразвуку

Ультразвук - пружні механічні хвилі частотою понад 20000 Гц. В медицині застосовують ультразвук частотою до 10 МГц. Використовують два методи отримання ультразвуку: зворотний п'єзоелектричний ефект і магнітострикційний ефект.

П'єзоелектричний ефект можна спостерігати в деяких кристалах, наприклад, у кварці. Їх називають *п'єзокристаллами*. Їх решітка утворена позитивними і негативними іонами. При вчиненні тиску на кристал виникає *прямий п'єзоелектричний ефект*. Він полягає в тому, що позитивні і негативні іони зміщуються в протилежні сторони, і між гранями кристала виникає електричне поле.

Зворотний п'єзоелектричний ефект проявляється, коли на п'єзокристал діє електричне поле. Воно зміщує позитивні і негативні іони кристалічної решітки в різні боки. В результаті цього кристал деформується. У випадку дії на нього змінного електричного поля ультрависокої частоти, кристал вібрує і стає джерелом ультразвуку.

Магнітострикційний ефект виникає під дією змінного магнітного поля, яке викликає зміщення атомів в деяких металах, наприклад, у залізі. При розміщенні металевого стержня в магнітному полі, параметри якого коливаються з ультрависокою частотою, він також коливається і породжує ультразвук.

Особливості поширення ультразвуку

Завдяки високій частоті ультразвук має особливості поширення в порівнянні з чутним звуком. Вони важливі для його практичного застосування.

Ультразвук мало розсіюється і здатний поширюватися вузькими спрямованими пучками - «ультразвуковими променями». Ця особливість обумовлена тим, що дифракція ультразвуку (огинання хвилями перешкод) є дуже незначною у зв'язку з його малою довжиною хвилі.

Ультразвук може досягати великої інтенсивності, оскільки вона зростає пропорційно квадрату частоти хвиль. Інтенсивність ультразвуку можна збільшувати, фокусуючи його за допомогою спеціальних акустичних лінз.

На границі двох середовищ частина енергії ультразвуку відбивається, а