

Міністерство освіти і науки України
Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка
Навчально-науковий інститут культури і мистецтв

Корякін О.О.

**ОСНОВИ МУЗИЧНОЇ АКУСТИКИ:
КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

*для здобувачів вищої освіти спеціальності
025 Музичне мистецтво*

Суми – 2021

УДК 534.68

К70

*Рекомендовано до друку рішенням Вченої ради Сумського державного педагогічного університету імені А. С. Макаренка
(протокол № 3 від 22 жовтня 2021 року)*

Розробник:

О.О. Корякін, старший викладач кафедри хорового диригування, вокалу та методики музичного навчання, кандидат педагогічних наук

Рецензенти:

С. С. Горбенко – доктор педагогічних наук, професор кафедри теорії та методики музичної освіти, хорового співу та диригування факультету мистецтв імені Анатолія Авдієвського Національного педагогічного університету імені М.П. Драгоманова, Заслужений працівник культури України

Н. І. Гречаник – доктор педагогічних наук, доцент кафедри педагогіки та психології факультету початкової освіти Глухівського національного педагогічного університету імені О. Довженка

Корякін О.О.

К70 Основи музичної акустики: *конспект лекцій* / О.О. Корякін. – Суми: ФОП Цьома С.П., 2021. – 132 с.

Методичне видання призначене для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня спеціальності 025 Музичне мистецтво.

УДК 534.68

© Корякін О.О., 2021

© ФОП Цьома С.П., 2021

ЗМІСТ

ВСТУП	4
Лекція 1 ПОНЯТТЯ АКУСТИКИ	5
Лекція 2 ПОНЯТТЯ АКУСТИКИ	14
Лекція 3 ПОНЯТТЯ ЗВУКУ	36
Лекція 4 ГУЧНІСТЬ ТА ДИНАМІКА ЗВУКУ	44
Лекція 5 ТЕОРІЯ ЗВУКОВИСОТНОСТІ ТА ТЕМБР	50
Лекція 6 АКУСТИКА ПРИМІЩЕНЬ.....	56
Лекція 7 РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЗВУКОВИХ ХВИЛЬ У ЗАКРИТИХ ПРИМІЩЕННЯХ	63
Лекція 8 СТЕРЕОФОНІЯ	70
Лекція 9 АКУСТИКА УДАРНИХ МУЗИЧНИХ ІНСТРУМЕНТІВ	80
Лекція 10 АКУСТИКА СТРУННИХ МУЗИЧНИХ ІНСТРУМЕНТІВ.....	91
Лекція 11 АКУСТИКА ДУХОВИХ МУЗИЧНИХ ІНСТРУМЕНТІВ.....	102
РЕКОМЕНДОВАНІ ДЖЕРЕЛА ІНФОРМАЦІЇ	117
ДОДАТКИ.....	119

ВСТУП

Зростання вимог до підготовки фахівців з музичного мистецтва, спричинені змінами в культурно-мистецькому середовищі обумовлюють додаткову актуалізацію музично-теоретичної підготовки здобувачів вищої освіти спеціальності 025 Музичне мистецтво. Оскільки ця складова забезпечує базис для подальшої професійної підготовки, її ґрунтовне опанування має вагомe значення для формування компетенцій фахівців означеної спеціальності у майбутньому.

Однією з найважливіших складових підготовки здобувачів вищої освіти спеціальності 025 Музичне мистецтво є опанування основ музичної акустики, що передбачає вивчення музичної акустики як науки, її наукового апарату та розділів, природи звуку, особливостей його генерування та розповсюдження, звуковисотності, тембру, об'єктивних властивостей звуку та його числових вимірів, а також стереофонії. Разом з тим досвід викладання вказує, що опанування основ музичної акустики викликає у деяких здобувачів вищої освіти певні складності, пов'язані, передусім, з тим, що як наука музична акустика більшою мірою споріднена з фізичними та математичними знаннями, які, традиційно, не є найбільш сильними сторонами абітурієнтів спеціальності 025 Музичне мистецтво.

Навчальна дисципліна «Основи музичної акустики» посідає вагомe місце у змісті освітньо-професійних програм підготовки за спеціальністю 025 Музичне мистецтво, однак розвиток сучасних поглядів на різні аспекти, які розглядає музична акустика, викликає необхідність перегляду змістового наповнення цієї дисципліни і, відповідно, лекційного курсу. Оскільки професійна діяльність фахівців з музичного мистецтва безпосередньо пов'язана зі звуком, розуміння його фізичних параметрів, умов створення і розповсюдження, а також акустичних явищ суттєво впливає на результативність діяльності за фахом.

Конспект лекцій укладено з урахуванням специфіки здобувачів вищої освіти спеціальності 025 Музичне мистецтво та відповідає робочій програмі навчальної дисципліни «Основи музичної акустики», яка є обов'язковим освітнім компонентом освітньо-професійної програми «Музичне мистецтво». Конспект лекцій не вичерпує усіх аспектів, які розглядаються музичною акустикою. Окремі аспекти викладені у спрощеному формулюванні з метою полегшення їх розуміння здобувачами вищої освіти.

Конспект лекцій призначений для здобувачів вищої освіти спеціальності 025 Музичне мистецтво, які вивчають навчальну дисципліну «Основи музичної акустики».

Лекція 1

ПОНЯТТЯ АКУСТИКИ

1. Акустика.
2. Становлення акустики як наукового знання.
3. Предмет і завдання акустики.

1. Акустика

Аку́стика (від грец. *ακουστικός* – чутний, такий, що сприймається на слух), у вузькому значенні слова – вчення про звук, тобто про пружні коливання та хвилі у газах, рідинах і твердих тілах, чутних людським вухом (частоти таких коливань знаходяться у діапазоні від ~ 19 Гц до 20 кГц); у широкому сенсі – галузь фізики, що досліджує властивості пружних коливань та хвиль від найнижчих частот (умовно від 0,1 Гц) до гранично високих частот $10^{12} - 10^{13}$ Гц, їхньої взаємодії з речовиною і застосування одержаних знань для вирішення широкого кола інженерних проблем.

Поняття «акустика» введене в науковий обіг у 1701 році французьким вченим Ж. Совьором.

Всі навколишні звуки можна умовно розділити за різними ознаками, наприклад:

1) за способом створення – на натуральні і штучні (природний шум, мова, музика, біосигнали, електронні звуки);

2) за інформаційною ознакою – на звуки для передачі семантичної (сміслової) і емоційної інформації (мова, спів і музика); для передачі інформації про навколишнє середовище (шум, сигнальні звуки та ін.);

3) за фізичними параметрами, таким як: частотний діапазон (інфразвук, ультразвук, гіперзвук і ін.); ступінь передбачуваності (випадкові сигнали, наприклад білий шум; детерміновані сигнали; квазівипадкові сигнали, в т. ч. музика і мова); часова структура (періодичні, неперіодичні, імпульсні та ін.) тощо.

Всіма названими видами сигналів займаються різні напрямки акустики.

Розглянемо основні розділи акустики.

1. *Фізіологічна та психологічна акустика.* У процесі сприйняття звуку людиною, можна виокремити три етапи. Перш за все, енергія звукового сигналу, що досягає голови, має бути трансформована в енергію механічних коливань елементів вуха. Потім, механічні коливання мають бути перетворені у нервові імпульси, які вже може бути передано у мозок. І нарешті, переданий у мозок сигнал, аналізується центральною нервовою

системою для оцінки одержаної інформації. Процеси, що відбуваються на перших двох етапах, визначаються фізіологічними (анатомічними) особливостями слухової системи людини і вивчаються у межах фізіологічної акустики. Особливості сприйняття і аналізу нервових імпульсів мозку є предметом досліджень у межах психологічної акустики, або психоакустики. Для людини також важливою є проблема генерації складних звуків мови та співу. Розуміння особливостей генерації таких звуків визначаються будовою мовного апарату. Тому фізіологічну акустику визначають як розділ акустики, що об'єднує дослідження особливостей сприйняття і відтворення звуків мовно-слуховим апаратом людини. Підсумки досліджень дають важливу інформацію, як для медичних працівників, у разі аналізу дефектів слуху, так і для інженерів задля створення технічних засобів та умов комфортного сприйняття звуків людиною. До розділу фізіологічної акустики належать дані про граничні рівні інтенсивності хвильових збурень та їх частотний діапазон, за яких у людини виникають слухові відчуття.

Збурення у повітрі, що визначаються як звук, можуть характеризуватися дуже широким діапазоном частот та тисків. Однак, далеко не всі вони сприймаються людським вухом.

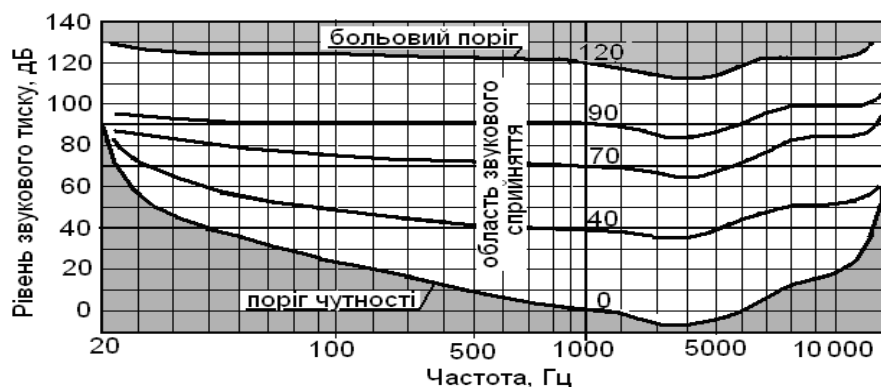


Рис. 1.1. Криві больових порогів та область звукового сприйняття

На рисунку виділено ту зону частот і тисків, у якій людське вухо сприймає звук. Слід мати на увазі, що побудова меж цієї зони, є результатом усереднення вимірювання для багатьох людей. Для кожної конкретної людини, можуть спостерігатися деякі відхилення у визначенні області сприйняття звукових подразнень.

Нижня межа області, визначає для кожної частоти значення тиску у звуковій хвилі, за якого виникає слухове відчуття. Ця крива визначає поріг чутності (англ. listening threshold). Збурення, параметри яких належать до області нижче від цієї кривої, людським вухом не чутні. Як видно найбільш чутливим для середньо статистичного вуха, є області частот, близько 3000 Гц. Що стосується частотного діапазону чутності, то таким показ-

ником для середньо- статистичного вуха, є смуга від 20 Гц до 20000 Гц (20 кГц). Звуки з нижчою частотою (інфразвук) та з вищою – (ультразвук) не сприймаються людським вухом як звук.

Верхня межа виділеної області визначає, по суті, максимально можливі амплітуди коливань механічної системи людського вуха, які вона здатна перетворювати у відповідні нервові імпульси. Вищі значення амплітуд коливань уже викликають больові відчуття і тому ця крива, визначається як больовий поріг (англ. pain threshold). Вона значно менше змінюються з частотою, ніж крива порогу чутності.

2. *Електроакустика* – розділ акустики, який пов'язано з розробкою та створенням різних електричних пристроїв, що призначені для створення, реєстрації, сприйняття та зберігання звукової інформації. Перші електроакустичні прилади було створено в останній чверті XIX століття. У 1976 році було створено електромагнітний телефон, а у 1878 році – вугільний мікрофон. У подальшому, з використанням таких фізичних явищ як електростатична та електромагнітна індукція, п'єзоефект, магнітострикція, термоелектричний ефект вдалося створити широку палітру приладів, що дозволяють перетворювати звукові коливання в електричні і навпаки, зберігаючи всі характеристики таких коливань. Створення таких пристроїв зумовлено не лише акустикою чутного частотного діапазону. Такі пристрої мають широке використання в гідроакустиці, системах неруйнівного контролю, в акустичних медичних приладах, де використовується дуже широкий діапазон частот. Важливим напрямком сучасної електроакустики, є створення акустичних мініатюрних пристроїв в мобільних телефонах, програвачах та планшетних комп'ютерах.

3. Терміном *гідроакустика* визначаються усі акустичні дослідження, пов'язані з вивченням особливостей генерування та поширення звуків у різних водоймах та практичне використання знань про ці особливості. Оскільки електромагнітні хвилі сильно затухають в солоній морській воді, акустичні хвилі є єдиним засобом дистанційного зондування у морях та океанах. Ця обставина зумовила інтенсивний розвиток такого напрямку, як акустична океанографія. З точки зору поширення звуку, океанічне середовище виявилось досить складним. Перш за все, у ньому спостерігається зміна у досить широких межах (просторових та часових) таких фізичних параметрів, як температура, тиск, солоність, насиченість газами. Значний вплив на формування звукового фону в океані можуть робити живі організми. Все це впливає на характеристики звукових полів. Тому важливою складовою гідроакустики є така наукова дисципліна, як акустика океану.

4. *Медична акустика*. Знання з різних розділів акустики, широко використовуються, як для діагностичної мети, так і задля організації терапевтичних процедур. У цьому разі, використовуються звукові сигнали у широкому діапазоні частот. Значна увага у медичній акустиці приділяється також вивченню дії на організм людини звуків та вібрацій різної інтенсивності.

5. *Архітектурна акустика*. Не зважаючи на те, що історія акустики досить багата прикладами споруд (особливо – культових споруд), відкритих театрів, які славляться чудовими умовами для сприйняття звуків людиною, формування наукової дисципліни, яка б давала обґрунтовані систематичні рекомендації для досягнення таких звукових якостей, відбулося лише на початку ХХ століття. Цей напрям в акустиці визначений як архітектурна акустика.

6. *Екологічна акустика*. Поява цього напрямку у сучасній акустиці, є прикладом змін у цій науці, що відповідають змінам умов існування людства. Сам по собі великий інтерес до проблем екології, тобто проблем взаємодії людини з навколишнім середовищем, є характерною ознакою сьогодення. Дослідження стосовно негативного впливу таких акустичних чинників, як шум і вібрації, ведуться в акустиці і у медицині досить давно. Однак, боротьба з негативними наслідками такого впливу, частіше за все, представлялася проблемою окремих професійних груп. Саме розуміння того, що проблема існування в «акустично забрудненому» світі стає загальнолюдською, сприяло появі такого напрямку в екології. У 1993 році було створено таку міжнародну організацію, як Світовий Форум акустичної екології (англ. *World Forum for Acoustic Ecology*), який своєю метою визначив вивчення наукових, соціальних та культурних аспектів впливу природного та створеного людиною звукового середовища. З 2000 року регулярно видається Журнал акустичної екології (англ. *The Journal of Acoustic Ecology*).

7. *Біоакустика*. Крім людини багато інших живих істот використовують звуки для спілкування та оцінки стану навколишнього середовища. Вивченням особливостей створення звуків живими істотами, сприйняття ними звуків, характерних особливостей використаних звуків, опікуються у такому розділі акустики, як біоакустика. Перші припущення про використання звукових сигналів у системі орієнтації кажанів, висловлювалися ще у 1770 році. Однак, інструментальне підтвердження використання ними ультразвуку, було зроблено лише у 1938 році. На початку п'ятдесятих років ХХ століття, почалося вивчення звуків дельфінів. Ці дослідження вказали на використання ними звуків у діапазоні частот, вище сотні кілогерців. Спостереження за живим світом дозволяє зробити певні узагальнення,

зокрема, що малі за розміром істоти, використовують високочастотні звуки, а великі – низькочастотні. Однак є і винятки — досить великі морські тварини – дельфіни користуються високочастотним ультразвуком. У цілому ж, властивості використовуваного звуку визначаються механізмом його створення. І ці різні механізми вивчаються у біологічній акустиці.

8. *Аероакустика*. Аероакустика це розділ акустики, в якому вивчають механізми виникнення та властивості звуків, що створюються потоком повітря, або збуреннями у повітрі, породженими рухом у ньому різних об'єктів. Потік повітря здатен викликати звук у тому випадку, коли у ньому утворюються і взаємодіють певного виду збурення (турбулентні або вихорові утворення), здатні забезпечити передавання кінетичної енергії потоку в енергію звукової хвилі. Процес такого передавання досить складний, оскільки рух частинок середовища у потоці і у хвилі – це два принципово різні рухи. В першому випадку, маємо перенесення маси, тобто частинки суттєво зміщуються у просторі. У разі-ж поширення хвилі, відбувається лише перенос стану – частинки середовища здійснюють лише коливання поблизу положення стійкої рівноваги.

9. *Ультразвук*. Ультразвук визначають як звукові хвилі у газах, рідинах та твердих тілах, спектр яких, містить складові з частотами вище 20 кГц. Виділення досліджень звукових хвиль такого діапазону частот в окремий розділ акустики зумовлено, перш за все, надзвичайно широким використанням ультразвуку для вирішення технологічних завдань.

10. *Нелінійна акустика*. Задля опису основних математичних моделей акустики ідеальної стисливої рідини, було представлено лінійне рівняння. Для одержання цього рівняння, було зроблено два принципові припущення. Перше з них, кінематичне припущення, базувалося на спостереженнях, що вказували на малість швидкостей руху точок середовища, порівняно зі швидкістю звуку (акустичне число Маха). Це дійсно так, оскільки навіть для інтенсивностей звуку, що відповідають больовому порогу слухової системи людини, число Маха дуже мале порівняно з одиницею, тоді у рівняннях руху, можна було нехтувати певними малими складовими.

Як наслідок нелінійності, у хвильових рухах проявляються такі ефекти, як акустична левітація, радіаційний тиск, акустичні течії. З використанням нелінійних ефектів, створюються параметричні антени і приймачі у гідроакустиці. Під час ультразвукового дослідження внутрішніх органів, врахування нелінійності, дає можливість підвищити рівень контрастності акустичних зображень. Проявом ефекту нелінійності, є явища формування хвиль цунамі та руйнування хвиль у разі наближення до берега.

11. *Геоакустика* – розділ акустики, що пов'язаний з вивченням властивостей інфразвукових, звукових та ультразвукових хвиль у земній корі, гідросфері та атмосфері. Цей розділ акустики є складовою такої загальної дисципліни у науках про землю, як геофізика. Оскільки акустика атмосфери та акустика океану виділилися в окремі підрозділи, терміном геоакустика визначають лише галузь, пов'язану з вивченням хвиль у земній корі. Джерелом таких звуків можуть бути, як природні явища (землетруси, зсуви, виверження вулканів, падіння метеоритів та інше), так і спеціальні вібраційні пристрої і різного роду вибухи. В обох випадках визначення характеристик пружних хвиль у земній корі, викликає великий інтерес. Хвилі, що створюються землетрусами, несуть важливу інформацію про будову земної кори та деформаційні процеси, що у ній відбуваються на недоступних для безпосереднього спостереження глибинах. Саме ця обставина, дозволила свого часу ефективно фіксувати факти проведення підземних ядерних вибухів.

Окремим розділом акустики є музична акустика, яка є предметом останнього питання цієї лекції.

2. Становлення акустики як наукового знання

Серед різних розділів фізики – механіки, оптики, вчення про теплоту та інших – акустика найбільше пов'язана з механікою, оскільки в основі всіх звукових явищ, які вивчає акустика, лежить один з механічних рухів, а саме – коливальний рух.

Вчені XVIII і XIX століть – Ейлер, Бернуллі, Юнг, Гельмгольц, Релей, Савар, Ліссажу і інші досліджували різні форми коливань різних джерел звуку: струн, стрижнів, пластин, мембран і повітряних стовпів, розглядалися процеси передачі звуку шляхом утворення хвиль в твердих тілах, рідинах і газах.

Однак в кінці XIX – початку XX ст. не було ще достатньої конкретності у вченні про звук. Акустика, як наукова дисципліна, переживала в цей час період застою.

Цікаво, що два акустичних прилади – телефон і грамофон були винайдені випадково, без застосування теорії акустики. Обидва прилади швидко проникали в побут, отримали широке розповсюдження, але протягом двох десятиріч років залишалися на рівні свого первісного стану.

Акустика тих днів спиралася майже виключно на механіку та емпіричний досвід. Вона не могла допомогти поліпшити якість звучання грамофону, збільшити дальність дії телефону. Лише з появою і розвитком електротехніки, радіотехніки й електроніки в акустиці відбувається революційні

зрушення. Приєднавшись до цих наук і озброївшись новою методикою дослідження, вимірювань і розрахунку, акустика швидко «розростається» в більшу самостійну галузь фізики. У ній самій відбувається відокремлення окремих спеціалізованих підрозділів. Народжується електроакустика, музична акустика, архітектурна акустика, гідроакустика, звуколокація, звукометрія, ультразвукова дефектоскопія, акустoeлектроніка тощо.

В одному з оглядів знаменитої фірми «Брюель і К'єр» було запропоновано умовно розділити історію взаємини людини зі звуком (а отже, і історію акустики) на три великих етапи:

1) від початку епохи людини розумної до початку XX століття – коли звук з чисто сигнального засобу, необхідного для виживання, виріс в засіб комунікації (мова), і, нарешті, окремі види звуків почали використовуватися як засіб емоційного і естетичного впливу (музика). До початку XX століття музика стала потужним засобом передачі найбільших глибин людської думки і емоцій, геніальні композитори підняли музичну творчість на незвичайну висоту, розробили особливу музичну мову, здатну передавати не менше багатство думок і нюансів, ніж письмова і усна мова. Людство створило величезну палітру музичних інструментів, відпрацювало вокальну техніку, побудувало чудові концертні зали, театри, собори та ін. Однак ці найбільші досягнення мистецтва були доступні дуже обмеженому колу людей (лише частки відсотка могли слухати гарну музику в акустично побудованих залах);

2) від початку XX століття до 1960-х років – з моменту винаходу радіо і телебачення музичне та вокальне мистецтво стало доступно мільйонам, але, як завжди при масовому тиражуванні, якість звуку різко впала, відставали технічні засоби. Головним завданням була передача смислової (семантичної) інформації. До середини століття техніка звукозапису, відтворення і звукопередачі значно удосконалилася, і це дозволило забезпечити новий рівень передачі емоційної і естетичної інформації: зародився рух HI-FI («високої вірності відтворення»), ідеологія якого полягала в тому, щоб створювана акустична апаратура могла відтворювати звук максимально наближеним до оригіналу. Цей рух зародився в Англії (фірми KEF, Tannoy і ін). Постановка такого завдання дала потужний поштовх до розвитку науки (акустики) і створення індустрії виробництва звукотехнічної апаратури;

3) в кінці 1980-х років були сформульовані проблеми третього етапу розвитку – перенесення просторової атмосфери первинного поля в будь-яке вторинне приміщення прослуховування. Сама постановка такого питання була б в принципі неможлива без створення нової наукової і технічної бази

– розвитку цифрових комп'ютерних технологій обробки звуку і відповідних технічних засобів: звукових процесорів; цифрових станцій для обробки, монтажу, редагування, архівування тощо; цифрових лазерних програвачів; магнітофонів та ін. Розробка цієї проблеми триває, але вона вже привела до створення просторових систем звукозапису та звуковідтворення (систем Surround Sound, бінауральної стереофонії і ін.), появи адаптивних цифрових процесорів, систем ауралізації і ін. Вона вимагала розв'язання цілого ряду принципово нових наукових завдань в різних напрямках акустики і аудіотехніки – наприклад, таких як: розшифровка механізмів слухового сприйняття звукового образу; створення віртуальних тривимірних звукових і відео-просторів, розробка нових алгоритмів синтезу музичних звуків (зокрема, комп'ютерних фізичних моделей музичних інструментів і голосів) і ін. Все це стало стимулом для розвитку всіх напрямків акустики.

Сучасна акустика являє собою потужний і розвинений напрям науки і має величезну промислову базу в більшості країн світу: сотні наукових інститутів, тисячі фірм, які розробляють і виробляють величезну різноманітність аудіо-технічної апаратури, зокрема студійне обладнання (пульти, мікрофони, контрольні агрегати і ін.); передавальне обладнання (передавачі, підсилювачі, кодери, і ін.); відтворювальне обладнання (акустичні системи, програвачі, магнітофони та ін.).

У XX столітті в акустиці виділилося більше двадцяти самостійних напрямків, найважливіші з яких були перераховані у попередньому питанні лекції.

3. Предмет і завдання акустики

Завданням акустики є вивчення фізичної природи звуку та проблем, пов'язаних з його виникненням, поширенням і сприйняттям.

Звук має двоїсту природу:

- 1) з одного боку, це об'єктивний процес передачі енергії механічних коливань частинок в пружною середовищі (повітрі, рідині, твердому тілі);
- 2) з іншого боку, це тільки ті види механічних коливань середовища, які сприймаються слуховою системою.

Таким чином, звук – це особливий вид механічних коливань, здатний викликати слухові відчуття.

Можна дати і таке визначення звуку: «звук – слухові відчуття, обумовлені змінами тиску в навколишньому пружною середовищі, викликаними механічними коливаннями пружних тіл».

Тому акустика, як наука про звук, є, з одного боку, поряд з оптикою, термодинамікою, електромагнетизмом тощо, одним з напрямків фізики (точніше – механіки), який займається проблемами створення і

розповсюдження механічних коливань; з іншого боку, оскільки займається і проблемами сприйняття звуку, вона тісно пов'язана з психофізикою, музичною психологією, теорією музики тощо.

Три основні проблеми входять в сферу інтересів сучасної акустики:

1) виникнення звуку, що вимагає вивчення фізичної природи звуку, а також методів і засобів його створення; цими питаннями займається акустика музичних інструментів, акустика мови, електроакустика тощо;

2) передача звуку від джерела до слухача – це завдання архітектурної акустики, електроакустики і ін.;

3) сприйняття звуку слуховою системою і зв'язок слухових відчуттів з об'єктивними параметрами звуку – це завдання психоакустики.

Акустика є міждисциплінарною наукою, що використовує для вирішення своїх проблем широке коло дисциплін: математику, фізику, психологію, архітектуру, електроніку, біологію, теорію музики і ін.

Сучасна людина занурена в світ інформації, значна частина якої надходить їй в звуковому вигляді. Відсутність звукової інформації ускладнює соціальні, психологічні контакти і знижує шанси на виживання. Приблизно 25% інформації про навколишній світ людина отримує від слухових аналізаторів, 60% – від зорових і 15% – від інших.

Лекція 2

ПОНЯТТЯ АКУСТИКИ

1. Музична акустика.
2. Музична акустика в історичній ретроспективі.
3. Слух людини.

1. Музична акустика

Музична акустика – розділ акустики, що вивчає фізичні властивості музичних звуків. Як і загальна акустика, музична акустика – міждисциплінарна наука. У своїх дослідженнях вона використовує дані і (частково) понятійний апарат інших наук, головним чином, математики, теорії музики та психології.

Термін «музична акустика» було введено в науковий обіг в 1898 році, коли в Лейпцигу вийшла праця швейцарського акустика А. Жанк'єра «Основи музичної акустики».

Основний предмет музичної акустики – висота, динаміка, тембр музичних (тобто таких, які застосовуються в музиці, естетичних) звуків, головним чином з точки зору їх сприйняття слухом і відтворення (так званого «інтонування») музикантами-виконавцями. Особлива і велика область музично-акустичних досліджень – музичні лади і темперції (в історичному та теоретичному аспектах).

Одна з основних проблем музичної акустики – визначення того, як фізичні і психологічні закономірності музики відображаються у специфічних законах музичного мистецтва і впливають на їх розвиток.

Якщо розглядати музичну акустику як розділ музичної теорії, то вона не здатна надати повне пояснення таких музичних явищ, як лад, стрій, гармонія, консонанс, дисонанс тощо. Але методи акустики і дані, які отримують за їх допомогою, дозволяють музикознавцям більш об'єктивно вирішувати різні проблеми музичної теорії. Акустичні закономірності музики протягом багатовікового розвитку музичної культури постійно використовувалися для побудови суспільно значущої системи музичної мови, що має специфічні закономірності, які підкорені художньо – естетичним принципам.

Серед завдань, які покликана вирішити сучасна музична акустика – об'єктивне обґрунтування нових явищ ладу та інтонації у творчості сучасних композиторів, конкретизація ролі об'єктивних акустичних чинників у процесі формування музичної мови (звуквисотних, тембрових,

динамічних, просторових та інших), подальша розробка теорії слуху, голосу, музичного сприйняття, а також удосконалення методів дослідження виконавської творчості і сприйняття музики, методів, що спираються на використання електроакустичної апаратури та техніки звукозапису.

Умовно у сучасній музичній акустиці виокремлюються два підрозділи:

- 1) акустика приміщень;
- 2) акустика музичних інструментів.

Сучасна музична акустика являє собою в широкому сенсі слова синтез різних напрямків науки і техніки: акустики мови і співу, акустики музичних інструментів (зокрема, електронних); електроакустики (зокрема, систем звукозапису, звукопередачі і звуковідтворення); архітектурної акустики (зокрема, акустики концертних залів, театрів, студій, приміщень загалом тощо, а також техніки звукопідсилення й озвучування в них); психоакустики тощо.

Враховуючи, що сучасні комп'ютерні технології відкрили принципово нові можливості в розвитку музичної акустики, вона все більше заглиблюється в рішення таких проблем як: розшифровка «слухового образу», тобто цілісне сприйняття музики і мови; створення фізичних комп'ютерних моделей музичних інструментів, голосу, слухової системи тощо; створення нового музичного комп'ютерного інструментарію; інших питань, традиційно досліджуваних в музичній психології, теорії музики, інструментознавстві. Такий синтез музичних наук і акустики створює сучасну наукову базу для вирішення проблем розвитку і вдосконалення музичного мистецтва. Музична акустика є науковою основою освіти представників музичного мистецтва: композиторів, музикознавців, виконавців тощо, оскільки вона слугує базою для розуміння основ теорії музики, музичної психології, комп'ютерних музичних технологій, принципів створення електронної музики тощо; для розвитку інструментознавства (аналіз механізмів звукоутворення в різних музичних інструментах, створення їх комп'ютерних фізичних моделей, розвиток нового комп'ютерного інструментарію тощо); для вдосконалення вокальної та музичного виконавства та ін.

Музична акустика є основою базової природничо-наукової освіти звукорежисерів. Сучасний звукорежисер – це посередник між мовою техніки і мовою мистецтва, що професійно володіє тим і іншим. Він має володіти серйозними науковими знаннями в різних напрямках акустики і аудіотехніки, глибоко розуміти фізичну природу звуку, закони його створення, поширення і сприйняття. Звукорежисер має володіти комп'ютерними технологіями роботи зі звуком, знати технологію запису в кіно, на телебаченні, системи озвучування і звукопідсилення, володіти усією

сучасною звукозаписуючою і звуковідтворювальною технікою. Він має володіти високою музичною культурою, розуміти і цінувати музику, відчувати стиль і напрямки її розвитку, розуміти задум композитора і манеру виконання музиканта, постійно підтримувати високий рівень свої слухацьких еталонів звучання, спираючись на досвід сприйняття музичних творів в умовах концертних залів з хорошою акустикою. Тому природно, що вивчення музичної акустики входить в освітні програми практично всіх мистецьких закладів вищої освіти і консерваторій світу, де ведеться підготовка фахівців за вказаними спеціальностями.

2. Музична акустика в історичній ретроспективі

Історія музичної акустики налічує кілька тисячоліть. В цій частині лекції коротко розглянуті тільки її основні історичні етапи, необхідні для розуміння процесів становлення і накопичення знань про основні властивості музичних звуків, а також праці видатних вчених, на базі яких розвивається сучасна наука.

Історію музичної акустики можна відраховувати з дуже далекої давнини, коли з усіх звуків навколишньої природи людина виділила деякі звуки і їх поєднання, які давали їй естетичне задоволення, і почала створювати перші музичні інструменти для їх відтворення. Час створення перших духових і струнних інструментів датується кількома тисячоліттями до н. е. Очевидно, що протягом цього періоду накопичувалися знання про природу музичних звуків і методи їх формування. У стародавніх музичних культурах Китаю і Індії, де були створені за кілька століть до нашої ери такі музичні лади, як китайська система «люй» (містить 12 звуків в октаві) і індійська система «шруті», описана в книзі Бхарат (II століття до н. е.), що містить 22 звуки в октаві, вже безсумнівно використовувалися відомості про звуковисотні співвідношення, що визначають музичні інтервали тощо.

В подальшому розвитку музичної акустики можна виокремити кілька основних періодів.

Античний період: початок розвитку акустики як наукового напрямку пов'язаний, насамперед, з ім'ям грецького філософа Піфагора (бл. 580–500 до н. е.) та його послідовників, які вивчали зв'язок між висотою тону і довжиною струни, що коливається. Вони встановили зв'язок між музичними інтервалами і відношеннями простих цілих чисел (2:1 – октава, 3:2 – квінта тощо), тим самим заклавши основу для побудови музичної шкали, заснованої на квінтових переходах і названої ім'ям Піфагора. Аристотель (384–322 до н. е.) та його учні створили першу

енциклопедичну працю «Проблемата», що узагальнювала накопичені знання в багатьох галузях науки і мистецтва. Вона містила наявну інформацію про фізику звуку, зокрема, такі коректні припущення, що звукова хвиля поширюється в повітрі завдяки руху його частинок, що звук подібно до світла відбивається від перешкод тощо. Послідовники Арістотеля висловлювали припущення, що слух «залежить від проникнення звуків в мозок через рух повітря» (Теофраст).

Найбільш значною працею останнього періоду в золотий вік грецької науки можна вважати «Про чутне», автором якої, ймовірно, був Стратон (340-262 до н. е.), – в ній вже чітко висловлювалася думка, що звукова хвиля поширюється в повітрі у вигляді стиснень і розріджень. Цікава ідея була висловлена в працях Аристоксена (бл. 320 до н. е.) – про те, що музику не можна звести просто до співвідношення простих чисел, її сприйняття вимагає роботи свідомості і пам'яті, оскільки треба не лише приймати звуки зараз, але і тримати в пам'яті попередні.

Римський архітектор Вітрувій (I століття до н. е.) досить точно визначив механізм поширення звукової хвилі в приміщенні, зокрема, ефекти відображення і відлуння. Він здійснив значний внесок в акустичне проектування амфітеатрів, результати його досліджень були відображені в десятитомній праці «Про архітектуру», яка багато століть слугувала базою для розвитку архітектури та архітектурної акустики.

Завершенням першого періоду наукового розвитку акустики можна вважати п'ятитомну працю римського філософа Боеція (480-524), в якій були узагальнені результати праць античних вчених і висловлені ідеї, що сприйняття висоти звуку пов'язане з таким фізичним параметром як частота коливань, що музичні тони складаються з окремих частин і що співзвуччя можуть бути приємні і неприємні (що дуже близько до класичних понять консонансу і дисонансу).

Таким чином, античний період у розвитку музичної акустики приніс розуміння таких базових властивостей звуку як: зв'язок висоти з частотою коливань струн; поширення звукових хвиль як процесу стиснень і розріджень в повітрі; закони падіння, відображення і поглинання звукових хвиль в приміщеннях тощо. Крім того, були висловлені припущення, що складні музичні звуки складаються з окремих елементів, поєднання яких можуть бути приємними і неприємними на слух, а це послужило базою для створення перших музичних шкал (наприклад, шкали Піфагора).

Другий період – XVI-XVII століття. Другий період наукового розвитку акустики в Європі можна відраховувати з початку епохи Відродження (слід

зазначити, що в Середньовіччя наукові знання про звук продовжували розвиватися в працях арабських і візантійських вчених, докладніше про це можна прочитати в книзі Ф. Ханта). Леонардо да Вінчі (1452-1519), здійснив вагомий внесок в розвиток музичної акустики: зокрема, він вивчав фізичні принципи виховання співочого голосу, природу регістрів, техніку співу *bel canto* тощо. Великий внесок в науку в цей період здійснив Дж. Царліно (1516-1590) – італійський композитор і теоретик, який займався створенням темперованої музичної шкали, обговорював роль мажорної і мінорної терції, настройку інтервалів тетра хорда, розробив теорію консонансів і дисонансів на основі теорії співвідношення простих чисел. Він був одним з творців вчення про гармонію.

Серйозні наукові результати в музичній акустиці були отримані в XVII столітті, і пов'язані вони насамперед з ім'ям Г. Галілея (1564-1642). Батько Г. Галілея Вінченцо Галілей – відомий композитор і музичний теоретик, один із засновників нового жанру в музичному мистецтві – опери, автор праці «Діалоги про давню і нову музику» (1581 р.) – також зробив ряд спостережень: зокрема, він встановив, що якщо довжину струни тримати постійною, то, змінюючи її масу і натяг, можна також домогтися зміни висоти тону. Він зазначив, що малі зміни в налаштуваннях струни не помічаються слухом (тобто вперше звернув увагу на кінцеву роздільну здатність слухової системи). В. Галілей запропонував в 1581 році свій варіант рівномірно темперованої шкали. Продовжуючи справу свого батька, Галілео Галілей приблизно в 1600 році розширив спостереження Піфагора шляхом ретельно поставлених експериментів, заклавши таким чином основу експериментальної акустики. Він першим встановив залежності власної частоти натягнутої струни від її довжини, маси і натягу. Він вивчав закони музичної гармонії, консонансу і дисонансу, поширення звуку в повітрі, явище резонансу тощо. Він вперше пояснив, що сприйняття висоти тону безпосередньо пов'язано з частотою звукової хвилі, яка досягає вуха. На базі фундаментальних праць Галілея музична акустика набула прискореного розвитку.

Французький математик і фізик, а також францисканський чернець Марен Мерсенн (1588-1648) в період 1627-1638 рр. опублікував ряд праць, зокрема, енциклопедію «Загальна гармонія» (1636 р.) у 19 томах. Результати досліджень, викладені в його працях, визначили подальший розвиток експериментальної акустики: він поставив серію дослідів з вимірювання часу повернення відлуння від різних перешкод і таким чином зміг приблизно оцінити швидкість звуку в повітрі (яка у нього виявилася рівною 450 м / с). Йому вдалося вивести формулу «закон Мерсенна», що

встановила, що «основна частота пропорційна кореню з натягу і обернено пропорційна довжині струни і кореню з її маси». Він виявив октавну різницю між частотою відкритих і закритих труб, запропонував вчення про консонанси і дисонанси, зокрема, пояснив явище «биття» при звучанні двох тонів, близьких по частоті; відкрив наявність обертонів в складі складного звуку (він писав, що може ідентифікувати шляхом прослуховування перші п'ять обертонів в спектрі). Мерсенн працював над створенням рівномірно темперованої шкали (запропонував поділ октави на рівні півтони, розташовані в співвідношенні, рівному кореню 12-го ступеня з 2) тощо. Швидкість звуку першим виміряв П'єр Гассенді ще в 1635 році – він отримав значення 478,4 м / с, причому встановив, що швидкість звуку не залежить від частоти. Вчені Боррелем і Вівіані у Флоренції в 1650 році повторили експерименти і отримали значення швидкості 350 м / с. У 1740 році італійський фізик Бьянцоні виявив, що швидкість звуку збільшується з підвищенням температури. (В даний час значення швидкості звуку прийнято рівним 331,29 м / с при 0°C, за результатами вимірювань 1986 року).

У період 1660-1675 рр. англійський фізик Р. Гук опублікував своє відкриття, яке встановило, що розтягнення твердого тіла (металу, дерева та ін.) пропорційно величині прикладеної до нього сили. Закон Гука є основою сучасної теорії пружних коливань, а отже, і теорії звуку. В кінці XVII – початку XVIII століття детальне дослідження співвідношень між формами коливань струн, їх частотою і висотою тону було виконано французьким фізиком Ж. Совьором (1653-1716), який в 1701 році на своїх лекціях в Сорбонні і запропонував термін «акустика» для науки про звук. Він вивчав явище биття (за допомогою органних труб) і запропонував метод обчислення їх частот. Крім того, вивчаючи коливання натягнутих струн, він встановив, що струни можуть коливатися частинами: точки, які залишаються нерухомими, Ж. Совьор назвав вузлами, а самі коливання – гармонійними тонами і встановив, що їх частоти відносяться як цілі числа до частоти основного тону, який був названий ним фундаментальним. Він також зауважив, що струна може коливатися на кількох своїх гармонійних тонах одночасно. Математичне пояснення цьому явищу (принцип суперпозиції) було дано пізніше в працях Л. Ейлера. У 1660 році Роберт Бойль виявив, що звукова хвиля не може поширюватися в вакуумі (він поставив експеримент, відкачавши повітря з ємності, де був встановлений дзвінок).

У цей період тривали спроби створення рівномірно темперованої шкали: німецький органіст і теоретик А. Веркмайстер (1645-1706) запро-

понував кілька варіантів температури, в основу яких було покладено ідею відмови від чистої терції і розподілу «Піфагора» між різними квінтами.

Таким чином, XVI і XVII століття стали періодом накопичення в основному експериментальних знань в музичній акустиці. Дослідження були присвячені встановленню кількісних зв'язків висоти тону з частотою коливань струн, що залежить від їх геометричних і фізичних параметрів; вивчення процесів поширення звуку в повітрі; визначенню швидкості звуку; аналізу музичних інтервалів; пошуку різних варіантів музичних шкал; здійснені перші спроби пояснити ефекти биття, консонансів і дисонансів; з'ясуванню зв'язків між тембром і складом обертонів.

Третій період – XVIII століття. Цей період характеризується перш за все як етап розвитку теоретичної музичної акустики. Ісаак Ньютон (1643-1727) зробив першу спробу створення математичної теорії хвильового руху. Він розглядав у своїй праці «Математичні основи натуральної філософії» (1687 р.) звук як процес поширення імпульсів тиску в середовищі і обчислив, з одних теоретичних міркувань, значення швидкості звуку в повітрі. Ньютон довів, що швидкість звуку визначається як корінь з величини атмосферного тиску, поділений на щільність повітря. Крім того, він встановив зв'язок основної частоти коливань з довжиною відкритих труб органу, флейти тощо. Праці І. Ньютона і Г.В. Лейбніца (1646-1716) дозволили Аламберу в 1740 році вивести загальне хвильове рівняння, використання якого для аналізу коливань струн, мембран, стовпів повітря тощо дало можливість отримати численні прикладні застосування.

Величезну роль у розвитку акустики цього періоду відіграли праці двох видатних фізиків і математиків Д. Бернуллі (1700-1782) і Л. Ейлера (1707-1783). Обидва вони, отримавши освіту в Швейцарії, в Базельському університеті, тривалий час працювали в Санкт-Петербурзі. В коло інтересів обох учених увійшла і музична акустика, з проблем якої вони опублікували цілу низку дуже важливих праць. Їх дослідження стосувалися коливань струн, балок, трубок і дзвіночків в музичних інструментах, а також поздовжніх коливань стовпів повітря в трубах органу і духових інструментах. Л. Ейлер, крім того, створив ряд праць щодо музичних шкал, консонансу і системи гармонії. У 1759 році Ейлер вивів хвильове рівняння для аналізу одно-, дво- і тривимірного хвильового поля в повітрі і запропонував принцип поділу змінних, що є основою теоретичної акустики до тепер. Бернуллі, зокрема, створив теорію і вивів формули для розрахунку резонансів повітряного стовпа в циліндричних і конічних трубах, це він вперше довів, що закриті з одного кінця труби мають тільки непарні гармоніки в спектрі. У період з 1772 по 1774 рік

вони створили теорію коливань пружних балок з різними умовами закріплення країв; зокрема, були отримані відносини власних частот для вільних країв у вигляді $1,00:2,76:5,40:8,90$. Крім того, Бернуллі вперше виявив, що зміщення будь-якої точки струни можна уявити як суму простих синусоїдальних коливань (принцип суперпозиції хвиль). Отримані результати стали основою для розвитку теоретичної бази музичної акустики в XIX–XX століттях.

Дж. Тартіні (1692-1770), видатний італійський скрипаль і композитор, вперше виявив появу комбінаційних тонів при одночасному звучанні двох гучних звуків; це явище було пояснено тільки в XX столітті на базі нелінійної теорії слуху.

У 1802 році з'явилася знаменита праця німецького акустика, члена-кореспондента Петербурзької Академії наук Е. Хладні (1756-1827) «Акустика». У ній були представлені результати досліджень коливальних процесів в пластинах, мембранах, балках та інших елементах, що вібрують, використовуваних в музичних інструментах. Він вперше запропонував метод візуалізації форм коливань різних тіл за допомогою піщаних фігур на їх поверхні, які отримали назву «фігури Хладні». Наразі візуалізація коливань дек, пластин, струн тощо здійснюється за допомогою лазерної техніки, проте отримані форми як і раніше називаються «фігури Хладні». Е. Хладні отримав багато цікавих результатів у вивченні вібрацій струн і пластин, а також здійснив внесок у вимірювання швидкості звуку в твердих тілах за допомогою аналізу розподілу вузлових ліній в металевих стрижнях.

Таким чином, в XVIII столітті створюється теоретична база розвитку музичної акустики на базі математичної фізики, механіки тощо. Це дало можливість приступити до кількісного аналізу механізмів звукоутворення в музичних інструментах і послужило основою для їх модернізації та розвитку.

Четвертий період – XIX століття. На початку XIX століття французький вчений Ж. Фур'є (1768-1830) запропонував метод уявлення складного сигналу у вигляді суми простих гармонійних коливань. З 1822 року, коли з'явилася теорія рядів Фур'є, почав розвиватися спектральний аналіз і синтез звуку, який наразі широко використовується в музичних редакторах і комп'ютерних програмах звукової обробки.

Німецький фізик Г. Ом (1787-1854) вперше встановив, що слух чутливий до амплітуд (але не до фаз) гармонійних складових складного звукового сигналу (точніше, він вважав, що тембр залежить тільки від

розподілу енергії між гармоніками). Це положення відомо як «слуховий закон Ома».

Приблизно в 1830 році французький фізик Ф. Савар (1791-1841) та інші вчені припустили, що чутний діапазон звукових частот знаходиться в межах від 16-32 коливань в секунду до 24000 коливань в секунду (зараз одиниця частоти коливань в секунду називається «Герц» – на честь відомого німецького фізика Генріха Герца (1857-1894), чий внесок у вивчення електромагнітних хвиль визначив нову епоху в фізиці). Наразі ці межі вважаються рівними 20-20000 Гц, хоча в середньому вони істотно менше (через вікові та інші зміни). Праці Ж. Лагранжа (1736-1813) з механіки і розроблений ним метод дослідження коливань струни як розподіленої системи (шляхом граничного переходу від системи з кінцевим числом ступенів свободи), а також праці С.Д. Пуассона, Т. Юнга, П. Лапласа з механіки коливань різних тіл (мембран, пластин та ін.) стали основою подальшого теоретичного розвитку акустики.

Значною подією була поява знаменитої двотомної праці «Теорія звуку» (1877-1878) професора, а з 1908 року президента Кембриджського університету Джона Стретта, лорда Релея (1842-1919), яка багато разів перевидавалася і до тепер широко використовується в науці. У цій праці були узагальнені наукові результати, накопичені в XVIII–XIX століттях, а також власні роботи автора з аналізу коливань струн, мембран, пластин, стовпів повітря і теорії поширення коливань в пружних середовищах. Все це створило базу для розвитку різних наукових напрямків, зокрема, сучасної акустики музичних інструментів.

Величезний внесок у розвиток музичної акустики здійснив Герман Гельмгольц (1821-1894) – професор фізіології в Кенігсберзі, потім професор фізики і директор першого фізико-технічного інституту в Берліні. У праці «Вчення про слухові відчуття як фізіологічна основа теорії музики» (1863) він виклав концепцію резонансної теорії слуху, запропонував свою теорію консонансів і дисонансів тощо. Він почав експериментальне вивчення спектрального складу звуків (винайшов для цих цілей так звані резонатори Гельмгольца); вперше пояснив виникнення різницевих тонів (ефект Тартіні) як наслідок нелінійної обробки сигналів в слуховій системі. Він запропонував теорію голосоутворення, яка в принципі не спростована і дотепер. Коло його інтересів було надзвичайно широким. Гельмгольц здійснив також величезний внесок в розвиток оптики, електромагнетизму і механіки. Праці Гельмгольца стали базою для формування в кінці XIX століття психоакустики: в 1876 році А. Мейер описав явище маскування одного

звуку іншим, при цьому він звернув увагу на різний характер участі в процесах маскуванню низько-і високочастотних звуків. До цього ж часу належать роботи по визначенню диференціальних порогів слухового сприйняття частоти. Карл Штумпф (1848-1936) опублікував двотомну працю «Психологія звуку» (1883-1890), яка була подією в психоакустиці. В ній він запропонував ввести для багатовимірного опису тембру такі суб'єктивні шкали, як повнота, яскравість, гострота і ін. Він вперше зазначив, що музичні інтервали сприймаються по висоті в високих октавах інакше, ніж в низьких (що підтвердилося при створенні сучасної шкали оцінки психофізичної висоти звуку в «мелах»).

Г. Ріман в 1891 році створив працю, яка була перекладена на російську мову під назвою «Акустика з точки зору музичної науки». Теорія поширення звуку в приміщеннях, зокрема статистична теорія розрахунку звукових полів, була створена професором Гарвардського університету У. Себіном (1868-1919). Саме він запропонував формулу для розрахунку часу реверберації в приміщенні в залежності від його об'єму і середнього коефіцієнта поглинання (на честь нього одиниця поглинання була названа «Себін»). Бостонська симфонічна зала, побудована в 1900 році, була створена на основі його розрахунків. Двоюродний брат вченого П. Себін, який опублікував в 1932 році працю «Акустика і архітектура», продовжив ці дослідження. Таким чином, в XIX столітті було досягнуто значного прогресу в теорії механічних коливань; зроблені видатні відкриття в галузі електрики і магнетизму (в кінці століття були винайдені такі прилади як фонограф, телефон і мікрофон); створена статистична теорія для аналізу поширення звуку в приміщеннях; закладені основи формування психоакустики. В результаті музична акустика як наука сформувалася остаточно у всіх своїх основних напрямках, що містять дослідження проблем створення, поширення і сприйняття музичних звуків.

П'ятий період – XX століття. Двадцяте століття принесло з собою революційні зміни в розвитку музичної акустики. З'явилися принципово нові засоби створення звуку і способи його передачі (радіо, телебачення, мультимедіа); була створена потужна індустрія з виробництва технічних засобів запису, передачі та відтворення звуку; наукові дослідження зосередилися в великих інститутах і лабораторіях і на них почали виділятися значні кошти як від держави, так і від промисловості; комп'ютерна революція змінила можливості теоретичної і прикладної науки і призвела до появи принципово нових напрямків; відбулася подальша диференціація акустики, зокрема, і музичної. Темп прогресу як в теоретичній, так і в прикладній науці лавиноподібно зростав з кожним десятиліттям.

У розвитку музичної акустики в усіх її основних напрямках був досягнутий величезний прогрес – як в дослідженні проблем створення музичних звуків (акустика музичних інструментів, акустика співочого голосу, електроакустика і комп'ютерні музичні технології), так і у вивченні способів їх передачі (акустика концертних зал, студій та ін.) і сприйняття (психоакустика). Праці Г. Гельмгольца створили фундамент для розвитку психоакустики (а також психофізіології, музичної психології та ін.) як самостійного напрямку в науці, що в кінці XIX – початку XX століття тісно переплітається (в тій її частині, яка стосується питань сприйняття музичних звуків) з музичною акустикою.

До 1910 року були сформульовані основні принципи гештальт-психології, а саме принципи формування «образу» при сприйнятті навколишнього світу, в основі яких використовуються такі поняття, як близькість, подібність, безперервність. Ці принципи були спочатку використані для пояснення сприйняття візуальних об'єктів, проте сучасна психоакустика застосовує їх для пояснення сприйняття музики і мови. Великий внесок у розуміння процесів сприйняття музики внесли роботи К. Сішора (1866-1949), експерименти Д. Шаута в 1938 році і Дж. Ліклайдера в 1954 році і наступні роботи Е. Терхардта (основні їх результати викладені в праці «Концепція музичної гармонії: зв'язок між музикою і психоакустикою», 1984 р.), що дозволили створити теорію сприйняття висоти тону, зокрема, пояснити ефекти сприйняття «віртуальної» висоти.

На початку 1920-х років в «Bell Lab» (США) почали активно розвиватися дослідження по слуховому сприйняттю музики і мови, зумовлені потребами аудіотехніки, що набула розвитку. Займаючись вивченням сприйняття музики і мови, Г. Флетчер і його група вперше визначили пороги чутливості слуху в залежності від частоти (криві рівної гучності), визначили больовий поріг слуху (120 дБ) і встановили диференціальні пороги за частотою та інтенсивністю. В цей же період було встановлена кількісний зв'язок змін фізичних параметрів і спричинених ними відчуттів (закон Вебера – Фехнера). Результати цих досліджень були відображені в 1922 році в праці Г. Флетчера «Мова і слух». Група під керівництвом Г. Флетчера успішно продемонструвала в 1934 році стереозвук і почала активно займатися бінауральною стереофонією. Роботи по слуховому сприйняттю були продовжені С. Стівенсом, який ввів шкали для оцінки висоти тону (в мелах) і гучності (в сонах).

Величезний внесок у розвиток психоакустики здійснив угорський професор Г. Бекеш (1899-1972), який з 1947 року працював в Гарвардському університеті в США. Він описав ефект «хвилі, що біжить» на

базиллярній мембрані у внутрішньому вусі і довів, що розташування нервових рецепторів і ступінь їх активності відіграють принципову роль при визначенні висоти і гучності звуку. За цей комплекс праць він отримав в 1961 році Нобелівську премію. Ним були написані такі праці як «Experiments in Hearing» (1960 р.) і «Sensory Inhibition» (1967 р.). Наразі психоакустика (не тільки в тій частині, яка перетинається з музичною акустикою) є одним з напрямків науки, що найбільш швидко розвиваються, зокрема й тому, що від її успіхів у розумінні процесів «розшифровки» звукового образу слуховою системою залежить прогрес всієї потужної світової аудіоіндустрії. Досягнувши значних успіхів в розумінні механізмів слухового розпізнавання висоти тону, гучності, тембру, локалізації, маскування тощо, сучасна психоакустика (спільно з когнітивною психологією) займається питаннями комплексного сприйняття «слухового образу».

З найбільш відомих вчених, що займаються в даний час різними аспектами слухового сприйняття музичних і мовних сигналів, можна виокремити таких: Moore B. – Univ. of Cambridge (UK); Hartmann W. M. – Michigan State Univ. (USA); McAdams S. – IRCAM (France); Houtsma A. – IPO / TUE (ND); Deutsch D. – Univ. of California (USA); Roederer J. – Univ. of Alaska (USA); Zwicker U. – EPO (Germany); Terhard E. – Tech. Univ. München (Germany); Rossing T. – Northern Illinois Univ. (USA); J. Blauert – Ruhr. Universität Bochum (Germany); R. Pampcutt та багато інших. За цим напрямком видаються десятки праць і журналів, наприклад Music Perception, Psychology of Music, Psychomusicology, JASA, JAES тощо. На всіх міжнародних конгресах таких великих наукових товариств, як: ESCOM (European Society for the Cognitive science of Music), SMPC (Society for Musical perception and Cognition), SEMPRES (Society for Education, Music and Psychology), AES (Audio Engineering Society), ASA (Acoustical Society of America) і ін., працюють спеціальні секції психоакустики, викликають величезний інтерес фахівців.

Передача звуку (архітектурна акустика, системи звукопідсилення). Роботи зі створення теорії розрахунку звукових полів в приміщеннях в XX столітті були продовжені: зокрема, С. Ейрінг, активно працював на початку століття на «Bell Telephone Lab.» (США) разом з Г. Флетчером, удосконалив формулу Себіна для випадку великих коефіцієнтів поглинання в залах. Професор Каліфорнійського університету В. Кнудсен здійснив великий внесок у вивчення резонансів коливань обсягу повітря в приміщенні, в розрахунок загасання звуку в повітрі і ін. (V. O. Knudsen «Architectural Acoustics», 1932 р.). Праці таких учених, як Ф. Морз,

Е. Скучік та ін., створили теоретичну базу для аналізу процесів коливань і випромінювання звуку.

Досвід, накопичений акустиками при будівництві великих концертних залів (Royal Festival hall в Лондоні, Salle Pleyel в Парижі, Beethovenhalle в Бонні і ін.), і подальший розвиток теорії архітектурної акустики були узагальнені в працях Л. Беранек, його фундаментальна праця «Music, acoustics and architecture» (1962 р.) витримала вже кілька видань і є разом з іншими його працями класичною основою сучасної акустики. Величезний внесок у розвиток акустики концертних, оперних залів, кінозалів, студій та інших приміщень внесли праці таких вчених як Г. Олсон, Х. Кутруф, М. Шредер, В. Кнудсен, М. Барон, І. Андо, В. Йордан, В. Рейхард і ін.

Поряд з будівництвом великих концертних та оперних залів з природною акустикою ХХ століття принесло новий напрям: створення багатопрофільних концертних залів, стадіонів тощо з використанням різних систем звукопідсилення. Теорія розрахунку і проектування таких систем представлена в працях численних вчених, з яких можна виокремити доробок В. Анерта.

В кінці століття з'явився новий напрям в акустиці, заснований на сучасних комп'ютерних технологіях, одержавши назву «ауралізація» (термін був запропонований М. Клейнером в 1983 році на конгресі AES). Метою його є створення тривимірних віртуальних моделей будь-яких приміщень, що дозволяє з урахуванням бінауральних слухових характеристик відтворити звучання музики й мови в будь-яких залах (зокрема і в ще не побудованих). За цим напрямком ведуться роботи в лабораторіях багатьох країн світу, і йому приділяється зараз велика увага на всіх конгресах AES і в науковій літературі. Створення звуку (акустика музичних інструментів, акустика голосу). На початку ХХ століття і в 1930-і роки великий внесок в розвиток цього напрямку музичної акустики внесли роботи К. Сішора і Д. Міллера. Німецький вчений В. Лоттермозер отримав дуже вагомі результати у вивченні акустики органу та інших інструментів. Наступне покоління вчених представляв Ю. Мейер, його класична праця «Akustik und musikalische Aufführungspraxis» вийшла вже третім виданням в 1995 році.

У наступні роки в музичній акустиці працювали і працюють такі відомі фахівці як А. Benade, J. Backus, Т. Rossing, N. H. Fletcher, С. Hutchins, DE Hall і ін. Питаннями акустики музичних інструментів займаються десятки інститутів і університетів світу: IRCAM (France), Stanford University – CCRA (USA), McGill University (Canada), Royal Institute of Technology – KTH (Sweden), Institute for Musical Acoustics – IWK (Austria), International Academy of Music (Italy), Cambridge University Eng. Department

(UK), Humboldt Univ. (Germany), Univ. Edinburg (UK) і ін., праці яких регулярно видаються на міжнародних конгресах і конференціях SMAC, ISMA, AES Convention, Meeting of the ASA і ін. Міжнародним центром з вивчення акустики співочого голосу є Шведська академія музики, де президентом Комітету з музичної акустики протягом багатьох років з 1970 року є проф. Johan Sundberg: ним самим і його колегами виконано великий комплекс досліджень з акустики співочого голосу, результати яких узагальнені в його праці «Акустика співочого голосу». Під його керівництвом проходять регулярні міжнародні семінари з різних напрямків в музичній акустиці, доповіді на яких узагальнені в дванадцятитомних працях. У цьому центрі регулярно проводяться лекції, проходять семінари та стажування фахівців з різних країн світу. З початку XX століття почали активно створюватися електромузичні інструменти: електрооргани Т. Кахілла і Л. Хаммонда, терменвокс, хвилі Мартено, тратоніум, електропіаніно, електрогітари і ін.

У 1960-і роки з'явилися перші аналогові синтезатори (R. Moog), в 1990-ті роки були створені цифрові пристрої: синтезатори, семплери, секвенсори, MIDI-синтезатори, комп'ютерні музичні робочі станції і ін., які відкрили нову епоху в створенні і обробці музичних і мовних сигналів за допомогою комп'ютерних цифрових технологій.

Поява нової комп'ютерної технічної бази з величезними можливостями по управлінню параметрами звуку створила основу для розвитку нових напрямків електронної (електроакустичної) і комп'ютерної музики.

Ці ж можливості відкрили принципово нові перспективи в розвитку музичної акустики.

3. Слух людини

Людина має дивовижні можливості сприйняття і аналізу звукових коливань.

Абсолютним слухом називається здатність деяких людей визначати висоту заданого звуку і називати ту ноту, якій цей звук відповідає, безвідносно до інших нот. Людина, що володіє абсолютним слухом, може відтворити голосом будь-яку задану ноту (в межах вокального діапазону), не звіряючи її ні з яким іншим звуком. Таким абсолютним слухом наділені від природи далеко не всі люди, і навіть не всі композитори і музиканти-виконавці.

Відносним слухом володіє людина, спроможна визначати і відтворювати голосом задані музичні інтервали, тобто визначати відношення між висотами звуків, оцінюючи їх як квінту, кварту, терцію

тощо. Таким відносним слухом володіють всі музиканти, розвиваючи його під час навчання.

Необхідно зрозуміти, як слухова система розшифровує звуковий образ, встановити основні відповідності між фізичними сигналами і слуховими відчуттями, і виявити, які саме параметри звукового сигналу є найбільш значущими для передачі семантичної (смислової) і естетичної (емоційної) інформації.

Всю звукову інформацію із зовнішнього світу (приблизно 25% від загальної) людина розпізнає за допомогою слухової системи і роботи вищих відділів мозку, переводить в світ своїх відчуттів і приймає рішення, як треба на неї реагувати.

Звуковий сигнал будь-якої природи може бути описаний певним набором фізичних характеристик: частота, інтенсивність, тривалість, спектр тощо. Таким характеристикам відповідають певні суб'єктивні відчуття, що виникають при сприйнятті звуків: гучність, висота, тембр, биття, консонанси-дисонанси, маскування, локалізація-стереоефект тощо. Слухові відчуття пов'язані з фізичними характеристиками неоднозначно і нелінійно. Ще в минулому столітті було встановлено закон Вебера – Фехнера: «Величина відчуття пропорційна десятковому логарифму від величини подразнення».

Перш ніж перейти до вивчення того, як слухова система сприймає висоту тону, зупинимося на механізмі роботи самої слухової системи.

Слухова система є своєрідним приймачем інформації і складається з периферійної частини і вищих відділів слухової системи. Найбільш вивчені процеси перетворення звукових сигналів в периферійній частині слухового аналізатора.

Загальний вигляд розрізу периферичної слухової системи відображено на рис. 2.1. Зазвичай її поділяють на три частини: зовнішнє, середнє, і внутрішнє вухо. Зовнішнє вухо складається з вушної раковини і слухового каналу, який закінчується тонкою мембраною, яка називається барабанною перетинкою.

Зовнішні вуха і голова – це компоненти зовнішньої акустичної антени, яка з'єднує (погоджує) барабанну перетинку з зовнішнім звуковим полем. Основні функції зовнішніх вух – бінауральне (просторове) сприйняття, локалізація звукового джерела і посилення звукового сигналу, особливо в діапазоні середніх і високих частот. Слуховий канал являє собою вигнуту циліндричну трубку завдовжки $\sim 22,5$ мм, яка має першу резонансну частоту $\sim 2,6$ кГц, тому в цьому діапазоні частот він приблизно в три рази підсилює звуковий тиск, і саме тут знаходиться частина

максимальної чутливості слуху. Барабанна перетинка – тонка плівка товщиною 74 мкм, має вигляд конуса, зверненого вістрям в сторону середнього вуха, і з'єднана тут з кістково-м'язовим важільним механізмом у вигляді молоточка і коваделка.

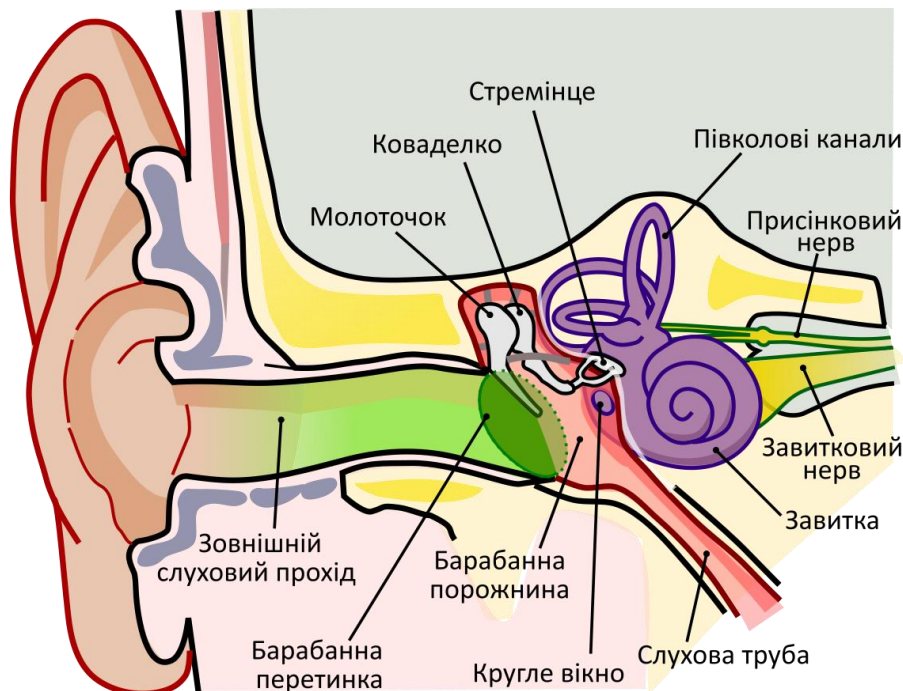


Рис. 2.1. Структура периферичної слухової системи

Середнє вуха – заповнена повітрям порожнина, з'єднана з носоглоткою євстахієвою трубою для вирівнювання атмосферного тиску. М'язова тканина ніжки коваделка спирається на вхідний елемент внутрішнього вуха – мембрану овального вікна. Система молоточок – коваделко виконує роль трансформатора коливань барабанної перетинки, підвищуючи звуковий тиск на мембрані овального вікна для найбільшої віддачі енергії з повітряного середовища середнього вуха у внутрішнє вуха.

Внутрішнє вуха знаходиться в лабіринті каналів в скроневої кістки і містить в собі орган рівноваги (вестибулярний апарат) і равлик.

Равлик відіграє основну роль в слуховому сприйнятті. Він являє собою трубку, що звужується по довжині (з 0,5 мм до 0,04 мм) перетину, згорнуту три рази подібно хвосту змії. У розгорнутому стані вона має довжину 3,5 см. Всередині равлик має надзвичайно складну структуру. По всій довжині він розділений двома мембранами на три порожнини. Зверху середина порожнини закрита мембраною Рейсснера, знизу – базилярною мембраною. Всі порожнини заповнені рідиною – лімфою. Базилярна мембрана виконує функцію паралельного спектрального

аналізатора акустичного сигналу. Уздовж неї проходять шари закінчень нервових волокон, що з'єднуються в джгут.

Загальний механізм передачі звуку спрощено може бути пояснений таким чином. Звукові хвилі проходять звуковий канал і збуджують коливання барабанної перетинки, молоточка і коваделка. При коливаннях мембрани овального вікна в рідині равлика виникають пружні коливання, що переміщаються уздовж базилярної мембрани від основи равлика до його вершини. Структура базилярної мембрани аналогічна системі резонаторів з резонансними частотами, локалізованими по довжині. Ділянки мембрани, розташовані біля основи равлика, резонують на високочастотні складові спектра звукових коливань, змушуючи їх коливатися, середні реагують на середньо частотні, а ділянки, розташовані поблизу вершини, – на низькі частоти. Високочастотні компоненти в лімфі швидко згасають і на віддалені від початку ділянки мембрани не впливають. Резонансні явища, що локалізуються на поверхні мембрани у вигляді «хвилі, що біжить» (рис. 2.2), збуджують волоскові клітини, розташовані на базилярній мембрані в кілька шарів, які, в свою чергу, взаємодіють з нервовими закінченнями. Кожна з таких клітин має до ста волоскових закінчень. Із зовнішнього боку мембрани розташовується три-п'ять шарів таких клітин, а під ними знаходиться внутрішній ряд, відповідно загальне число волоскових клітин, що взаємодіють між собою пошарово при деформаціях мембрани складає більше 20 тисяч. Результатом цього складного процесу є перетворення вхідного сигналу в дискретні електричні імпульси нервових волокон, що несуть всю необхідну інформацію про звуковий сигнал, що надійшов, в мозок для подальшої переробки.

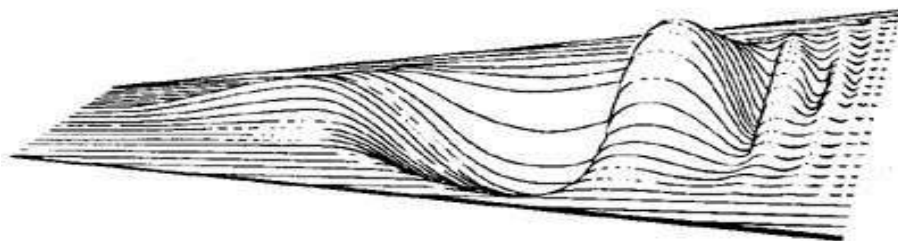


Рис. 2.2. «Хвиля, що біжить» по базилярній мембрані

Вищі відділи слухової системи (зокрема і слухові зони кори), можна розглядати як логічний процесор, який виокремлює корисні звукові сигнали на тлі шумів, групує їх за певними ознаками, порівнює з наявними в пам'яті образами, визначає їх інформаційну цінність і приймає рішення про відповідні дії.

Найважливішою властивістю слухової системи є можливість визначення висоти звуку. Ця властивість має велике значення для виділення і класифікації звуків в навколишньому звуковому просторі, ця ж здатність слухової системи лежить в основі сприйняття інтонаційного аспекту музики, тобто мелодії і гармонії.

Слухова система здатна розрізняти висоту звуку лише у періодичних сигналів. Якщо це просте гармонійне коливання, наприклад, синусоїдальний сигнал від генератора, то період коливань T визначає частоту $f = 1 / T$, тому визначальним параметром для розрізнення висоти є частота сигналу. Якщо це складний періодичний звук, то висоту слухова система визначає по частоті повторення сигналу – основного тону (спектр складається з гармонік основного тону – обертонів, частоти яких знаходяться в цілочисельних відношеннях). У разі неперіодичного сигналу (немає періоду коливань, в спектрі є безліч синусоїдальних складових, частоти яких не перебувають в цілочисельних відношеннях) висоту тону визначити слухова система не може. Наприклад, звуки таких інструментів як тарілки, гонги тощо не мають певної висоти.

Вивчення зв'язку частоти звуку і висоти, що сприймається здійснювалося ще Піфагором, а також багатьма відомими фізиками: Галілеєм, Гельмгольцом, Омом і ін. На основі ретельних експериментів, в процесі яких слухачам пред'являлися два звуки різної частоти з проханням розташувати їх по висоті, встановлена залежність висоти тону від частоти сигналу (рис. 2.3). Значення висоти дано в спеціальних одиницях – мелах або барках (1000 мел відповідає відчувається висоті звуку частотою 1000 Гц при рівні 40 дБ, 1 барк = 100 мел). Видно, що зв'язок нелінійний – при збільшенні частоти, наприклад, в три рази (від 1000 до 3000 Гц), висота підвищується тільки в два рази (від 1000 до 2000 мел). До частоти приблизно 1000 Гц збільшення висоти тону на октаву пов'язано з подвоєнням частоти. Наприклад, перехід від ноти ля першої октави до ноти ля другої октави відповідає збільшенню частоти від 440 до 880 Гц. Вище частоти 5000 Гц для збільшення висоти на октаву, треба збільшити співвідношення частот більш ніж в 5 разів. Необхідно зауважити, що навіть музиканти з абсолютним музичним слухом можуть у визначенні нот для звуків з частотою вище 5000 Гц припускатися помилок. Це вказує на те, що механізми сприйняття висоти тону до 5000 Гц і вище – різні.

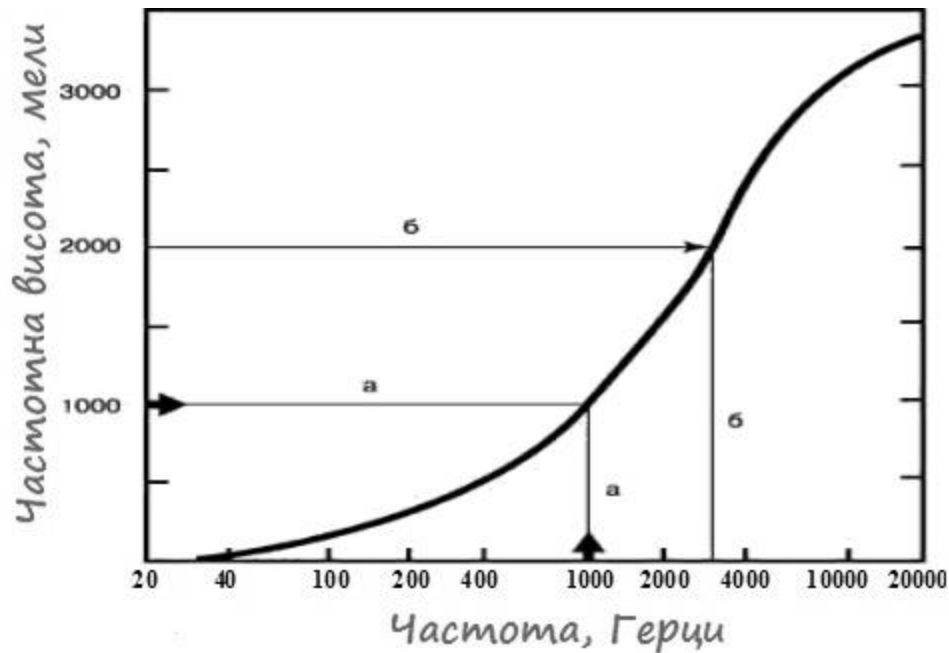


Рис. 2.3. Залежність висоти тону від частоти звуку

Слухова система відрізняється високою роздільною здатністю. Вона може розрізнити по висоті наступні один за одним звуки, що відрізняються по частоті всього на 0,2%, причому нижче частоти 500 Гц можна виділити приблизно 140 градацій висоти тону, в діапазоні від 500 Гц до 16 кГц – приблизно 480 градацій висоти тону (всього 620 градацій). В європейській музиці інструменти з рівномірно темперованою шкалою використовують близько 100 градацій висоти тонів. Можливості слухової системи – основа для розвитку мікротонної і спектральної музики на базі комп'ютерних технологій. Необхідно звернути увагу, що число градацій різко зменшується зі зменшенням інтенсивності звуку і в середньому становить не більше 100-150.

Відчуття висоти чистого тону (однієї частоти) пов'язано не тільки з частотою, але і з його тривалістю. Залежність висоти тону від його інтенсивності незначна, а для складних музичних звуків майже непомітна. Це позитивно для музики, тому що інакше при переході від pp до ff звуковисотні відношення (мелодія і гармонія) були б порушені.

Відчуття висоти тону залежить і від його тривалості: короткі звуки сприймаються як сухе клацання, що цілком зрозуміло з точки зору спектральної теорії. Час, необхідний для переходу від клацання до тону, залежить від частоти: для низьких частот потрібно для розпізнання висоти тону приблизно 60 мс, для частот від 1 до 2 кГц – 15 мс. Для складних звуків цей час збільшується до 20 - 30 мс. З фізичної точки зору воно становить 2-3 періоди коливання.

У музиці прості тони практично не використовуються, кожен музичний тон має складну структуру і складається з основного тону і гармонік. Однак можна встановити відповідність по висоті музичного тону, наприклад ноти ля першої октави і чистого синусоїдального сигналу з частотою 440 Гц. Висоти цих двох звуків будуть однаковими, але тембри – різними. Це вказує на те, що для складних періодичних сигналів висота присвоюється за частотою основного тону – саме він має частоту 440 Гц. Для пояснення механізму сприйняття висоти як простих, так і складних звуків використовуються дві теорії: «теорія місця» і «часова теорія».

Теорія місця при сприйнятті висоти базується на здатності базилярної мембрани виконувати частотний аналіз складного звуку, тобто діяти як спектральний аналізатор. Як відомо, звуковий сигнал викликає появу на мембрані «хвилю, що біжить» (рис. 2.2), але специфіка порушення полягає в тому, що кожна частота має своє місце максимуму збудження на мембрані (рис. 2.4).

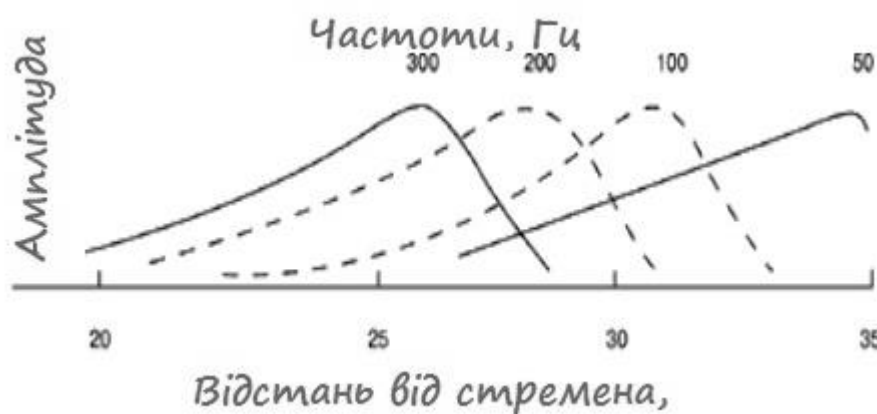


Рис. 2.4. Максимуми амплітуди для різних частот на мембрані

Залежно від спектрального складу на базилярній мембрані порушуються різні ділянки. Це викликає збудження волоскових клітин, що знаходяться на цьому місці, і їх електрична активність повідомляє мозку, які частоти присутні в спектрі.

Часова теорія сприйняття висоти базується на аналізі часової структури звукової хвилі. Ця теорія використовує зв'язок часу розрядів нейронів з фазою коливання базилярної мембрани.

Часова теорія стверджує, що фундаментальна частота знаходиться на основі аналізу часових інтервалів між нервовими імпульсами від різних місць на базилярній мембрані. По ній визначається висота тону. Однак часова теорія не пояснює сприйняття висоти тону на частотах вище 5000 Гц. На цих частотах в слуховий діапазон (до 20 кГц) потрапляють тільки дві-три чутних гармоніки, цього занадто мало для

слуху. Сприйняття висоти тону на цих частотах істотно збіднюється і практично закінчується сприйняття музичної висоти тону (інтонації). З цієї причини на більшості музичних інструментів (рояль і ін.) клавіатура закінчується в за діапазоном на 5 кГц. На органі є труби, які дають тон 8 кГц, але вони використовуються лише разом з іншими.

Відповідно до сучасних теорій мозок приймає інформацію від периферійної слухової системи як за рахунок індикації місця (частотний аналіз), так і за рахунок інформації про форму звукової хвилі (часовий аналіз). Спочатку йде фільтрація сигналу по частоті за допомогою розгортки за місцем, потім – аналіз по міжімпульсним інтервалам. Таким чином, очевидно, обидві теорії доповнюють одна одну.

Аналіз сприйняття висоти музичного тону за допомогою запропонованої моделі дозволив отримати ряд цікавих результатів:

а) для музичних тонів з основною частотою від 100 до 400 Гц (з рівнем звукового тиску не менше 50 дБ) основну роль у визначенні висоти тону відіграють перші п'ять-шість гармонік (якщо їх рівень перевищує 10 дБ);

б) звукові сигнали, що містять тільки дуже високі гармоніки (понад двадцять), не викликають відчуття висоти тону;

в) музичні сигнали, що містять дуже низькі частоти (з основною частотою нижче 50 Гц, наприклад, звуки органу) викликають відчуття висоти тону тільки по гармонікам, тому що такі низькі частоти не викликають зсувів базилярної мембрани – вони на ній не розміщуються, їм не вистачає місця. При цьому найбільш істотну роль відіграють п'яті – шості гармоніки;

г) основна частота звуку, якщо вона вище 1000 Гц, є домінантним компонентом у визначенні висоти тону;

д) фазові співвідношення різних гармонік в музичному сигналі впливають на сприйняття висоти.

Сприйняття висоти тону для складних музичних сигналів починається з аналізу в периферичній слуховій системі, де здійснюється їх частотний і часовий аналіз, а потім отримана інформація передається у вищі відділи мозку – «центральный слуховий процесор», де певним чином гуртується і осмислюється.

Мозок групує кілька тонів (гармонік) з однаковим частотним інтервалом в одне відчуття висоти тону. Це важлива властивість слухового «процесора» (вищих відділів кори головного мозку): зі складного зовнішнього звукового світу він виокремлює звуки і групує їх за певними ознаками: за місцем, за часом початку і кінця, за

періодичністю повторень тощо. Сучасна психологія стверджує, що мозок мислить образами. Мабуть, музичні звуки також запам'ятовуються у вигляді деяких гармонійних еталонів (шаблонів), які формуються в дитинстві, аналогічно до звуків мови.

Наразі загально прийнята гіпотеза, згідно з якою «центральный процесор» діє таким чином. Для кожного вхідного сигналу підбирається по фундаментальній частоті гармонійний шаблон, який йому краще підходить. Відповідно до цієї моделі найбільш відповідна фундаментальна частота підбраного шаблону і буде сприйматися висотою тону. Якщо два шаблони з різними формами і фундаментальними частотами підходять до даного сигналу, можна очікувати почути або невизначену висоту або дві висоти. У разі відсутності фундаментальної частоти, порівняння проводиться за окремими гармоніками. Якщо вдається підібрати хоча б кілька гармонік, які підходять під еталон, то по повторюваному інтервалу між ними присвоюється висота тону (віртуальна висота тону чується, наприклад, в звуці дзвонів).

Лекція 3

ПОНЯТТЯ ЗВУКУ

1. Звук.
2. Класифікація звуків.
3. Властивості звуків.

1. Звук

Звук є процесом, який відбувається в часі і в просторі. В основі будь-якого звуку лежить коливання якогось тіла: коливається струна, що звучить, коливається стовп повітря, наприклад, у флейті.

У звуковому процесі підлягають вивченню три його основні елементи:

1) джерело звуку або вібратор, тобто тіло, яке, здійснюючи механічні коливання, випромінює в простір енергію, що сприймається нами як чутні звуки;

2) пружне середовище – тверде, рідке або газоподібне тіло, через яке енергія джерела звуку, що коливається, передається на відстань, що відокремлює джерело звуку від його приймача;

3) приймач звуку, яким слугує наш орган слуху або прилад, що виконує його функції (наприклад, мікрофон).

Звук – коливальний рух частинок пружного середовища, що поширюється у вигляді хвиль у газі, рідині чи твердому тілі. У вузькому значенні терміном звук визначають коливання, які сприймаються органами чуття людини. В цьому випадку маються на увазі збурення, що поширюються в повітрі. Органи слуху людини сприймають звуки у відносно вузькому частотному діапазоні (~20 Гц – 20 кГц). Слуховий апарат багатьох тварин сприймає звуки в значно ширшому інтервалі частот. (Герц (названа на честь Генріха Герца) – (позначається Гц, Hz) – одиниця виміру в СІ частоти періодичних процесів (коливань), назва якої походить від імені німецького фізика Генріха Герца, першовідкривача електромагнітного випромінювання. Герц дорівнює одному коливанню (періоду) на секунду: $1 \text{ Гц} = 1 \text{ с}^{-1}$. $1 \text{ кГц (кілогерц)} = 10^3 \text{ Гц}$; $1 \text{ МГц (мегагерц)} = 10^6 \text{ Гц}$).

В загальному випадку терміном звук визначається процес поширення збурень в різних за фізичними властивостями середовищах, в яких відновлювальною силою, що намагається повернути збурену частинку в положення рівноваги, є сила пружності. Хвильові збурення, що визначаються як звук є об'єктивною реальністю та існують незалежно від сприйняття їх будь якими живими істотами. Більшість явищ у природі супро-

воджуються характерними звуками, які сприймаються та розпізнаються вухом людини і тварин і служать для орієнтування та спілкування. Специфіка сприйняття коливальних рухів частинок повітря слуховим апаратом людини зумовлює поділ звуків на приємні, гармонійні (звуки мови, музикальні звуки, спів пташок, наприклад) та звуки зі специфічним спектральним наповненням, часто небажані та дратуючі, які визначаються як шум.

Зміщення в просторі частинок середовища в звукових збуреннях характеризується такою величиною як амплітуда коливань. Для опису змін стану частинок середовища в часі використовується така характеристика як частота. Збурення, що сприймаються органами слуху людини та різних тварин це лише невелика частка збурень, що можуть існувати в навколишньому світі. Людське вухо може сприймати лише звуки в певних обмежених інтервалах частот та амплітуд. Для багатьох випадків практичного використання звуків велике значення мають звуки, в яких основна частина енергії зосереджена в області частот, що не сприймаються людським вухом. В зв'язку з цим окремо виділяють такі особливі типи збурень, як ультразвук та інфразвук.

2. Класифікація звуків

За частотними характеристиками акустичної хвилі розрізняють:

1) простий тон – синусоїдні коливання. Звукові коливання простого тону в достатньо хорошому наближенні випромінюють звукові генератори і камертон.

2) складний тон:

а) гармонічний – визначеної звуковисотності, що складається з основного тону та обертонів. Звуки такого спектрального складу дають музичні інструменти. Тембр звуку, тобто співвідношення обертонів та основного тону надає кожному музичному інструменту своє характерне звучання.

б) негармонічний – приблизно визначеної звуковисотності, що складається з основного тону та негармонічних обертонів.

3) шум:

а) білий шум – хаотичні коливання, спектральні складові розміщуються рівномірно по всьому діапазону;

б) кольоровий шум – хаотичні коливання, спектральні складові розміщуються нерівномірно по всьому діапазону, як правило, з поступовим зменшенням інтенсивності від низьких до високих частот.

Доцільно розглянути визначені види докладніше.

1. Простий або, як ще його називають, «чистий» тон виникає в результаті простого гармонійного коливання. Уявімо матеріальну точку M , що лежить на середині струни AB , натягнутою між двома опорами (рис. 3.1).

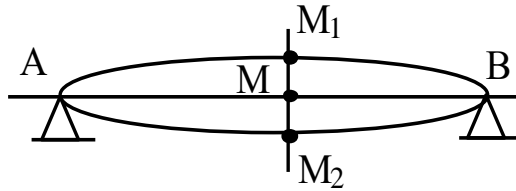


Рис. 3.1. Коливання матеріальної точки M , взятої на середині струни AB : MM_1 – амплітуда коливання; M_1M_2 – «розмах» коливання

Нехай коливання струни збуджуються за допомогою удару або щипка, здійсненого в точці M . Якщо струна досить довга і натягнута не надто сильно, то рухи точки M візуально видно досить чітко. Саме такий рух називають коливальним рухом, або просто коливанням.

Доцільно розглянути, що характерне для такого коливання.

А. «Розмах» точки M , що коливається. Під цим терміном розуміється відстань між двома крайніми положеннями M_1 і M_2 , в яких поперемінно знаходиться точка M під час свого руху.

В акустиці замість слова «розмах» вважають за краще користуватися терміном амплітуда коливання. Амплітудою називається найбільша відстань, на яку відхиляється точка M , що коливається, від свого середнього положення. Середнім положенням вважається таке положення точки M , у якому перебуває у стані спокою, тобто, коли струна не коливається. Очевидно, що розмах коливання дорівнює подвоєній амплітуді. Позначається амплітуда літерою A і має розмірність довжини. Від величини амплітуди залежить сила звуку, що утворюється внаслідок коливань. Це відомо кожному, хто пробував збуджувати струну щипком: чим сильніший щипок, тим амплітуда коливань струни більше, а звук, що виникає, сильніше.

В. Число здійснених струною коливань в одиницю часу – секунду.

Число повних коливань, що здійснюються в 1 с, називається частотою коливань і позначається буквою f . Одиницею її виміру служить герц (про що вже йшлося раніше). Розмірність цієї одиниці: s^{-1} . Висота музичного звуку визначається частотою коливань.

Час, протягом якого струна та точка M на ній здійснюють одне повне коливання, називають періодом коливань. Період коливань позначається буквою T і вимірюється в секундах. При цьому під одним повним коливанням розуміють проходження точкою M струни відстаней від положення рівноваги, вгору до точки M_1 , далі вниз, до положення

рівноваги, потім вниз до крайнього нижнього положення до точки M_2 і знову вгору, до середнього положення рівноваги.

Отже, за один період точка M проходить відстань, що дорівнює чотирьом амплітудам.

Між періодом і частотою коливань існує зворотна залежність, що виражається формулами:

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{або} \quad T = \frac{1}{f}$$

З визначеного можна зробити висновок, що положення точки M , що коливається, є залежним від даного моменту часу. Інакше висловлюючись, відстані точки M від положення рівноваги функціонально пов'язані з часом.

Відстань від положення рівноваги точки, що коливається, в кожен даний момент часу будемо називати відхиленням і позначати буквою y . Ця величина має розмірність довжини.

Неважко зрозуміти, що $y_{\max} = A$. Тому амплітуди коливання можна визначити як максимальне відхилення точки, що коливається від положення рівноваги.

Отже, відхилення є функція від часу, тобто $y = y(t)$.

2. Складні звукові коливання виникають у двох випадках:

1) як результат складного коливання однієї матеріальної точки (тіла), що бере участь одночасно у кількох простих гармонійних коливаннях;

2) як наслідок складання простих гармонійних коливань, створюваних одночасно декількома матеріальними точками (тілами).

В обох випадках використовується так званий принцип суперпозиції, згідно з яким в результаті додавання декількох гармонійних коливань виходить складне сумарне коливання з власною частотою (періодом), амплітудою та початковою фазою. Йдеться про зміну тиску повітря Δp , що створюється в даній точці простору двома не дуже сильними джерелами звуку (наприклад, двома камертонами). Досвід вказує, що Δp практично дорівнює в кожній миті просто сумі тих змін тиску Δp_1 і Δp_2 , які створювало б кожне джерело окремо: $\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2$.

Розглянемо чотири найважливіші випадки, що мають практичне значення для музичної акустики:

1) додавання двох гармонійних синусоїдальних коливань, що здійснюються в однаковому напрямку і мають однакові частоти, але різні амплітуди та початкові фази;

Одним з окремих випадків додавання в акустиці прийнято назвати випадком повної інтерференції, коли два коливання, що додаються, дають тишу.

2) додавання двох синусоїдальних коливань, що здійснюються в однаковому напрямку з неоднаковими частотами ω_1 і ω_2 різними амплітудами A_1 і A_2 , що незначно відрізняються один від одного;

Цей випадок, відрізняється від першого, крім відмінності в частотах обох коливань ω_1 і ω_2 , що складаються, ще й тим, що величини початкових фаз тут немає сенсу вказувати. Оскільки періоди коливань різні протягом усього процесу обох коливань, початкові фази можуть збігатися, то розходитися, і постійної різниці фаз, як це було в 1-му випадку додавання, не існує.

3) додавання двох гармонійних коливань однакової частоти, з різними амплітудами та початковими фазами, що відбуваються у взаємно перпендикулярних напрямках;

Якщо в 1-му і 2-му випадках в результаті додавання виходило сумарне коливання, що відбувається в тому ж напрямку, що і складові коливання, то тепер, коли коливання, що складаються, відбуваються у взаємно перпендикулярних напрямках (тобто одне коливання відбувається по осі x , а інше – по осі y), питання про сумарне коливання набуває іншого характеру. Траєкторія руху має вигляд еліпса, якщо частоти обох коливань збігаються, і більш складний вид кривої, коли частоти обох коливань знаходяться в якомусь відношенні (наприклад, 1:2; 1:3 тощо). Французькому вченому Ліссажу акустика зобов'язана дослідженням різних форм траєкторій (фігур Ліссажу), що утворюються при різних частотах ω_1 і ω_2 складених коливань. На рис. 3.2. показані деякі різновиди цих фігур. Спосіб розшифровки фігур для визначення відношення частот ω_1/ω_2 , запропонований самим Ліссажу, вкрай простий. Потрібно поставити вістря олівця в якусь точку фігури і обвести фігуру, не відриваючи при цьому олівця. При обведенні порахувати, скільки рухів по вертикалі і по горизонталі зроблено рукою, що веде олівець.

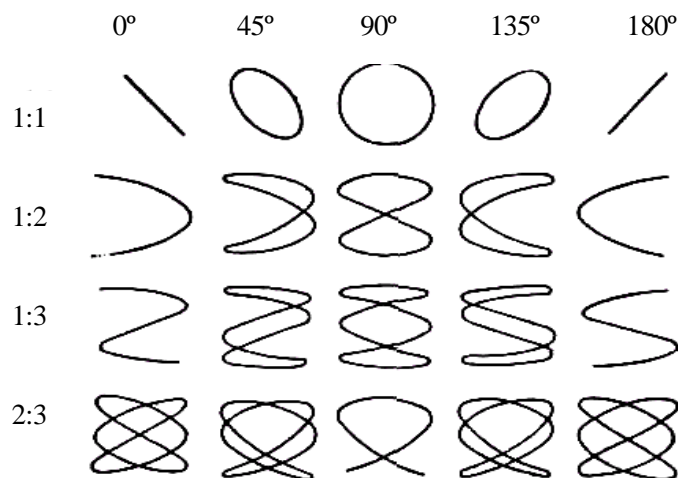


Рис. 3.2. Фігури Ліссажу

4) складання однаково спрямованих гармонійних коливань з різними амплітудами та різними початковими фазами та кратними частотами.

Наприклад, $\omega_1 : \omega_2 = 2:1$, $\omega_1 : \omega_2 = 3:1$, $\omega_1 : \omega_2 = 4:1$ тощо. В результаті складання зазначених коливань виходить несинусоїдальне коливання, частота якого визначається частотою найповільнішого з коливань, тобто що відбувається з мінімальною частотою.

Додавання трьох, чотирьох і більше коливань з кратними частотами та різними амплітудами ще більше ускладнює форму кривої сумарного коливання. Отже, і звукові коливання, що створюються музичними інструментами, мають дуже складну форму, як це видно на осцилограмі звукових коливань (залежності амплітуди коливань від часу), наприклад, роялю (рис. 3.3.). Прості гармонійні коливання, що входять до складу складного коливання, називатимемо гармоніками.



Рис. 3.3. Осцилограма звукових коливань, створюваних роялем

При описі звукових полів використовують такі фізичні характеристики, як частота, довжина хвилі, амплітуда, швидкість звуку, тиск та швидкість частинок середовища. У зв'язку з особливістю руху частинок середовища при поширенні звукових хвиль цю швидкість називають коливальною швидкістю. Коли мова йде про сприйняття звуків людиною використовують так звані фізіологічні характеристики звуку: тембр, гучність, висота тону. Середньостатистична людина чує

коливання, передані по повітрю, у діапазоні частот від 20 Гц до 20 кГц. Звук нижче діапазону чутності людини називають інфразвуком; вище: до 1 ГГц, – ультразвуком, від 1 ГГц – гіперзвуком. Представники тваринного світу здатні сприймати звуки в значно ширшому діапазоні частот. Кажани для орієнтації та знаходження здобичі використовують звуки в діапазоні 20 – 120 кГц. Дельфіни, наприклад, використовують для орієнтації та полювання звуки з частотою понад 100 кГц. Значно вищі 20 кГц частоти здатні сприймати і собаки.



Рис. 3.4. Частотні діапазони звуків, які сприймають деякі тварини

Серед вловимих звуків варто особливо виділити фонетичні, мовні звуки й фонем (з яких складається усне мовлення) і музичні звуки (з яких складається музика).

3. Властивості звуків

Важливою характеристикою звуку є його спектр, що отримується в результаті розкладання звуку на прості гармонічні коливання (так званий частотний звуку аналіз). Спектр буває суцільним, коли енергія звукових коливань безперервно розподілена в більш-менш широкому діапазоні частот, і лінійчастий, коли є сукупність дискретних (перериваних) частотних складових. Звук із суцільним спектром сприймається як шум, наприклад шелест дерев під вітром, звуки працюючих механізмів. Лінійчастим спектром з кратними частотами володіють музичні звуки; основна частота визначає при цьому сприйману на слух висоту звуку, а набір гармонійних складових – тембр звуку. В спектрі звуку мови є форманти – стійкі групи частотних складових, відповідні певним фонетичним елементам. Енергетичною характеристикою звукових коливань є інтенсивність звуку – енергія, що переноситься звуковою хвилею через одиницю поверхні, перпендикулярно напрямку поширення хвилі, в

одиницю часу. Інтенсивність звуку залежить від амплітуди, звукового тиску, а також від властивостей самого середовища і від форми хвилі. Суб'єктивної характеристикою звуку, пов'язаної з його інтенсивністю, є гучність звуку, що залежить від амплітуди і частоти. Найбільшою чутливістю людське вухо володіє в діапазоні частот 1-5 кГц. У цій зоні поріг чутності, тобто інтенсивність найслабкіших чутних звуків, своєю чергою величини дорівнює 10^{-12} мв / м², а відповідний звуковий тиск – 10^{-5} н / м². Верхня по інтенсивності межа зони сприймаються людським вухом характеризується порогом больового відчуття, слабо залежать від частоти в чутному діапазоні і рівним приблизно 10^{-1} мв / м². У ультразвукової техніки досягаються значно більші інтенсивності (до 10^4 кв / м²).

Суб'єктивні особливості сприйняття звуку людиною дозволяє виділити такі властивості музичного звуку:

1) висота (звуквисотність) – залежить від частоти коливань; залежно від частоти коливань виокремлюють звуки:

- а) низькочастотні – з малим числом коливань (не вище 300 Гц);
- б) середньочастотні – звуки, що коливаються з частотою 300-3000 Гц;
- в) високочастотні – з числом коливань, що перевищує 3 000 Гц.

2) тембр – залежить від форми звукової хвилі;

3) гучність – залежить від амплітуди звукової хвилі; у музичній теорії для позначення сили звуку, з якою необхідно відтворювати композицію, використовується градація: forte-fortissimo; fortissimo; forte; mezzo forte; mezzo piano; piano; pianissimo; piano-pianissimo;

4) тривалість – залежить від часу між початком і завершенням звучання; музичний звук триває від 0,015-0,02 с. до декількох хвилин.

Розрізняють поздовжні й поперечні звукові хвилі залежно від співвідношення напрямку поширення хвилі й напрямку механічних коливань часток середовища поширення.

Табл. 3.1

Порівняльна таблиця гучності

fff	forte-fortissimo – найбільш гучно	100 фон	88 сон
ff	fortissimo – дуже гучно	90 фон	38 сон
f	forte – гучно	80 фон	17,1 сон
p	piano – тихо	50 фон	2,2 сон
pp	pianissimo – дуже тихо	40 фон	0,98 сон
ppp	piano-pianissimo – найбільш тихо	30 фон	0,36 сон

Лекція 4

ГУЧНІСТЬ ТА ДИНАМІКА ЗВУКУ

1. Інтенсивність звуку.

2. Гучність звуку.

3. Динаміка звуку.

1. Інтенсивність звуку

Так називають енергію, яка переноситься звуковою хвилею за проміжок часу через будь-яку поверхню. Від інтенсивності безпосередньо залежить інша характеристика – гучність. Її визначає амплітуда коливання в звуковому полі. Щодо сприйняття людськими органами слуху виділяють поріг чутності – мінімальну інтенсивність, доступну для сприйняття людиною. Межа, за яким вухо не може сприймати інтенсивність звукової хвилі без больових відчуттів, називається порогом больового відчуття. Також він залежить від звукової частоти.

Існує два основних способи вимірювання рівнів звуку: піки та RMS (Root Mean Square). Пік вимірює високий рівень (з урахуванням короткочасних), тоді як RMS визначає середній рівень. RMS більш тісно корелює нашому слуху. Наприклад, удар барабана має високе пікове значення, але стійкий акорд з високим середнім значенням – суб'єктивно звучатиме голосніше, навіть якщо його пік не буде близьким до ударних інструментів.

Для того, щоб об'єктивніше вимірювати гучність було запроваджено стандарт EBU R128 та специфікацію під назвою Loudness Units (К-зважена гучність щодо повної цифрової шкали) – LKFS. LUFS (Loudness Units Full Scale) означає повну шкалу гучності, яка посилається на одиниці гучності на повну шкалу (тобто максимальний рівень, який система може обробляти). Історично спочатку Міжнародна телекомунікаційна спілка у своїх рекомендаціях BS.1770-1 визначала поняття LKFS. Потім Європейський мовний союз ввів поняття LUFS, яке відрізнялося наявністю гейтування (ігнорування фрагментів аудіофайлу з гучністю менше -70 LUFS) в алгоритмі і не мало недоліку LKFS (заниження гучності фонограми, в якій багато фрагментів з тишею). В останній редакції BS.1770-3 алгоритм LKFS був модифікований відповідно до LUFS, проте термін LKFS не ліквідували. Таким чином, зараз LUFS і LKFS означають те саме.

Loudness Unit (одиниці гучності) – одиниця виміру, яка використовується в процесі кількісного визначення гучності музики, що

сприймається, аналізуючи середній рівень з часом. Теоретично, два музичні твори, які реєструють ідентичні показники LUFS, мають звучати так, ніби вони знаходяться на одному рівні, і на практиці вони дійсно звучать так, ніби вони знаходяться на одному рівні, незалежно від того, які показують пікові чи RMS значення. Значення – це негативне число, наприклад, -6 LUFS, -10 LUFS, -13 LUFS тощо, оскільки відносяться до повної шкали. Що менше негативне значення, то вище середній рівень.

Для широкомовної передачі рекомендований стандарт становить -23 LUFS – але це відрізняється від майстерингу музики для відтворення. Для інтернет-ресурсів ці показники вищі: iTunes -16 LUFS, YouTube -13 LUFS. Для клубних треків, зазвичай, встановлюється значно більш високий середній рівень (наприклад, -6 – -8 LUFS), оскільки для цих стилів немає стандартного рівня.

Без відповідності LUFS нижчий сигнал звучить набагато гучніше. При порівнянні LUFS навіть форми сигналів, які відрізняються один від одного, мають однаковий видимий рівень.

2. Гучність звуку

Будь-яка звукова хвиля, що поширюється в просторі, створює на перешкоди, що зустрічаються на її шляху, якийсь тиск (у тому числі й на наші барабанні перетинки). Люди, які відвідували рок-концерти і стояли поблизу потужних колонок на собі відчули, що він може бути й дуже сильним. Можна піднести долоню до будь якого динаміку під час програвання гучної музики і обов'язково відчуєш удари повітря. Ми суб'єктивно сприймаємо зміну тиску звукових хвиль у вигляді відчуття зміни гучності звуку. Максимальна зміна тиску в повітрі під час поширення звукових хвиль порівняно з тиском за відсутності хвиль називається звуковим тиском. Як і будь-який інший, звуковий тиск вимірюється в Паскалях (Па).

Але в акустиці, під час оцінки інтенсивності звукових хвиль частіше застосовується інше поняття – сила звуку. Воно відображає потік звукової енергії, який щосекунди проходить через квадратний сантиметр умовної площини, розташованої перпендикулярно напрямку поширення хвилі. Звуковий тиск і сила звуку перебувають у квадратичній залежності. Тобто, сила звуку дорівнює звуковий тиск у квадраті. Сила звуку описує енергетичні властивості самої хвилі й вимірюється у ватах/квадратний сантиметр (Вт/см^2). Така одиниця дуже зручна під час деяких розрахунків, що є єдиною причиною її введення.

Для того, щоб ми змогли почути той або інший звук, його сила має бути більша за певний рівень. Цей рівень називається порогом чутності. Тобто, якщо звукова хвиля має малу інтенсивність – нижче цього порога, ми просто не сприймаємо її, і нам здається, що навколо панує повна тиша, хоча насправді повітря навколо коливається. Так само і зі звуками великої інтенсивності – ми чуємо звук тільки до певного рівня, що називається больовим порогом.

У більшості вимірів, що зустрічаються в роботі звукорежисера, доводиться зіштовхуватися з дуже цікавим ефектом: усе змінюється не на скільки-то одиниць, а у скільки-то разів. Скажімо, діапазону в одну октаву відповідає зміна частоти у два рази. Те саме можна сказати й про рівні звуку. Визначення гучності звуку засновано на психофізичному законі, установленому в 1846 році Э.-Г. Вебером, що заклав основи «психометрії», тобто кількісних вимірів відчуттів. Оскільки відчуття є суб'єктивним процесом, то абсолютні виміри сили відчуттів неможливі, і Вебер переніс проблему в область виміру відносних величин та шукав мінімальні розходження у відчуттях, які можна зафіксувати. Суть закону Вебера полягає в тому, що чутливість вуха людини до звуку змінюється, як логарифм інтенсивності звуку. Аналогічні співвідношення були встановлені Е.-Г. Вебером і Г.-Т. Фехнером і для інших відчуттів, що даються органами почуттів людини, – дотику й зору.

Наш слуховий апарат влаштований таким чином, що лінійна зміна сили звуку (або звукового тиску) не сприймається нами як лінійна зміна гучності. Така залежність називається логарифмічною, і саме через таку особливість нашого сприйняття зміна рівня (гучності) звуку прийнято вимірювати в логарифмічних одиницях – белах(Б).

Зміна рівня звуку в один бел однаково відображає й зміну сили звуку, і зміну звукового тиску.

Мінімальний перепад рівня, що здатне сприйняти наше вухо, дорівнює одному децибелу. Це одна з головних причин введення такої системи виміру рівня. А весь динамічний діапазон слуху становить 120 дБ. Зміна рівня звуку зазвичай оцінюється в децибелах щодо порога чутності. Коли йдеться, що рівень звуку в акустичних системах дорівнює ста децибелам, мають на увазі, що акустичні системи працюють на рівні, що перевищує поріг чутності на 100 дБ.

3. Динаміка звуку

Уявімо собі якесь геометрично правильне тіло у формі еліпса, яке може змінюватися вертикально і горизонтально. Припустимо також, що

на еліпсовидне тіло діють сили, спрямовані на зміну його форми в сторону прямокутника.

Якщо цей процес зміни форми зупиняти через певні інтервали, щоб зафіксувати фази змін, то можна простежити перехід округлих форм до прямокутних. Динаміка переходу з однієї форми в іншу буде виражена в плавності зміни просторових форм від дугоподібних до плоских, від окружності до прямокутника.

Змінювати геометрію форми можна і в зворотному порядку, тобто від прямокутника до еліпсу, але незмінним залишиться динамічна сутність цієї дії. В основі її лежатиме пластика переходів від однієї форми до іншої.

Але уявімо далі, що плавність переходів від однієї форми до іншої порушилася: ми почали простежувати не всі дії, пов'язані зі зміною форми від початку до кінця, а лише розглядати з безлічі деякі фази цієї зміни, взяті ізольовано одну від одної (рис. 4.1.).



Рис. 4.1. Фази зміни форми

Вийшла різноманітність форм, відмінних одна від одної гостротою кутів (Рис. 4.1, № 1, № 2, № 3).

В утворенні музичних звуків спостерігається деяка схожість. Так, під дією сили – удару, натиску медіатора, вдування повітря, щипка, руху міху тощо – створюються музичні звуки. Різноманіття прийомів в кожному з названих способів докладання зусиль виробляє пропорційну множину звукових утворень.

І якщо з багатьох геометричних фігур ми обираємо потрібну нам форму зорово, то звук в музиці – слухом; якщо при аналізі геометричних фігур ми користуємося зоровим методом (ця фігура більш округла, а ця має більш гострі кути), то при аналізі музичних звуків використовуємо слуховий метод порівняння (цей звук: м'якше, різкіше, «глибокий», «плаский» тощо). В одному у разі ми бачимо, в іншому – чуємо, але в обох випадках – відчуваємо.

В основі утворення форм, як геометричних, так і звукових, лежать певні дії: в одних випадках дії пов'язані з рухом олівця, в інших – з рухом міху, клавіші, медіатора, повітря тощо. Сила удару, швидкість і характер руху майже на всіх музичних інструментах пов'язані з діями рук, пальців тощо.

Від синхронності цих рухів залежить якість звуку, яке графічно можна виразити в кількості. Зобразивши за допомогою малюнка (Рис.4.2) динамічну структуру тону, уявімо звучання його складових частин – атаки (початку звуку), середини, закінчення.

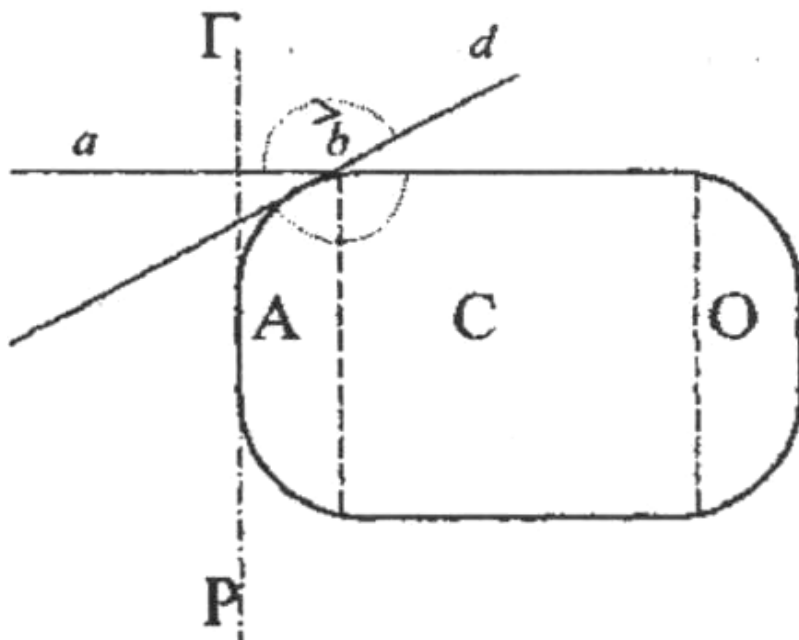


Рис. 4.2. Динамічна структура музичного (висотного) звуку, де:
ГР – грань переходу від тиші до звучання; А – атака (початок звуку);
С - середина; О – закінчення; > – акцент, що виражає завершення
атаки; abd – кут атаки, що виражає кількісну нестабільність
якості звуку

Такі пропорції звуку, коли атака і закінчення мають дзеркально однакові форми, можна вважати ідеальними.

Однак навіть при ідеальних пропорціях звуку незмінною залишається функціональна залежність різних змінних величин: зі збільшенням або зменшенням швидкості синхронного руху міху і пальцю одночасно збільшиться чи зменшиться тривалість атаки, зі зміною тривалості атаки змінюються форми серединної частини і закінчення звуку. Таким чином, змінні величини звуку – атака, середина і закінчення – знаходяться в постійному русі. Такі процеси, пов'язані зі зміною динамічної структури звуку в часі, прийнято називати перехідними процесами.

З огляду на залежність змінних величин при звукоутворенні найбільш важливими компонентами при визначенні якості звуку можна вважати:

- 1) поєднання атаки, серединних процесів і закінчення (рис.4.3);
- 2) тривалість атаки;
- 3) завершення атаки, виражене динамічним акцентом.

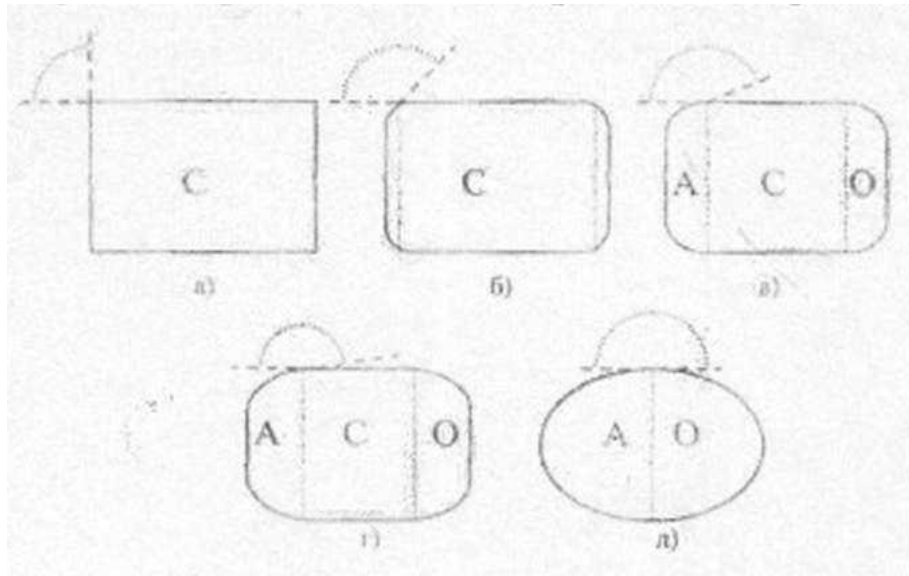


Рис. 4.3. Динаміка перехідних процесів у звуці, де:

- а) початок і завершення атаки співпали за часом з початком серединної частини звуку; б, в, г) залежність атаки, середини і закінчення звуку в різних фазах перехідних процесів; д) атака перейшла в філіроване закінчення**

Може, однак, виникнути такий стан звуку, коли акцент, що виражає завершення атаки, виникне на межі завершення атаки і початку закінчення звуку (рис.4.3 - д): атака перейшла в закінчення, такий звук не матиме серединної частини. Протилежним цьому стану звуку буде такий, коли акцент виникне в момент злиття початку та завершення атаки (рис.4.3 - а): не буде філірованого закінчення.

Рухливість всіх компонентів в структурі звуку підводить нас до висновку, що від початку звуку (атаки) залежать його серединна частина і закінчення. До того ж, чинники «середина» і «закінчення» не завжди присутні в звуці, а, отже, і не можуть бути головними при оцінці якості звуку. Головним є атака.

Лекція 5

ТЕОРІЯ ЗВУКОВИСОТНОСТІ ТА ТЕМБР

1. Теорія звуковисотності.
2. Тембр.
3. Визначення тембру у історичній ретроспективі.

1. Теорія звуковисотності

Якщо торкнутися струни скрипки, гітари або якогось іншого струнного інструмента – струна почне коливатися. Своїм коливанням вона збуджує навколишнє повітря, породжуючи звукові хвилі. Коли ці хвилі досягають нашого вуха, ми чуємо звук.

Звук можна видобути не тільки на струнних, а й на духових інструментах – флейті, трубі, сопілці, тощо. У духових інструментів роль пружного тіла виконують, головним чином, стовп повітря, що коливається всередині інструмента, а також губи виконавця. На баяні пружним тілом є мідна пластинка. На фортепіано джерелом звуків є натягнуті струни, по яких ударяють і молоточки, що приводяться в рух клавішами.

Музичний звук має такі властивості: висоту, силу (гучність), тривалість і тембр.

Висота звуку – суб'єктивна оцінка якості звуку. Залежить, головним чином, від частоти звукових коливань. Чим більше частота коливань, тим вище звук. Для звуків з неперіодичними коливаннями (шумів) визначення висоти звуку ускладнено.

У музичній практиці розрізняють звуки з визначеною висотою та невизначеною висотою. Висота звуку визначається частотою коливань основного тону (незалежно від амплітуди коливань складових) і фіксується як нота. Звуковисотна шкала поділяється на октави, октава поділяється на 12 півтонів. Звуковисотна шкала є логарифмічною – звуки, що відстоять один від одного на октаву зв'язані співвідношенням 1 : 2, звуки, що відстоять на півтону в темперованому строї зв'язані співвідношенням $1 : \sqrt[12]{2}$, тому арифметична різниця частот коливань сусідніх нот буде меншою в низькому регістрі й більшою у високому регістрі.

В музичній практиці для настройки музичних інструментів використовується камертон. Як правило використовуються камертони, що настроюють на звук «ля» першої октави, якій в сучасній музичній практиці відповідає частоті коливань основного тону 440 Гц. Цей стандарт іноді позначається як «А440». Проте в історії музики цей стандарт коливався в

значних межах. Наприклад, камертони, якими користувався Георг Фрідріх Гендель, датовані 1740 роком, настроювались як $A = 422.5 \text{ Hz}$, а пізніше, в 1780 році, як $A = 409 \text{ Hz}$., майже півтоном нижче. Деякі сучасні колективи використовують дещо інші стандарти звуковисотності, наприклад Нью-Йоркський філармонічний оркестр та Бостонський симфонічний оркестр використовують $A = 442 \text{ Hz}$.

Існують також транспонуючі інструменти, партії яких пишуться вище або нижче від їх реального звучання на певний інтервал. Наприклад, кларнет або труба, нота, позначена в нотах як «до», звучатиме як «сі-бемоль», тобто на тон нижче.

2. Тембр

Тембр (фр. *tembr*) – «забарвлення» звуку; одна з ознак музичного звуку, поряд з висотою, силою і тривалістю. За тембром можна розрізняти звуки однакової висоти і сили, виконані на різних інструментах, різними голосами або видобуті різними способами чи штрихами. Тембр залежить від форми коливань, джерела звуку і визначається кількістю та інтенсивністю обертонів, що утворюють гармонічний ряд.

Тембр співацького голосу залежить від наявності в його спектрі відповідних формант, а також вібрато. Певною мірою на тембр впливають спосіб звуковидобування, форма резонаторів, а також акустичні якості середовища, у якому виникає і поширюється звук. Тембр і його зміни є важливим засобом музичної виразності. Особливим напрямком застосування тембру є сонорика.

Сонорика, сонорна техніка (нім. *Sonorismus*, англ. *Sonorism*; від лат. *Sonorus* – дзвінкий, звучний) – техніка сучасної музичної композиції, що оперує тембровозвучностями як такими, на їхню специфічним іманентною закономірностям. Автори сонорної композиції трактують групу з безлічі звуків як єдиний колористичний і / або експресивний комплекс – сонор (термін Ю. Н. Холопова). У Сонора, на відміну від акорду, слух людини не диференціює окремі елементи звуковисотної структури. Типовий приклад сонора - Кластер (від англ. *Cluster* – гроно) в музиці – співзвуччя зі звуків, тісно розташованих по малим і / або великим секундам, іноді по мікроінтервалам. Термін Г. Коуелла.

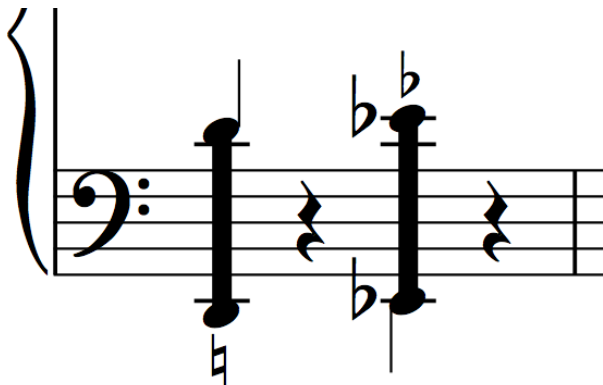


Рис. 5.1. Позначення сонора

3. Визначення тембру у історичній ретроспективі

Формулювання визначення поняття «тембр» є вкрай складним завданням через його багатовимірність і багатоаспектність.

Цю ситуацію визначає Ірина Алдошина: «Найскладнішим суб'єктивно відчутним параметром є тембр. З визначенням цього терміна виникають складності, зіставні з визначенням поняття «життя»: всі розуміють, що це таке, однак над науковим визначенням наука б'ється вже кілька століть. Аналогічно з терміном «тембр»: всім ясно, про що йде мова, коли говорять «красивий тембр голосу», «глухий тембр інструменту» тощо. Про тембр не можна сказати «Більше – менше», «вище – нижче», для його опису використовуються десятки слів: сухий, дзвінкий, м'який, різкий, яскравий тощо».

Ще однією проблемою при визначенні тембру в музичній науці стає його відносна «внутрішня» варіантність. Це, зокрема, широкий спектр тембру (з урахуванням динаміки, артикуляції і регістра) у кожного інструмента: наприклад, у скрипки – *détaché*, *pizzicato*, *ricochét* тощо, не кажучи вже про *col legno*, грою за підставкою тощо. Разом з тим, Ірина Алдошина досить точно помічає: «Тембр володіє достатньою інваріантністю (стабільністю), що дозволяє зберегти його в пам'яті, а також служить для порівняння його вмісту з новою інформацією про джерело звуку, що надійшла у слухову систему. Це передбачає певний процес навчання – якщо людина ніколи не чула звучання інструменту даного тембру, то він його і не впізнає».

При настільки різноманітних проявах тембру доцільно розрізняти «акустичне» і «музикознавче» визначення тембру. «Акустичне» має пояснити акустичну специфіку тембру і задовольнити акустиків, психоакустиків і служити основою, «не суперечити» «музикознавчому». Це виправдовується «фонологічним» підходом, коли «акустичне» визначення співвідносно з фонетикою (власне проголошенням), а «музикознавче» – з

фонологією (змістом цього виголошення). Адже багато «технічних», в тому числі виконавських моментів, важливих для акустичних досліджень, стають периферійними для музикознавчих робіт. Визначення тембру в акустиці і психоакустиці хоча дискутується і постійно уточнюється професіоналами, саме як «акустичне» представляється досить зручним і «робочим» для музикознавства. Так, Л. Кузнецов в праці «Акустика музичних інструментів» вказує: «Тембр – це суб'єктивна характеристика якості звуку, завдяки якій звуки однієї і тієї ж висоти, і інтенсивності можна відрізнити один від одного». І. Алдошина зазначає, що «американський стандарт ANSI60 дає таке визначення: «Тембр – атрибут слухового сприйняття, який дозволяє слухачеві судити, що два звуки, що мають однакову висоту і гучність, відрізняються один від одного». У колективній монографії «Музична акустика» вказується, що «тембром або забарвленням звуку називається відображення в нашій свідомості складу звуку».

І. Алдошина і Р. Прітс в монографії «Музична акустика» акцентують три головні проблеми сучасної акустики: виникнення звуку, передача звуку від джерела до слухача, сприйняття звуку і зв'язок слухових відчуттів з об'єктивними параметрами звуку. Автори помічають, що дані проблеми співвідносяться з акустикою музичних інструментів, архітектурною акустикою і психоакустикою.

У цій тріаді питання тембру стають найбільш актуальними у власне музичній акустиці і музичної психоакустиці. Сьогодні найбільш інтенсивне просування в вивчення тембру відбувається в музичній психоакустиці, особливо в області, пов'язаній з електронною музикою. Саме пошуки в електронній і потім в електроакустичній музиці стали потужним стимулом для комп'ютерного вивчення природи тембру. Практичні завдання, висунуті композиторами в кінці 50-х-початку 60-х років в галузі електронного синтезу, поставили питання виявлення об'єктивних і суб'єктивних параметрів звуку, а значить, і тембру, в ряд актуальних проблем психоакустики і музичної акустики. При природній релевантності «акустичного» і «музикознавчого» визначень тембру, «музикознавче» визначення має прояснити специфіку вживання тембру в музичному творі, пояснити його функціонування як елемента музичної мови, проакцентувати комплексний характер і взаємодію з іншими засобами.

Суперечливі і підходи музикознавців до «музикознавчого» розуміння тембру. Ю. Рагс підкреслює, що «уявлення про тембр музичного звуку не так вже просто, як могло б здатися. В композиторській та виконавській практиці давно відомо, що все, що пов'язане з забарвленням звуку, з його тембром, – надзвичайно складно». На думку

А. Сохора, «важко створити (і сприйняти) зв'язне, логічне чергування тембрів ... , тембри індивідуальні і тому погано піддаються порівнянню, «упорядкуванню» і об'єднанню в часі. Тому не можна говорити і про темброву шкалу». Л. Мазель зазначає: «Дійсно, тембри – якісно різноманітні, але допускають швидше описові характеристики, ніж кількісні порівняння і – тим більше – точні вимірювання».

Розуміння тембру як комплексного поняття, спрямованого на злиття всіх компонентів в слуховий суті, представлено визначенні Жана Ноель ван дер Вейда в його книзі «Музика ХХ століття»: «Тембр – комплексне поняття (часто визначається як сукупність трьох параметрів: висоти, тривалості, інтенсивності), яке спрямоване на злиття звучання всіх компонентів в слуховий суті. Тембр позначає звукове джерело, реальне або віртуальне». Звісно ж, що визначення тембру буде неповним, якщо не враховувати аспект музичної мови, адже сама композиторська практика показала, що тембр є одним з параметрів, який забезпечує відмінність (несхожість) елементів музичної мови. В цьому ракурсі слід підкреслити, що темброве «фарбування» фонем і морфем забезпечує структурну визначеність мотивів і фраз – тобто своєю подібністю (або навпаки, контрастом) тембр посилює (або розділяє) однаковість синтагм. Відповідність тембру і мотиву (фрази) стає основою для фонологічних елементів музичної мови.

З точки зору музичної мови основне призначення тембру – забезпечення цілісності (за рахунок злиття / поділу) всіх елементів музичної мови в конкретному втіленні музичного матеріалу. При всій складності взаємодії музичної мови, саме в мові музичний матеріал (все мінус тембр), через тембр, знаходить своє проголошення. В аспекті мови найбільш яскраво проявляється подвійна природа тембру. З одного боку, він функціонує як повноцінний елемент музичної мови, як самостійна лексема. З іншого, за рахунок нерозривного злиття зі звуковусотністю, динамікою, артикуляцією, виступає як параметр елементів музичної мови.

Таким чином, музикознавчі визначення тембру можна сформулювати як об'єктивний спектр звучання, виявляється як елемент музичної мови, який спрямований на інструментальне (вокальне) втілення звуку в музичній мові і спрямований на злиття фонічних, колористичних, фактурних, тематичних, композиційних і смислових компонентів в їх художньо-акустичної цілісності.

А ідентифікатором, мабуть, при цьому служить «акустичне» розуміння, яке фокусується в уже приведеній цитаті Л. Кузнецова, – «суб'єктивна характеристика якості звуку, завдяки якій звуки однієї і тієї

ж висоти і інтенсивності можна відрізнити один від одного», тобто те, що ми назвали «акустичним» визначенням тембру.

Таким чином, можна підпорядкувати «акустичне» і «музикознавче» визначення тембру. «Акустичне» завжди буде ширше, а «музикознавче» – більш точним і «працюючим» в музичній науці. Музикознавче визначення тембру крім важливості власне для теорії тембру має величезне значення для понятійного апарату музикознавства та професійного музичного спілкування, дозволяючи конкретизувати фонічну, фонологічну і артикуляційну сторони музичного твору і його виконання. Ф. Манурі справедливо зауважує: «Один з найбільш вражаючих парадоксів, пов'язаних з тембром, полягає в тому, що, чим менше ми про нього знаємо, тим менше він ставить перед нами проблем. Засоби, що дозволяють його контролювати і аналізувати, стають усе більш точними, вдалі дефініції, здається, лише віддаляють його природу».

Лекція 6

АКУСТИКА ПРИМІЩЕНЬ

- 1. Акустика приміщень. Відбиття та поглинання звуку.**
- 2. Джерела шумового забруднення та їх вимірювання.**
- 3. Моделювання акустики.**

1. Акустика приміщень

Акустика приміщень – це підрозділ акустики, що вивчає поширення звукових хвиль в приміщенні, віддзеркалення і поглинання їх поверхнями, вплив відбитих хвиль на чутність і розбірливість мови і музики. Метою досліджень є створення прийомів проектування залів (театральних, концертних, лекційних, радіостудій тощо) із заздалегідь передбаченими умовами сприйняття звуків. В залежності від переважного типу звукових полів, що реалізуються в приміщенні (класична музика, естрадна музика, лекційні програми) в акустиці приміщень формуються рекомендації відносно форми приміщень та акустичних властивостей поверхонь для забезпечення високої якості звучання.

У закритих приміщеннях більш-менш великого розміру слухач сприймає, крім прямого звуку, ще й ряд його запізнілих повторень, обумовлених відображеннями від обмежуючих поверхонь. Під час відбиття звуку, його енергія поглинається, кожен наступний повтор стає слабшим. За умови вимкнення джерела звуку, кількість відображеної енергії буде затухати до моменту її повного зникнення. Процес поступового затухання звуку називається реверберація. Тривалість реверберації є найважливішим чинником, що визначає акустичні якості залів. При надмірно повільному згасанні звучання мови і музики виявляється недостатньо чітким, при короткій реверберації мова звучить занадто глухо, а музичні звучання втрачають злитість і виразність. Навіть при оптимальному значенні часу реверберації акустичні властивості зали можуть дуже відрізнятися у різних її частинах через відмінність в шляхах, котрі проходять відображення від джерела звуку до слухача. Найбільш сприятливі умови різні не тільки для мови і музики, а й для музичних творів різного характеру (камерна, естрадна, симфонічна музика). Тому акустичне проектування концертних залів (вибір форми, розміщення слухачів, обробка обмежуючих поверхонь розсіюючими і поглинаючими конструкціями, застосування підвісних відбивачів тощо) нерідко вимагає

компромісних рішень. У залах великої місткості умови чутності можуть бути поліпшені застосуванням електроакустичних систем.

Коли звукова хвиля падає на перешкоду, одна частина звукової енергії поглинається перешкодою, інша – відбивається від перешкоди і третя – перевипромінюється перешкодою, створюючи ефект посилення і штучної реверберації. Поширення звуку в замкнутому просторі відбувається з таким принципом: Замкнутий простір → прямий звук + ранні відбиття + реверберація. (Відкритий простір → прямий звук).

Відображення звуку бувають:

а) Направлені (спрямовані). Розмір поверхні, від якої відображаються хвилі більше довжини хвилі, і ця поверхня гладка.

б) Розсіяні. Розмір поверхні, від якої відображаються хвилі або архітектурних членувань цієї поверхні співмірні з довжиною хвилі.

Розсіяні відображення завжди «корисні» для акустики залу. Направлені відображення збільшують інтенсивність прямого звуку, сприяючи поліпшенню чутності і розбірливості мови. (Недоліки направлених хвиль: утворення відлуння, утворення фокусних точок (від однієї і тієї ж поверхні в одну і ту ж точку приходять одні й ті ж звуки), «мертві зони»).

Дифракція звуку. Малі отвори і перешкоди (менше довжини хвилі) слугують вторинним джерелом, що розповсюджує напівсферичні хвилі.

Звук розсіюється, створюючи дифузність звукового поля, що є гарною акустичною умовою.

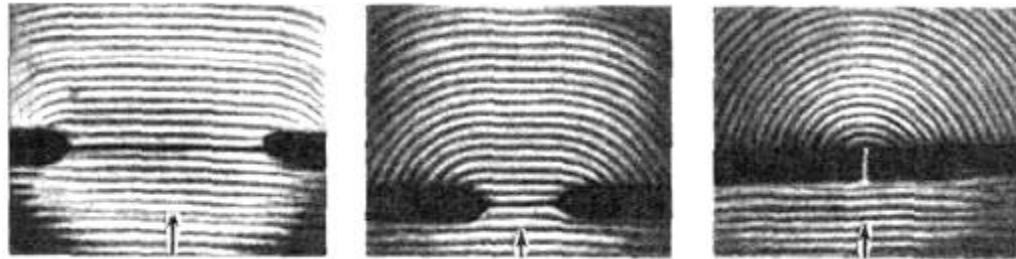


Рис. 6.1. Дифракція звукових хвиль

Коефіцієнт звукопоглинання залежить від матеріалу, його структури та частоти звуку.

$$\alpha = E_{\text{погл}} / E_{\text{пад}}, \text{ де}$$

α – коефіцієнт звукопоглинання; $E_{\text{погл}}$ – поглинута звукова хвиля; $E_{\text{пад}}$ – падаюча звукова хвиля;

$$E_{\text{погл}} = E_{\text{розс}} + E_{\text{прон}}, \text{ де}$$

$E_{\text{розс}}$ – звукова хвиля, розсіяна у матеріалі; $E_{\text{прон}}$ – звукова хвиля, що пройшла крізь матеріал.

За одиницю звукопоглинання умовно приймають звукопоглинання 1 м² відкритого вікна. Коефіцієнт звукопоглинання може змінюватися в межах від 0 до 1. При нульовому значенні звук повністю відображається, при повному звукопоглинанні коефіцієнт дорівнює одиниці.

Ефект звукопоглинання (ЕЗ) (загальна кількість звукопоглинання) = А (еквівалентна площа звукопоглинання).

$$ЕЗ=А=А_{\text{постійне}} + А_{\text{змінне}} + А_{\text{додаткове}} \text{ (м}^2\text{)}, \text{ де}$$

$A_{\text{постійне}}$ – звукопоглинання усіма огорожуючими конструкціями.

$A_{\text{постійне}} = (\text{площа стелі помножити на } \alpha \text{ матеріалу (залізобетону)} + (\text{площа стін помножити на } \alpha \text{ залізобетону)} + \text{площа вікон помножити на } \alpha \text{ скла (вікон)} \text{ тощо.}$

$$A_{\text{змінне}} = N_{\text{сл.}} \cdot \alpha_{\text{сл.}} + N_{\text{кр.}} \cdot \alpha_{\text{кр.}}$$

$N_{\text{сл.}}$ – кількість слухачів.

$A_{\text{сл.}}$ – (число) коефіцієнт стула.

$A_{\text{додаткове}} = \alpha_{\text{додаткове}} * \text{площа усіх обмежуючих поверхонь.}$

Табл. 6.1.

Коефіцієнт звукопоглинання матеріалів

№	Назва матеріалу	Коефіцієнт звукопоглинання при 1000 Гц
1	Бетонна стіна	0,01 (1%)
2	Цегляна стіна	0,02 (2%)
3	Віконне скло (4 мм)	0,05 (5%)
4	Акустична гіпсово-пемзова штукатурка	0,32 (32%)
5	Вентиляційна решітка	0,48 (48%)
6	Завіса з бавовняної тканини	0,53 (53%)
7	Плюшева тканина (0,65 кг./ м ²)	0,72 (72%)
8	Акустичний поролон «піраміда» 70 мм	0,80 (80%)
9	Акустична мінеральна вата 100 мм	0,95 (95%)
10	Відкрите вікно	1 (100%)

Раніше до предмету акустики приміщень прийнято було вводити питання ізоляції приміщень від проникаючих ззовні звуків; тепер ці проблеми виокремилися в самостійний підрозділ – будівельну акустику. Методами акустики приміщень користуються також в техніці боротьби з шумом в приміщеннях.

Сучасна архітектурна акустика веде початок від робіт американського вченого У. Себіна, який встановив в останньому десятилітті ХІХ ст., що в замкнутому приміщенні послідовні багаторазові і при цьому поступово дедалі слабші відображення зливаються в плавню загасаючий гул, який супроводжує кожен випромінений звук (реверберація), причому швидкість

загасання є суттєвим показником умов чутності. Приклади застосування акустичних знань в будівництві знаходять у відкритих театрах Стародавньої Греції та Риму. Акустичні випробування приміщень засновані на електричних вимірах звукового сигналу, що приймається в приміщенні мікрофоном, і полягають у визначенні рівномірності розподілу звуку в просторі і в дослідженні загасання відгону в часі. Поряд з випробуваннями залів (фізичні акустичні дослідження) все більшого поширення знаходять випробування малих моделей, що дозволяє своєчасно уникнути помилок при проектуванні нових залів і знаходити способи виправлення дефектів вже існуючих. Управління акустичними умовами в приміщенні здійснюється шляхом установки щитів (панелей), які відображають звук і регулювання кількості звукопоглинальних матеріалів, що розміщуються на поверхнях.

2. Джерела шумового забруднення та їх вимірювання

У зв'язку із зростанням кількості автомобілів (які є найпоширенішим джерелом шуму у містах), індустріалізацією міст, зростанням транспортної рухливості населення, ростом технічного оснащення міського господарства розширюються контакти між техногенним середовищем міста і природного середовища. Сільські ландшафти і приміські території зазнають активного впливу шосейних доріг і залізниць, аеродромів та річкових портів. До цих джерел шуму належать також залізничні вузли і станції, великі автовокзали і автогосподарства, мотелі і кемпінги, трейлерні парки, промислові об'єкти і великі бази будівельної індустрії, енергетичні установки. Спричинювати додаткове шумове навантаження може також недосконале планування міст, розміщення в їх межах джерел сильного шуму, наприклад, аеропортів, автомагістралей, підприємств. Джерелами шумів є також гучномовні пристрої, ліфти, юрби людей. Для багатьох великих міст джерелом значного шуму є залізничні підприємства, відкриті ділянки метрополітену і міські трамваї.

Прилад для вимірювання шуму, **шумомір** – прилад для об'єктивного вимірювання рівня звуку. Не слід плутати цей параметр з рівнем гучності. Не всякий прилад, що вимірює звук, є шумоміром. Існують міжнародні стандарти, що встановлюють вимоги до цих приладів. У Європі вимірювання шуму проводиться за стандартом ІЕС 61672-1. У деяких інших європейських країнах діють свої стандарти на шумоміри, проте всі вони також відповідають вимогам стандартів МЕК. В США стандарти істотно відрізняються від європейських, де застосовуються стандарти ANSI (зокрема ANSI S1.4). В Україні вимірювання шуму регламентується ДСТУ 2325-93.



Рис. 6.2. Шумомір

Загальна схема шумоміра обирається так, щоб його властивості наближалися до властивостей людського вуха.

Оскільки чутливість вуха залежить як від частоти звуку, так і від його інтенсивності, в шумомірі використовуються кілька комплектів фільтрів, що відповідають різній інтенсивності шуму. Дані фільтри дозволяють імітувати АЧХ вуха при заданій потужності звуку. Ці фільтри називаються А, В, С, D. Їх амплітудно-частотні характеристики наведені в стандарті МЕК 651.

Фільтр А приблизно відповідає АЧХ «посереднього вуха» при слабких рівнях шуму, фільтр В – при сильних рівнях шуму. Фільтр D був розроблений для оцінки авіаційного шуму.

В даний час для нормування шуму застосовуються тільки фільтри А і С (останній – для оцінки пікових рівнів шуму). Останні версії стандартів на шумоміри не встановлюють вимог до фільтрів В і D.

Крім вимог до АЧХ, стандарти на шумоміри встановлюють вимоги до параметрів тимчасового усереднення. У шумомірах застосовується експоненціальне усереднення F (Fast), S (Slow), I (Impulse). Часова константа характеристики F – $1/8$ с, S – 1 с. Інтегруючі шумоміри мають також лінійне усереднення і вимірюють еквівалентні рівні звуку, рівні звукової експозиції, різні види дози шуму тощо.

3. Моделювання акустики

Звукова хвиля, що зустрічає на своєму шляху перпендикулярну тверду поверхню (наприклад, стіну), відбивається від неї й повертається тим самим шляхом. Дві хвилі, що рухаються в протилежні напрямки здатні робити так звані «хвилі, що стоять», які забарвлюють звук новими

гармоніками (тобто змінюють тембр звуку). Наприклад, у замкнутому прямокутному приміщенні «хвилі, що стоять» перебувають точно посередині кімнати. І якщо ви станете в це місце, то почувєте, як змінився звук (найчастіше погіршився). Якщо довжина хвилі джерела звуку стає кратна довжині приміщення, то фаза відбитої хвилі збігається з фазою прямої хвилі, у результаті чого відбувається їхнє взаємне посилення. А оскільки в прямокутному приміщенні звук відбивається від стін кілька разів, то відбувається багаторазове посилення гучності звуку. Тобто, виникає повітряний резонанс – окремий випадок «хвилі, що стоять».

Будь-яке приміщення має якусь критичну частоту звуку за якої виникає резонанс. Причому у приміщень із різними геометричними розмірами будуть різні критичні частоти. Цю частоту називають частотою резонансу. Резонанс найчастіше виникає саме на низьких частотах, оскільки довжину хвилі низьких звуків можна порівняти з довжиною й шириною приміщення. До речі, бас-гітаристи, що репетирують вдома, добре знайомі з таким ефектом: деякі взяті на інструменті ноти зненацька підсилюються, при цьому починають загрозливо дзенькати скло у вікнах і шафах.

Резонанс, у більшості випадків, явище вкрай неприємне. Тому в музично використовуваних приміщеннях з ним борються всіма можливими способами. Наприклад, ліквідують паралельні поверхні – студійні кімнати дуже часто проектуються таким чином, що всі кути мають величину понад 90 градусів. Проте резонанс не завжди буває шкідливий. У духових інструментах і органах це явище використовують для посилення звуку й отримання характерного тембру.

У будь-якої трубки є своя частота резонансу, що визначається геометричними розмірами самої трубки. Якщо в таку трубку потрапляє звукова хвиля (наприклад, від тростини саксофона), то в центрі перетину трубки виникає резонансна хвиля певної частоти, що підсилює звук і прикрашає його новими гармоніками. Змінюючи довжину трубки, ми можемо допомогтися зміни висоти звуку. Саме такий принцип керування використовується в усіх духових інструментах: наприклад, у тромбоні музикант висуває коліно труби, змінюючи її довжину; у кларнеті, гобої, флейті, саксофоні довжина труби змінюється за допомогою закриття й відкриття отворів тощо.

Для музикантів, які записують свої композиції вдома, знання про наявність у будь-якому приміщенні стоячих хвиль і розуміння природи повітряного резонансу досить важливе, тому що дає змогу боротися з цими явищами. Наприклад, якщо ви щось записуєте з мікрофона у звичайній кімнаті, то мікрофон у жодному разі не можна розташовувати

прямо в центрі приміщення – інакше ви на записі отримаєте перекручений стоячими хвилями звук. З резонансами теж можна боротися. Наприклад, чим більше у вашій кімнаті непаралельних поверхонь, тим менше умов для виникнення резонансів. Особливо важливо забезпечити такі умови під час запису з мікрофона низькочастотних інструментів – контрабасів і бас-гітар.

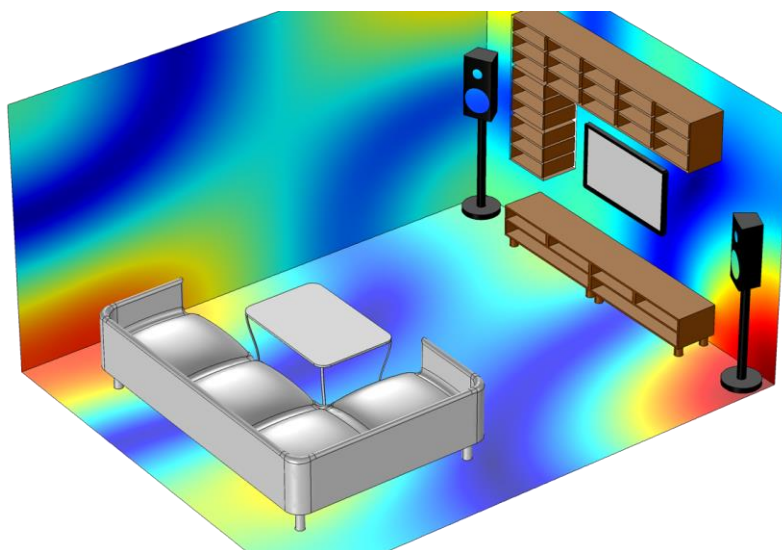


Рис. 6.3. Акустичне моделювання приміщення

Лекція 7

РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЗВУКОВИХ ХВИЛЬ У ЗАКРИТИХ ПРИМІЩЕННЯХ

1. Поняття реверберації.
2. Імпульсна характеристика середовища.
3. Розрахунок стандартного часу реверберації.

1. Поняття реверберації

Реверберація – залишкове «післязвуччя» у закритих приміщеннях, яке утворюється внаслідок багатократного відбиття від поверхонь та одночасного поглинання звукових хвиль. Реверберація характеризується проміжком часу (у секундах), протягом якого сила звуку зменшується на 60 дБ.

Явище реверберації полягає у суперпозиції різних ехосигналів від одного джерела звуку. Ефект реверберації можна спостерігати в закритих приміщеннях після вимкнення джерела звуку. Художньо-естетичне враження, що створюється реверберацією, залежить від контексту звукового твору і визначається у вищих відділах головного мозку. Зазвичай надлишкова тривалість реверберації призводить до неприємного гулу, «порожнечі» приміщення, а недостатня – до різкого уривчастого звучання, позбавленого музичної «соковитості». Штучно створювана реверберація в певних межах сприяє поліпшенню якості звучання, створюючи відчуття приємного «резонансу» приміщення.

У процесі запису мови, співу, музики, а також створенні різних шумових ефектів використання штучної реверберації є складовою частиною загальної обробки аудіосигналу. Такий вид обробки визначається як технічними умовами проведення запису, так і художньо-естетичними завданнями. Реверберацію використовують для поліпшення та підкреслення художньої виразності мовлення, співу, звучання окремих музичних інструментів. Так, наприклад, при записі музичних програм у приміщенні з незадовільною акустикою або малого для даного складу виконавців об'єму зазвичай не вдається отримати необхідне співвідношення між «гулкістю» і «чіткістю» звучання. У цьому випадку застосування штучної реверберації дозволяє домогтися поліпшення якості звучання музичної програми. Аналогічно, реверберація допомагає створити необхідне акустичне забарвлення голосу або інструменту при записі соло вокаліста або музичного інструменту, коли він «птопає» у звучанні ансамблю, який виконує супровід.

За допомогою реверберації можна створити ефект наближення і віддалення джерела звуку. Для цього поступово змінюють рівень реверберації, створюючи ілюзію зміни акустичного відношення, а значить, і враження зміни звукового плану. Наприклад, при озвучуванні фільму або звуковому оформленні презентації нерідко виникає потреба підкреслити акустичну обстановку того чи іншого місця дії, для чого також використовують ефект реверберації.

2. Імпульсна характеристика середовища

Імпульсна характеристика складається з чотирьох складових:

1) **Прямий звук** – перший звук, який потрапляє безпосередньо від джерела до слухача і має найбільшу інтенсивність. Згідно з дослідженнями Гааса, суб'єктивна оцінка локалізації джерела звуку визначається саме прямим звуком і відбиттями, що приходять протягом 1 мс.

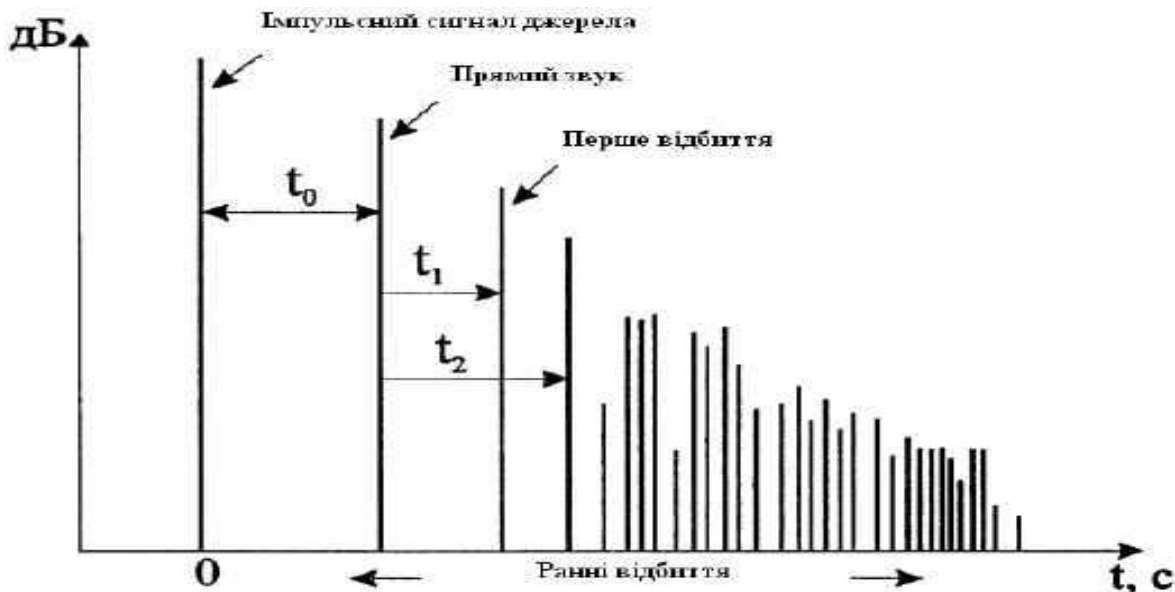


Рис. 7.1. Імпульсна характеристика середовища

2) Час затримки першого відбиття (англ. *Initial Time Delay Gap*), що позначають *ITDG* або t_1 – часовий інтервал між сприйманим слухачем прямого звуку і його першого відбиття. Значення цього параметру визначає суб'єктивне враження величини приміщення. Дослідження Беранка вказують, що в найкращих концертних залах t_1 для слухача, що знаходиться у центрі зали це значення становить від ~ 15 до 30 мілісекунд. Звідси випливає, шлях, який долає відбитий звук має бути на 5 - 10 метрів довшим ніж шлях прямого звуку. Якщо значення t_1 є завеликим (від ~ 50 до 70 мілісекунд), у слухача виникне враження перебування у величезному просторі. Відбиття із запізненням понад 100 мс сприймається як відлуння.

3) Ранні відбиття (англ. *early reflections*) або ER – група відбиттів, що приходять до слухача через ~ 80 мс після прямого звуку. Гаас дослідив, що відбиття із часом затримки ~ 20 -50 мс справляють враження збільшення гучності прямого сигналу. Звуки, що затримуються на 40 мс посилюють враження акустичної близькості. Для досягнення повноти звучання, ранні відбиття повинні приходити з якнайбільшої можливої кількості напрямків.

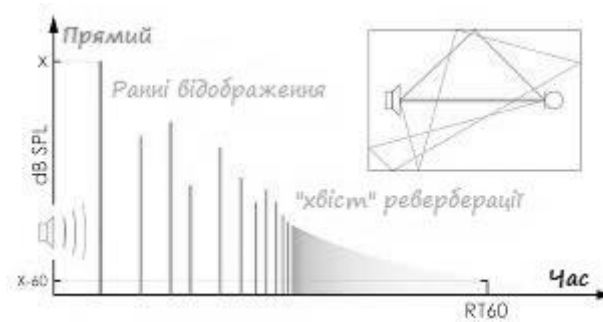


Рис. 7.2. Відбиття звуку

4) «хвіст» реверберації – складається з великої кількості багаторазових відбиттів звуку (згідно з Кремером і Мюлером протягом секунди до слухача приходить до 2000 відбиттів). Інтервали між послідовними відбиттями сигналу настільки короткі, що «хвіст» реверберації має характер поступово зникаючого продовження прямого сигналу. У залежності від коефіцієнтів поглинання поверхонь приміщення, «хвіст» може зникати повільно або раптово, що виражається у часі реверберації приміщення.

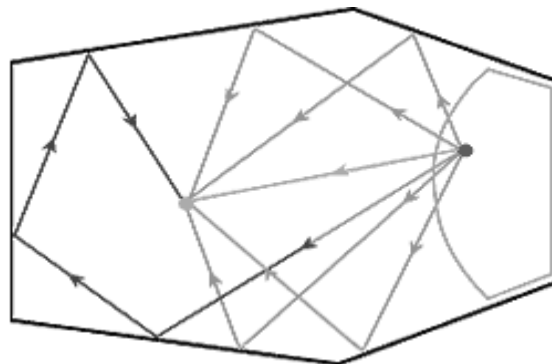


Рис. 7.3. Схематичне зображення розповсюдження хвиль у концертній залі

3. Розрахунок стандартного часу реверберації

Як уже зазначалося, під реверберацією розуміється процес загасання звуку після припинення звучання джерела, що відбувається внаслідок багаторазових відображень звукових хвиль від усіх поверхонь, що обмежують розповсюдження звуку. Основним показником реверберації є час ревербе-

рації (іноді позначається RT 60 (аббревіатура від англ. reverberation time, де 60 вказує на рівень зниження у 60 дБ).

Дослідженнями, в результаті яких було сформульовано залежність об'єму приміщення, звукопоглинання та площі поверхонь приміщення, займався американський фізик Уоллес Себін. Для експериментального визначення часу реверберації У. Себін користувався найпростішими пристосуваннями: органамими трубами як джерелом звуку і секундоміром. Виявилося, що час реверберації (Т) прямо пропорційний об'єму приміщення V і обернено пропорційний добутку середнього коефіцієнта поглинання $\alpha_{\text{ср}}$ і площі всіх перешкод S:

$$T = k \times \frac{V}{\alpha_{\text{ср}} \times S}$$

Ця формула пізніше отримала назву «формула Себіна».

Коефіцієнт пропорційності (k) при теоретичному виведенні формули $k = 0,161$ с/м.

Формула Себіна виведена для ідеального приміщення, в якому існує дифузне розподілення звукової енергії по простору приміщення та не враховує залежність часу реверберації та коефіцієнта пропорційності від форми приміщення, тому формулу Себіна теоретично можна застосовувати для театральних і концертних залів з невеликим коефіцієнтом поглинання, відповідно, для інших розрахунків використовується інша формула.

Час, протягом якого рівень звукового тиску зменшиться на 60 дБ після припинення звучання джерела, називається часом стандартної реверберації (зазвичай замінюється терміном «час реверберації»).

Стандартний час реверберації залежить від об'єму приміщення та ефекту звукопоглинання. Вимірюється на частотах 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Гц.

Практичний розрахунок часу реверберації (Т) проводиться за методикою, розробленою Карлом Ейрінгом:

$$T (\text{сек}) = 0,163 * V / (-\ln (1-\alpha) * S + 4 * \mu * V), \text{ де}$$

V – об'єм приміщення м³;

S – сумарна площа всіх поверхонь, що обгороджують м²;

α – середній коефіцієнт звукопоглинання в приміщенні;

μ – коефіцієнт, що враховує поглинання звуку в повітрі.

Ця формула пізніше отримала назву «формула Ейрінга».

Якщо порівняти формули Ейрінга та Себіна, то виявляється, що остання значно завищує значення Т, причому розходження збільшується зі зростанням $\alpha_{\text{ср}}$. Процент розходження наведено у таблиці 7.1.

Табл. 7.1.

Завищення Т за формулою Себіна у порівнянні з формулою Ейрінга

$\alpha_{\text{ср}}$	0,2	0,5	0,8
Завищення Т, %	11	37	100

Зазвичай, результати розрахунків часу реверберації представляються у вигляді таблиці. Приклад розрахунків для приміщення тон-зали студії ($L = 5000$, $B = 4000$, $H = 2700$) з одними стандартними дверима для трьох різних варіантів оздоблень приміщення: 1) взагалі без акустичного оздоблення; 2) з мінімальним акустичним оздобленням (легка тканина); 3) акустично підготовлене (всі поверхні вкриті акустичним поролоном 20 мм) наведено в таблиці 7.2.

Табл. 7.2.

Результати розрахунку часу реверберації

№	Оздоблення приміщення	Частота, Гц					
		125	250	500	1000	2000	4000
1.	Без оздоблення	2,94 с	3,0 с	1,57 с	1,18 с	1,02 с	0,81 с
2.	З оздобленням	1,32 с	1,33 с	0,53 с	0,35 с	0,20 с	0,16 с
3.	Підготовлене	0,70 с	0,21 с	0,06 с	0,12 с	0,36 с	0,33 с

При дуже нерівномірному розподілі загального поглинання результат, обчислений за формулою Ейрінга, може виявитися далеким від виміряного. Г. Міллінгтон пояснив причину цієї розбіжності тим, що в дійсності ймовірність числа віддзеркалень від даної поверхні тим більше, чим більше сама поверхня. На підставі цих міркувань Г. Міллінгтон вивів формулу для розрахунку часу реверберації в вигляді:

$$T = k \times \frac{V}{-\sum_{i=1}^n S_i \ln(1-\alpha_i)}, \text{ де}$$

S_i – площа матеріалів з коефіцієнтами поглинання α_i ,

n – кількість поглинальних матеріалів.

Недолік формули Міллінгтона полягає у тому, що розрахований час реверберації дорівнює нулю, якщо хоча б один елемент перешкоди дорівнює одиниці ($\alpha_i = 1$), відповідно, для цієї формули необхідно вважати, що жоден коефіцієнт поглинання перешкодами не дорівнює одиниці.

Отже, формулу Міллінгтона можна застосовувати для приміщень з майже будь-яким значенням $\alpha_{\text{ср}}$ (окрім $\alpha_{\text{ср}} = 1$), коли матеріали поверхонь мають дуже відмінні α_i , причому матеріали розміщені по поверхнях нерівномірно.

У 1929 році Пауль Себін (двоюродний брат Уоллеса Себіна) виявив, що вологість повітря впливає на час реверберації на частотах $\nu > 2$ кГц. Ервін Майєр виявив такий самий ефект на частотах $\nu > 3,2$ кГц.

Точне дослідження цього ефекту було здійснене у 1931 році Верном Кнудсеном, який визначив, що:

- 1) поглинання звуку у сухому повітрі більше, ніж у вологому;
- 2) поглинання високочастотного звуку більше, ніж низькочастотного;
- 3) у випадках гранично високої вологості (100%) і утворення туману поглинання звуку значно збільшується для усіх частот.

Поглинання звуку пов'язане з в'язкістю і теплопровідністю повітря та молекулярними втратами, воно стає помітним на частотах, вище 2 кГц у приміщеннях великого об'єму (понад 2000 м³).

З урахуванням цього формула Ейрінга набуває такого вигляду:

$$T = \frac{1}{6} \times \frac{V}{-S \times \ln(1 - \alpha_{cp}) + 4\mu \times V}$$

де: μ – коефіцієнт затухання звуку у вологому повітрі.

Одиниця вимірювання: $[\mu] = 1\text{м}^{-1}$

Значення коефіцієнта затухання μ визначають графічним методом, воно зростає зі збільшенням частоти та зменшенням вологості.

Якщо у попередній формулі замінити натуральний логарифм на десятинний, то отримаємо формулу:

$$T = \frac{U, U/V \times V}{-S \times \lg(1 - \alpha_{cp}) + 1,74 \times \mu \times V}$$

або

$$T = \frac{0,07 \times V}{A + B}$$

де загальне звукопоглинання A дорівнює:

$$A = -S \times \lg(1 - \alpha_{cp})$$

Поправка B , що враховує вологість повітря, дорівнює:

$$B = 1,74 \times \mu \times V$$

Поправка на затухання звуку у повітрі пропорційна до об'єму, оскільки звукова енергія послаблюється по всьому простору приміщення.

Оптимальний час реверберації – час за який у приміщенні даного типу створюються найкращі умови чутності. Допустиме розходження розрахункового та оптимального часу реверберації складає $\pm 10\%$. Залежність оптимального часу реверберації та об'єму приміщення представлено на рис. 7.4.

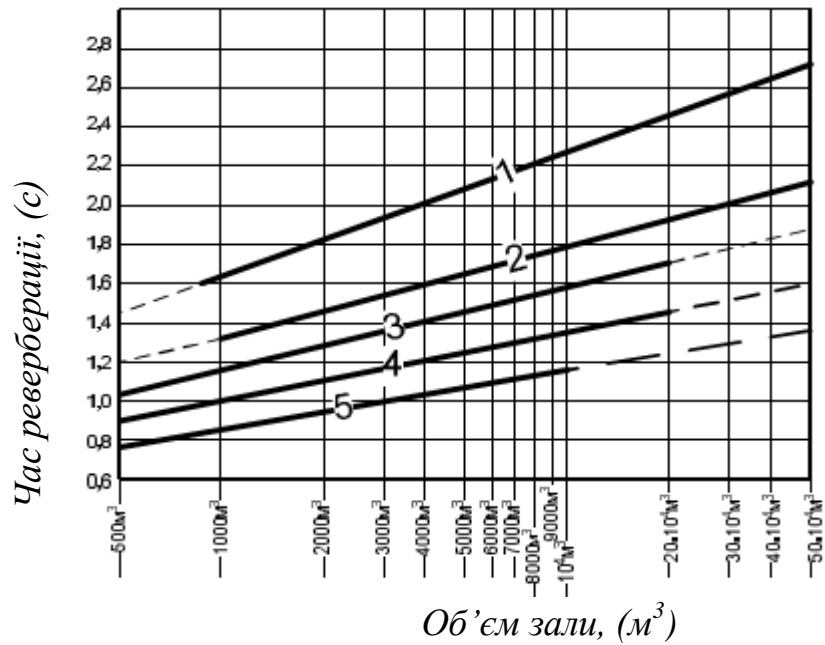


Рис. 7.4. Оптимальний час реверберації, де:
1 – зали для органної музики; 2 – зали для симфонічної музики;
3 – зали для камерної музики, зали оперних театрів;
4 – зали багатоцільового призначення;
5 – лекційні аудиторії, зали засідань, зали драматичних театрів

Лекція 8

СТЕРЕОФОНІЯ

1. Поняття стереофонії.
2. Зародження і розвиток стереофонії.
3. Способи отримання стереофонічного запису. Квадрофонія.

1. Поняття стереофонії

В умовах концертної зали слухач достатньо добре може розрізнити звучання різних музичних інструментів, їх інтенсивність та розташування на сцені. Враження просторовості звукового поля створюється тому, що слухач, не повністю усвідомлюючи це, постійно визначає різницю між відчуттям звучання одного і того ж звука лівим і правим вухом (бінауральний ефект).

Стереофонія або стереозвук (від грец. Στερεός «стереос» – «твердий, просторовий» і φωνή – «звук») – метод відтворення звуку, за якого створюється ілюзія «звукової перспективи» зі збереженням напрямків на різні джерела звуку. Це реалізується за рахунок використання бінаурального ефекту і одночасної передачі звукової інформації по двох і більше незалежних каналах, на відміну від монофонічної звукопередачі, коли звук передається через єдиний канал.

У побуті стереофонічним прийнято називати двухканальний звукозапис, однак це поняття охоплює більш широку сферу, позначаючи об'ємне звучання з будь-якою кількістю каналів. Термін «стереофонія» в рівній мірі належить до таких понять, як «квадрофонія» (*про що буде мова далі в лекції*) і «об'ємний звук». При відтворенні стереофонічного запису через єдиний гучномовець якість звуку знижується через інтерференції сигналів різних каналів, що відрізняються по фазі.

Ознаками, які характеризують стереофонічне звучання є:

1) просторове уявлення, тобто «рознесеність» компонентів стереофонічної панорами як по фронту вздовж уявної лінії, що з'єднує акустичні системи, так і в глибину від неї, причому місцезнаходження джерел звуку в цій частині простору можуть бути чітко локалізовані;

2) «прозорість» звучання, завдяки чому легко виділяються і окремо сприймаються музичні інструменти (або співацькі голоси) чи їх групи на фоні ансамблю, що звучить;

3) правильність передачі тембрів музичних інструментів (або співацьких голосів), висока природність звучання тембру інструмента;

4) передача «басових» звуків без надмірної гугнявості (*бубоніння, гудіння*), що певною мірою властива монофонічному звучанню;

5) набагато краще, ніж за монофонічної передачі, сприйняття «акустичної атмосфери» первинного приміщення (у якому здійснювався запис).

Важливою особливістю стереовідтворення є можливість впливу на слухача за допомогою направленості приходу звуків, що дозволяє підкреслити конфліктність різних тем, їх поєднання, співставлення, протиставлення тощо.

Всю площу прослуховування, в якій спостерігається переважання стерео відтворення можна розділити на дві частини:

- 1) зона повного стереоефекту;
- 2) зона часткового стереоефекту.

Зоною повного стереоефекту називається площа, в межах якої переважання стереоефекту становить більше 85%, а викривлення звукових образів стереопанорами не перевищує 0.1. В межах зони повного стереоефекту можливі якісно правильна локалізація звукових образів стереопанорами та їх впевнене звукове просторове розділення. Розмір цієї зони невеликий, її центром є точка оптимального слухання.

Зоною часткового стереоефекту називається площа, в межах якої переважання стереоефекту становить 60 – 85%, а кількість окремо сприйманих напрямків не менше трьох. Межі цієї зони прийнято визначати максимально допустимою похибкою локалізації центра бази за умови рівних рівнів каналних сигналів. Відстань між акустичними системами (розмір бази) суттєво впливає на розмір зони стереоефекту. Зменшення стереобазиса призводить до збільшення гучності центральних звуків, що погіршує «прозорість» звучання звучання бічних звуків.

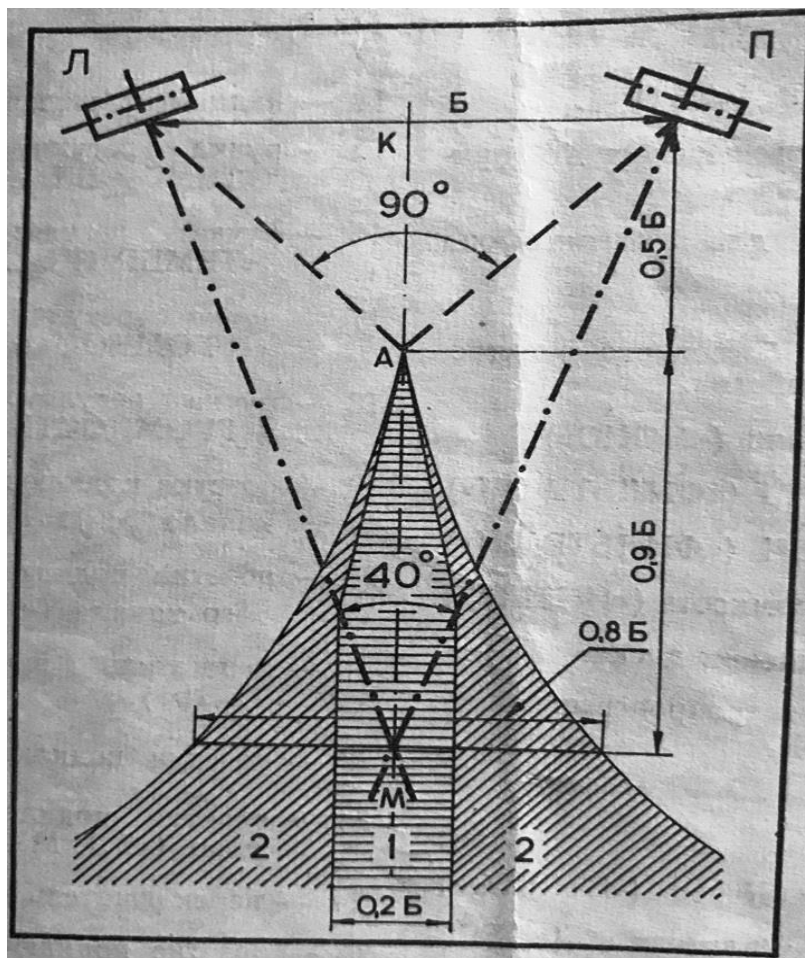


Рис. 8.1. Зони стереоефекту, де:

1 – зона повного стереоефекту; 2 – зона часткового стереоефекту;

М – точка – оптимальна для прослуховування

2. Зародження і розвиток стереофонії

Вперше принцип стереофонії на практиці було реалізовано в 1881 році в Парижі Клементом Адером. На сцені Паризької Опери Адер розташував ряд телефонних трансляторів, сигнал від яких по кабелях передавався до кабінок Паризької електричної виставки. Відвідувачі кабінок могли почути концерт в прямій трансляції через дві телефонні трубки (окремі для кожного вуха).

Згодом налагодився комерційний випуск двоканальних телефонів: в 1890-1932 рр. у Франції під назвою «Théâtrophone», в 1895-1925 рр. в Великобританії під назвою «Electrophone»; масового поширення вони не отримали.

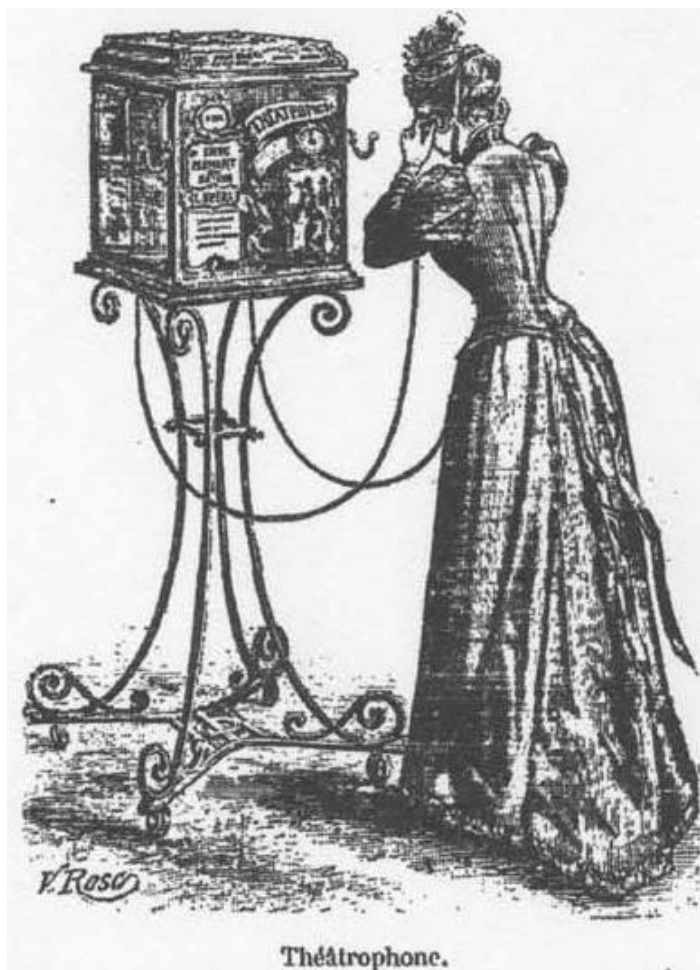


Рис. 8.2. «Théâtrophone». Ілюстрація з журналу (1892 р.)

В звукозаписі перші проби в стереофонічній фіксації звуку здійснено на початку 1930-х рр. Велике значення у розвитку стереофонії отримали винаходи англійського інженера Алана Блюмлейна (запатентовані у Великобританії патентом № 394325 у 1931 р.). Його стереопара мікрофонів («пара Блюмлейна») до тепер застосовується в практиці звукозапису. Вона складається з двох близько розташованих двонаправлених мікрофонів, зорієнтованих під прямим кутом один до одного.



Рис. 8.3. Розташування мікрофонів у «парі Блюмлена»

У 1931 році Алан Блюмлейн і його колеги створили пробний кіноролик під назвою «Walking And Talking» з використанням стереозвуку, а в 1935 році за його участі був створений короткометражний фільм «Grains at Hayes», який є першим в історії фільмом зі стереозвуком.

У березні 1932 року в філадельфійській Академії музики був здійснений запис з використанням двох мікрофонів, сигнал від яких було направлено до двох голок, які нарізали дві роздільні канавки на одному і тому ж восковому диску. Перший з цих записів, зроблений 12 березня 1932 року (під час виконання «Прометея» Олександра Скрябіна) є найбільш раннім стереофонічним записом, що дійшов до наших днів. Перша ж в історії стереограмплатівка була випущена в 1933 році компанією ЕМІ: по двох сторонах канавки були розміщені відповідно два роздільних канали. У 1940 році був створений перший повнометражний анімаційний фільм «Фантазія» з псевдостереофонічною трьох-канальною фонограмою. Запис відтворювалася по системі «Фантасаунд» з окремої кіноплівки. Однак, через надзвичайну складність системи і слабо виражений стереоефект подальшого розвитку вона не отримала.

У лютому 1954 року студія RCA Victor здійснила стереозапис, використовуючи багатоканальну апаратуру: виступ Бостонського

симфонічного оркестру було зафіксовано одночасно як на моно- так і на двох-канальній плівці. Було ще кілька подібних записів, однак вони не були призначені для виходу на платівках, оскільки ще не існувало ринку масової апаратури відтворення стереозвуку. Однак уже через рік, в 1955, з'явилися перші стереомагнітофони, і налагодився випуск стерео-бобін. С 1957 року процес запису в форматі стерео став переважаючим в американській музичній індустрії.

У 1958 році компанія Western Electric виготовила апарат Westrex, що дозволяв нарізати стереодиски, з яких, нарешті, було можливо тиражування звичайних грамплатівок (саме Western Electric ввели в обіг слова «стерео», «стереофонічний» в галузі звукозапису). У тому ж році вийшла і перша комерційна стереоплатівка. Однак, аж до кінця 1960-х рр. значне число грамплатівок виходило в монозвучанні, незважаючи на студійний стереозапис.

3. Способи отримання стереофонічного запису. Квадрофонія

Існують два принципово різних способи отримання стереофонічного запису. При першому для фіксації звукового поля використовуються два і більше мікрофонів, рознесених на певну відстань один від одного. Пульсуючий струм звукової частоти, який створюється кожним з мікрофонів, посилюється окремими незалежними один від одного підсилювачами, і записується на окремі канали носія. При відтворенні звук, отриманий від кожного з мікрофонів, посилюється незалежно і подається на окремі гучномовці або акустичні системи, розташовані відповідно до розміщення мікрофонів. Таким чином відтворюється звукова картина, що існувала в момент запису. Ідеальним способом відтворення звукового поля вважається умовна площа, що складається з нескінченно малих динаміків, що передають звук від розташованих таким же чином мікрофонів. В звукозаписі музичних творів для отримання стереоефекту достатнім вважається наявність двох незалежних каналів, а в кінематографії їх не має бути менше трьох, щоб виключити «провал» в центрі звукової картини, що відповідає середині екрану. Так, в широкоекранних кінематографічних системах «Сінемаскоп» і «Широкий екран» використовувалися три фронтальних канали, а в широкоформатних системах «Тодд-АТ» і «НІКФІ» – п'ять.

Другий спосіб отримав назву псевдостерео, і на відміну від першого не вимагає декількох мікрофонів для запису звукового поля. Стереофонічна фонограма створюється шляхом розподілу по різних каналах декількох вихідних монофонічних записів за допомогою «панорамного

мікшера». При цьому ефект локалізації джерел звуку створюється як регулюванням рівня запису в різних каналах, так і корекцією частотної характеристики, оскільки відомо, що високі частоти в найбільшій мірою впливають на ілюзію напрямку. Крім того, ефект додатково досягається регулюванням інтенсивності відбитого звуку і ступеня запізнювання за допомогою ліній затримки. При створенні псевдостереофонічних фонограм різні джерела звуку записуються окремо або для них встановлюються окремі мікрофони. Потім в процесі зведення (міксування) отримані сигнали розподіляються по каналах готової фонограми.

У 1960-і роки в США часто практикувався випуск так званих «дуофонічних» грамплатівок, в яких початково монофонічним записам надавався ефект стерео. Монозапис розподілявся по двох каналах з одночасною корекцією частотної характеристики. У потрібному каналі часткової локалізації звуку підкреслювалися високі частоти, тоді як в протилежному вони заглушались при збереженні рівня низькочастотних сигналів. Компанії звукозапису вчиняли так з одноканальними записами, зробленими перед впровадженням стереотехнології (платівки Елвіса Преслі, Френка Сінатри), або якщо запис з будь-яких технічних причин здійснено по одноканальній системі, незважаючи на можливість стереофонії (The Beatles, The Beach Boys; так званий fake stereo). У кінематографі псевдостереофонія прийшла на зміну багатоканальному вихідному запису на початку 1960-х років через технологічну складність синхронної кінозйомки. У Голлівуді від лінійок з декількох мікрофонів відмовилися в 1958 році, а в СРСР ця технологія була визнана застарілою в 1968 році. Надалі вихідну фонограму записували одноканальними магнітофонами з подальшим розподілом по каналах за допомогою панорамного мікшера. Американська псевдостереофонічна система звуковідтворення «Перспектив» була заснована на автоматичному перемиканні єдиної звукової доріжки на різні гучномовці. Для цього в фонограмі записувалися додаткові керуючі сигнали з частотами 30, 35 і 40 Герц, що не відтворюються підсилювачем. Сигнали кожної частоти підключали відповідні гучномовці, розташовані за екраном кінотеатрів системи «Віставіжн», створюючи ефект проходження звуку за зображенням.

Квадрофонія (від лат. Quattuor – чотири і грец. Φωνή – звук) – різновид стереофонії, в якій використовуються 4 незалежних канали. На відміну від двох-канального стерео звуку, що утворює панораму перед слухачем, квадразвук призначений оточити слухача з 4 сторін і створити відчуття його присутності «усередині звуку». Квадродинаміки, як і мікрофони, розташовують по кутах кімнати, але можливі й інші розташу-

вання, наприклад по центру стін. Основою квадросистем стали багатоканальні підсилювачі, ресивери, магнітофони і програвачі, до яких можна було підключати акустичні системи і квадранавушники. Останні стали особливим шиком в технічному арсеналі меломанів і аудіофілів того часу. За десятиліття глобального інтересу квадро в світі було створено близько 50 експериментальних і серійних моделей квадранавушників. Квадро мало обмежений успіх в 60-80-х роках минулого століття, але комерційно не відбулося насамперед через вартість апаратури, а також, як наслідок, малого попиту на багатоканальні носії звуку.

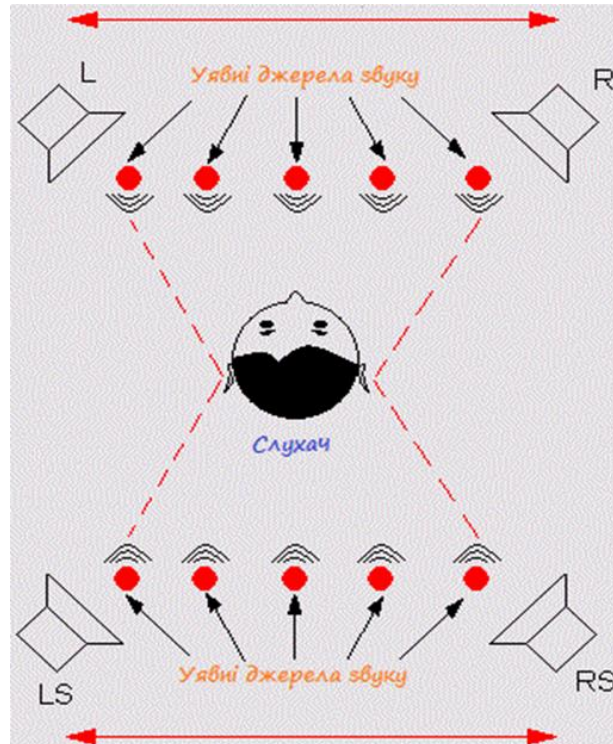


Рис. 8.4. Розташування випромінювачів звуку та розподіл уявних джерел звуку на квадропанорамі

Так, в 1967 році рок-гурт «Pink Floyd» проводить перший в світі концерт з об'ємним звуком в залі Queen Elizabeth Hall в Лондоні під назвою «Games for May», де гурт дебютує з квадрофонічною акустичною системою, зробленою спеціально на замовлення.

Сьогодні інтерес до квадро відроджується, завдяки поширеності форматів багатоканального звуку (5.1, 7.1 тощо). У позначенні 5.1 цифра 5 – це кількість каналів з повним частотним діапазоном (20-20000 Гц); цифра 1 – кількість низькочастотних каналів (до 120 Гц) ефектів (LFE).

Звуковий багатоканальний супровід до кінофільмів мають цілі сімейства форматів від двох великих конкуруючих компаній: Digital Theater Systems Inc. - DTS і Dolby Laboratories Inc. – Dolby Digital. Sony Dynamic

Digital Sound (SDDS) є 8-канальною кіно-театральною системою об'ємного звуку, яка має 5 незалежних фронтальних звукових каналів з двома незалежними тиловими каналами і канал низькочастотних ефектів.

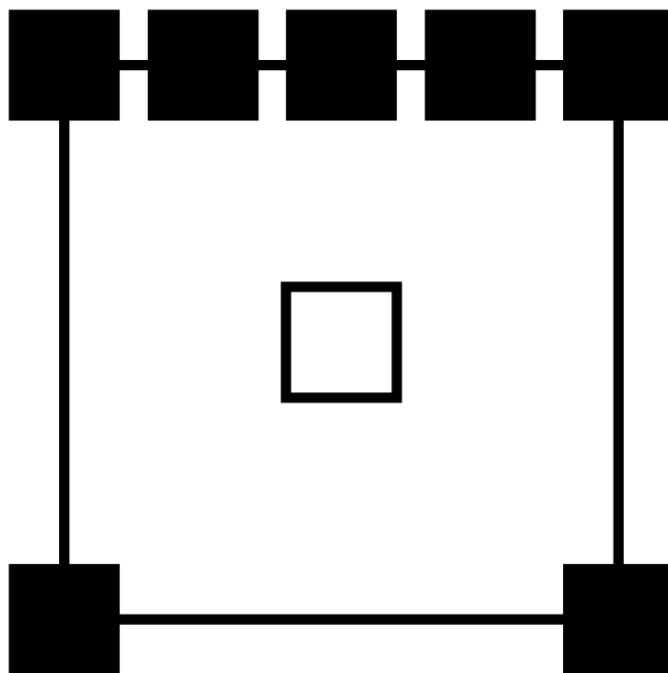


Рис. 8.5. Розташування каналів у системі SDDS

В ході проведення заходу ShoWest 2010 року компанія Dolby Laboratories оголосила про те, що у співпраці з кінокомпаніями Walt Disney Pictures і Pixar Animation Studios її фахівці розробили новий звуковий формат Dolby Surround 7.1, в якому було записано звук до мультфільму «Toy Story 3», який вийшов у 3D-форматі. У традиційній 7.1 системі просторового звучання введені два додаткових тилових гучномовця в порівнянні з попередньою конфігурацією 5.1; в цілому формат 7.1 містить чотири тилових канали і три фронтальних канали, щоб створити 360 ° звукове поле. Інші компанії також продовжують дослідження багатоканального запису та відтворення музики, як для кіно театральних, так і для побутових умов.

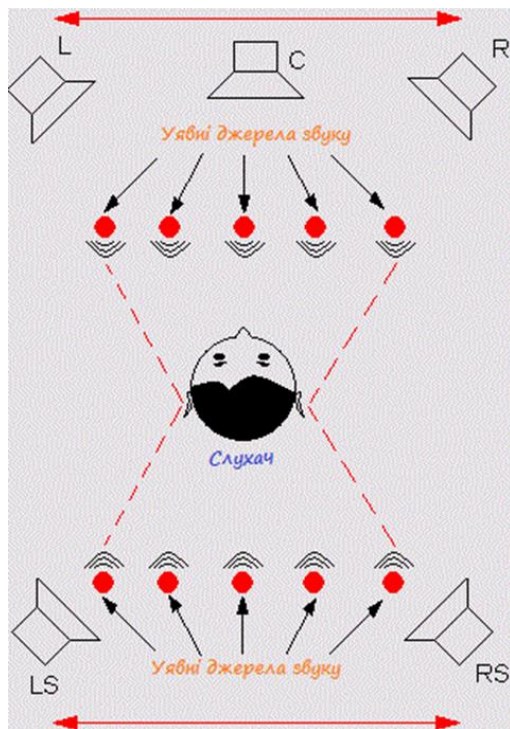


Рис. 8.6. Розташування випромінювачів звуку та розподіл уявних джерел звуку в системі Dolby Stereo

Після провалу квадрофонічних аудіо-форматів в 1970-і роки, багатоканальна музика поступово стала знову популярна з 1999 року, завдяки SACD і DVD-Audio форматам. Тепер багато AV-ресиверів та комп'ютерних звукових карт містять інтегральні цифрові сигнальні процесори та / або цифрові аудіо-процесори, для імітації об'ємного звуку від стереофонічного джерела.

Лекція 9

АКУСТИКА УДАРНИХ МУЗИЧНИХ ІНСТРУМЕНТІВ

- 1. Утворення звуку у музичних інструментах.**
- 2. Класифікація ударних музичних інструментів.**
- 3. Акустичні характеристики ударних музичних інструментів.**

1. Утворення звуку у музичних інструментах

Музичні звуки можна видобувати і змінювати різними способами, в зв'язку з чим музичні інструменти відрізняються різноманітністю форм. Музичні інструменти здебільшого створювалися і удосконалювалися самими музикантами і майстрами, які не вдавалися до наукової теорії.

Під частотним діапазоном інструменту зазвичай розуміють діапазон частот його основних тонів. У більшості випадків обертони музичних інструментів обіймають частоти до самої межі діапазону слуху людини.

У музичних інструментів є три основні частини: елемент, що коливається (вібрує), механізм для спричинення його коливань і допоміжний резонатор (рупор або дека) для акустичного зв'язку між елементом, що коливається і навколишнім повітрям.

Музичний звук періодичний у часі, а періодичні звуки складаються з ряду гармонік. Оскільки власні частоти коливань струн і повітряних стовпів фіксованої довжини гармонійно пов'язані між собою, у багатьох інструментах основними елементами, що коливаються, є струни (струнні музичні інструменти) і повітряні стовпи (духові музичні інструменти). За невеликим винятком (флейта – один з них) на музичних інструментах не можна взяти одночастотного звуку. При порушенні основного коливального елемента виникає звук, що містить обертони. У деяких коливальних елементів резонансні частоти не є гармонійними складовими. Інструменти такого роду (наприклад, барабани і тарілки) використовуються в оркестровій музиці для особливої виразності і підкреслення ритму, але не для мелодійного розвитку.

2. Класифікація ударних музичних інструментів



Рис. 9.1. Ударні музичні інструменти

Одна з найбільш поширених класифікацій ударних інструментів заснована на розподілі за елементами, які коливаються (вібрують):

1. Мембранофони – інструменти, як елементи, що коливаються використовуються тіла, що вимагають натягу (мембрани), наприклад литаври, барабани тощо.

За конструкцією елементів, що коливаються, всі мембранофони можна розділити на три групи:

1) мембрана пов'язана з замкнутою повітряною порожниною (наприклад, литаври);

2) дві мембрани з'єднані через обсяг повітря (великі і малі барабани);

3) мембрана відкрита і діє на повітря по обидва боки (бубон).

2. Ідіофони – інструменти, в яких елементами, що коливаються, є пружні тіла, які не потребують натягу на відміну від мембран.

Інструменти цієї групи об'єднують дві підгрупи на основі матеріалів:

1) металофони (в яких елементи, що коливаються, виготовлені з металу);

2) ксилофони (в яких елементи, що коливаються, виготовлені з дерев).

Форма елементів, що коливаються, також дозволяє класифікувати ідіофони на групи: з елементами, що коливаються, в формі брусків дерев'яних (ксилофон, маримба тощо) або металевих (вібрафон, челеста,

дзвіночки тощо); трубок (трубчасті дзвони); пластинок (тарілки, гонги тощо); оболонки (дзвони).

Окрім того, ідіофони поділяються на інструменти: настроювані (які настроюються по висоті тону – ксилофон, маримба, челеста і ін); ненастроювані (які не настроюються по висоті тону – тарілки тощо);

3. Хордофони – інструменти, в яких як елементи, що коливаються, використовуються натягнуті струни. До інструментів цієї групи (так званих струнних ударних) належить фортепіано.

3. Акустичні характеристики ударних музичних інструментів

Як і у всіх музичних інструментах, в них можна виділити три основні частини: генератор, елемент, що коливається і резонатор.

Генератором є м'язова сила музиканта, що передається до тіла інструменту, що коливається за допомогою дерев'яних або металевих молотків, паличок, калатал або язиків (наприклад, у дзвонів) тощо.

Спосіб спричинення коливання, загальний для цієї групи інструментів, – удар, тобто миттєве прикладання сили до інструменту з подальшим наданням йому свободи. Такий спосіб передачі енергії призводить до створення звуків з особливою часовою структурою: короткий період атаки, практично повна відсутність основної частини і тривала загасаюча частина коливань.

Елементами, що коливаються, які використовуються в ударних інструментах, є: струни, мембрани, бруски, стрижні, циліндричні трубки, пластинки, оболонки тощо.

Резонатори – пристрої, які застосовуються в деяких ударних інструментах для посилення звуку, мають форму резонансних трубок (маримба, вібрафон тощо), котлів (литаври), прямокутних коробок (челеста) тощо.

Акустичні характеристики мембранофонів

Коливання круглих мембран мембранофонів досить докладно досліджені акустиками, побудовані точні аналітичні рішення для розрахунку їх власних частот, розподілу амплітуд вільних і вимушених коливань при різних умовах збудження тощо.

У міру підвищення частоти моди коливань мембрани частково гасять один одного і випромінювання звуку зменшується (бо окремі елементи мембрани коливаються в протифазі). Отримані співвідношення характеризують «ідеальну» мембрану.

У реальних мембранах є зрушення власних частот за рахунок навантаження з боку повітря (з урахуванням його маси і пружності), а також за рахунок деякої власної згинальної і зсувної жорсткості тощо. В

конструкціях деяких інструментів передбачена можливість зміни сили натягу мембрани і можливість застосування повітряних резонаторів різної конструкції, що дозволяє змінювати співвідношення власних частот коливань мембрани, наближаючи їх до гармонійного ряду, і тим самим отримувати звуки певної музичної висоти.

Прикладом таких інструментів є литаври.

Литаври (timpani) – напівсферичні котли з кованої міді, іноді зі склопластику та інших матеріалів. На верхній широкий отвір котла натягнута мембрана зі шкіри або синтетичної плівки (типу майлар) товщиною ~ 0,12 мм. По ній вдаряють паличками з головками різних розмірів і жорсткості (з дерева, пробки, губки, повсті тощо). На верхівці котла є отвір для виходу надлишку повітря.



Рис. 8.2. Сучасні литаври (Yamaha TP 6329)

Сучасні литаври забезпечені педальним механізмом для регулювання натягу мембран, яке може змінюватися в межах щонайменше 3: 1 (що дозволяє змінювати висоту настройки в досить широкому діапазоні: наприклад, для великої литаври від 82,41 Гц до 130,81 Гц). Крім того, є шість або вісім спеціальних гвинтів навколо отвору котла, за допомогою яких також можна змінювати натяг мембрани.

У литаврах при ударі по мембрані відбуваються пов'язані коливання двох систем: мембрани і обсягу повітря в котлі. Частоти власних коливань ідеальної мембрани є негармонічними, однак жорсткість і маса повітря в замкнутому просторі котла в литаврах істотно впливають на частоти і форми коливань мембрани. Власна згинальна жорсткість мембрани також вносить деякі зміни в спектр власних частот, в основному в діапазоні високих частот.

Акустичні характеристики литавр

Діапазон відтворюваних частот для литавр залежить від їх розмірів: для великих литавр діапазон основних тонів 87,3 Гц-130,8 Гц.

Динамічний діапазон у литавр один з найбільших серед оркестрових інструментів – 80 дБ.

Перехідні процеси характеризуються коротким часом атаки (12-16 мс) і тривалим часом загасання до 2 с. При цьому форми симетричних коливань загасають в середньому за час 0,3-0,5 с, в той же час несиметричні форми коливань загасають набагато повільніше (до 1,7- 2,0 с), і саме вони, передусім, формують тембр звучання литавр.

Характеристика спрямованості литавр залежить від форми коливань мембрани: на симетричній моді коливань мембрана випромінює як ненаправленої джерело, але коливання з цією формою швидко згасають; на основній моді діаграма спрямованості має вигляд диполя (вісімки) в екрані на наступній моді форма діаграми спрямованості набуває характеру квадруполя.

Тембр звучання литавр залежить від матеріалу і величини натягу мембрани, розмірів котла, місця удару і від типу паличок. Жорсткий тип палички (головки зроблені з дерева або пробки) створює різкий тембр за рахунок підкреслення високочастотної частини спектра; м'який тип (головки з губки, м'якої повсті з фланеллю тощо) створює тембр більш глухий і м'який, при цьому спектр виходить більш низькочастотний. Іноді при грі використовується демпфуюча тканина, якою накривається частина поверхні мембрани, створюючи додаткове демпфування (її можна розглядати як особливий тип сурдини) і відповідно більш глухий тембр.

Акустичні характеристики ідіофонів.

Як уже зазначалося, ідіофони – інструменти, в яких використовуються в якості вібраторів тіла, що володіють власною пружністю. Елементи, що коливаються в інструментах такого типу можна розділити на одновимірні (бруски, стрижні, трубки й тощо), двовимірні (пластини різної форми), тривимірні (оболонки).

До першої групи належать музичні інструменти з елементами, що коливаються, найпростішої форми – брусками, стрижнями, трубками. Використовувані в них елементи, що коливаються, можуть бути виготовлені з дерева і різних пластмас (келони, кліперону тощо), скловолокна, як, наприклад, у ксилофона, маримби тощо, або з металу, як у челести, вібрафона, оркестрових дзвіночків, трикутників тощо.

Коливання брусків (стрижнів, трубок) мають ряд особливостей, що відрізняють їх від коливань натягнутих мембран, що, природно, призводить до особливого тембру звучання використовують їх інструментів.

Брусок (як різновид пластинки) – тверде пружне прямокутне тіло, витягнуте в одному напрямку (довжина значно перевищує ширину), стрижень – брусок круглої форми, трубка – порожній усередині стрижень.

Коливання прямокутного бруска можуть бути трьох видів: поперечні, поздовжні, обертальні.

Форми і частоти поперечних коливань бруска залежать від умов закріплення його країв, які можуть відповідати таким видам: «вільний-вільний», «затиснутий-затиснутий», «обпертий-обпертий» або їх різним сполученням. У більшості музичних інструментів (ксилофон, маримба тощо) використовуються бруски з вільними краями.

При ударі по такому бруску молоточком або паличками в ньому збуджуються всі три види коливань: поперечні, поздовжні, обертальні. Основний внесок у випромінювання звуку вносять поперечні коливання, проте на порушення поздовжніх і обертальних коливань витрачається частина енергії. Крім того, при сильних ударах починає позначатися нелінійний характер коливань бруска, при якому відбувається складна взаємодія всіх трьох видів коливань; при цьому поздовжні і обертальні коливання впливають на форму поперечних коливань.

Оскільки власні частоти поперечних коливань брусків знаходяться в негармонійних співвідношеннях, то їх коливання при ударі не може дати відчуття певної висоти тону. Тому щоб створити тональний звук в музичних інструментах, застосовують бруски із спеціально підібраним нерівномірним профілем (ксилофон, маримба, вібрафон), регулюють місце удару по бруску, розташування демпфуючих матеріалів на ньому тощо.

Процеси звукоутворення в ударних інструментах, які використовують коливання брусків, наприклад в ксилофоні, маримбі, вібрафоні тощо, мають багато спільних особливостей.

Ксилофон (xylophone) – настояваний ударний інструмент, що має дуже довгу історію. В сучасних ксилофонах (ксиломаримбах) часто використовуються трубчасті резонатори. Такі резонатори мають непарний набір гармонік із співвідношенням частот (труба, закрита з одного кінця), тому друга гармоніка такої трубки і бруска збігаються. Це підсилює другу частоту бруска і робить тембр звучання більш різким (особливо при використанні жорстких молоточків).



Рис. 8.3. Ксилофон

Оскільки пластинки ксилофона виготовляються в основному з дерева та інших матеріалів, що мають великий коефіцієнт загасання, то верхні обертони швидко згасають, і їх зазвичай не підлаштовують до гармонійного ряду.

Акустичні характеристики ксилофона

Діапазон відтворюваних частот – 174-2093 Гц, тобто 3,5 октави, за рахунок обертонів до 6000 Гц. Великий ксилофон (ксиломаримба) має діапазон 130,81 Гц (C3) до 4186 Гц (C8), тобто, 5 октав.

Кількість обертонів в спектрі ксилофона невелика і вищі обертони негармонійним. В спектрі багато шумових компонентів.

Динамічний діапазон невеликий і становить 25-30 дБ.

Перехідні процеси – час атаки 3 мс (при використанні жорсткого молоточку) і 2 мс (при використанні м'якого молоточка), час спаду (на 30 дБ) – 0,1-0,6 с.

Характеристика спрямованості має на середніх і високих частотах вигляд вісімки, оскільки бруски випромінюють як дипольне джерело (вгору і вниз від площини розташування брусків).

Тембр ксилофона сухий, гострий, «клацаючий».

Акустичні характеристики хордофонів (на прикладі фортепіано)

Фортепіано – це струнний ударний інструмент із застосуванням складного клавішно-молоточкового механізму для спричинення коливання струн. Окрім того, фортепіано належить до групи клавішних інструментів поряд з органом.

Ідея об'єднання струнних інструментів з клавіатурою, що з'явилася вперше на органах в II столітті до нашої ери, була реалізована в кінці XIV століття при створенні клавикорда. У ньому по струні били металеві важелі (тангенти), закріплені в кінці клавіші. На кожну струну було кілька клавіш, які вдарили по ній в різних місцях, в залежності від

необхідної висоти тону. У клавикордів вже використовувалася незалежна дека-дошка на дні корпусу, а також металеві струни і демпфуючий механізм. У 1725 році був створений «вільний клавикорд» (органний майстер Д. Фабер), в якому на кожну клавішу була окрема струна, що поліпшило виконавські можливості інструменту. Незважаючи на широке поширення інструменту до кінця XVII – початку XVIII століття, звучання його залишалося тихим і динамічний діапазон був невеликий.



Рис. 8.4. Клавикорд

Наступним попередником фортепіано можна вважати клавесин, перші зразки якого були виготовлені в Італії на початку XVI століття після багаторічних експериментів. Струни клавесина мали різну довжину і були натягнуті над декою, укладену в дерев'яний ящик. Спричинення коливання струн здійснювалося щипком за допомогою плектра з воронячих пір'їн, що приводяться в дію стрибунцями, укріпленими на кінці клавіші. У ньому вже використовувалася педаль, що дозволяло розширити можливості отримання різних тембрових відтінків. Клавесин досі використовується в концертній практиці і має багато модифікацій і назв (клавічембало, арпсіхорд, кільфлюгель тощо). Хоча клавесин звучав голосніше клавикорда, але звук був монотонним і погано керованим за гучністю.

Ідея створення нового клавішного інструмента, в якому по струнах били б спеціальні молоточки, належала майстру клавесинів Бартоломео Крістофорі. Він в 1709 році побудував в Італії перший струнний ударний клавішний інструмент, який назвав «piano-forte», що підкреслювало можливості отримання великого динамічного діапазону інструмента. У

ньому використовувався дерев'яний молоточок, який за допомогою спеціального механізму розганявся до удару по струні, а потім повертався назад. З кожною клавішею був пов'язаний демпфер, що заглушає струну після відводу молоточка. До 1720 року Б. Крістофорі займався удосконаленням цього механізму, а в 1726 році продемонстрував зрушення клавіатури в сторону за допомогою спеціальних рукояток (прототип лівої педалі).

Винахід Б. Крістофорі почали використовувати такі майстри, як Г. Зільберман, І. Цумпе і А. Штейн, які внесли ряд удосконалень в конструкцію і організували виробництво таких інструментів в Німеччині, Англії та інших країнах. Два століття тому було здійснено ряд змін в конструкції фортепіано: на молоточках замість шкіри почали використовуватися повсті; клавіатура збільшилася від чотирьох до семи з половиною октав; молоточковий механізм був доповнений подвійним репетиційним пристроєм, який було запропоновано французьким майстром С. Ерар тощо. Прагнення підвищити гучність призвело в ХІХ столітті до застосування більш важких і сильно натягнутих сталевих струн, тому з'явилася чавунна рама. При цьому струни почали натягувати в двох площинах: дискантні (високі) струни під басовими за перехресними напрямками (реалізував у 1830 році американський майстер А. Бабкок). У 1855 р. американець Генрі Стейнвей створив великий концертний рояль, в якому використовувалася важка металева лита рама і натяг струн досягнув 14 т (в сучасних роялях воно збільшилося до 20 т). Цей рояль став прототипом для всіх наступних моделей, і хоча невеликі зміни продовжують вводитися дотепер, фундаментальних змін в конструкції рояля з 1855 року не відбувалося. За ХІХ століття були розроблені різні модифікації інструменту: роялі концертні, кабінетні тощо. І їх зменшені модифікації з вертикальною конструкцією рами піаніно (вони вперше були створені в середині ХІХ в. Д. Хокінсом (США) і Р. Ворнумом (Англія)).

Основним джерелом вібрацій служать струни, натягнуті на масивну раму. У великому концертному роялі використовується 240-250 струн (у малих роялях і піаніно 220-230) довжиною від приблизно 1,5-2 м в басовому регістрі до 50 мм у верхньому (дискантному) регістрі. Кожній клавіші відповідає різна кількість струн (група струн, що відповідає одній клавіші, називається хор): перші 8-10 клавіш використовують по одній обвитій струні, наступні 5-7 клавіш - по дві обвитих струни, наступні 7-10 клавіш – по три обвитих струни, і ще 60-65 клавіш – по три не обвитих струни (ці співвідношення можуть відрізнятися у різних типів інструментів). Для отримання необхідної гучності струни

знаходяться під дуже великим натягом – до 120 кг; загальна сила натягу всіх струн в концертному роялі понад 20 тонн.

Процес звуковидобування полягає в такому: механічна енергія при ударі пальцями виконавця по клавіші (механізм генерації) перетворюється за допомогою складної системи важелів (клавішного механізму) в рух молоточка, який вдаряє по струнах (елементах, що коливаються), передаючи їм цю енергію, що призводить до появи в них коливань; при цьому сам він відлітає назад. Коли піаніст звільняє клавішу, клавішний механізм опускає на струну демпфер; при цьому коливання струни досить швидко загасають. Звук безпосередньо від струн слабкий і перестає сприйматися слухом на відстані 3-5 м від інструменту, тому в фортепіано використовується дека (резонатор).

Коливання струн через підставки (Штеген) передаються деці, в якій також порушуються коливання. Оскільки дека має відносно велику площу, звук, що нею випромінюється, забезпечує досить високий рівень акустичної енергії (пропорційний площі випромінювання). Таким чином, дека підсилює звук і модифікує його спектр за рахунок своїх множинних резонансів. Реальний механізм звуковидобування надзвичайно складний і служить предметом численних досліджень.

Специфічна особливість системи видобування звуку в фортепіано полягає в такому: перед тим як вдарити по струні, молоточок відривається від розгінного механізму і «вільно летить» по інерції останню частину шляху. Зіткнення молоточка зі струною відбувається без безпосередньої участі виконавця: він запускає механізм, але не управляє ним після натискання клавіші (він може керувати силою і швидкістю удару тільки в момент зіткнення з нею) – тому тембр звучання інструменту в дуже великій мірі залежить від фізико-механічних параметрів молоточків, струн, деки, клавішного механізму і інших елементів конструкції.

Акустичні характеристики фортепіано

Частотний діапазон основних тонів фортепіано змінюється від найнижчого тону 27,5 Гц (АТ) до найвищого 4186 Гц (С8). У низьких регістрах загальний діапазон з урахуванням обертонів досягає 3 кГц, в верхніх – до 10 кГц і вище.

Спектральний склад звуку істотно розрізняється в різних діапазонах: якщо в нижніх регістрах (нижче 100-250 Гц) в спектрі міститься багато обертонів, при цьому амплітуда фундаментальної (основної) частоти нижче, ніж амплітуди перших обертонів, то при переході до більш високих регістрів кількість чутних обертонів в спектрі

звучу зменшується, амплітуда основної частоти починає домінувати і тембр істотно змінюється.

Формантні складові в спектрі нечітко виражені і знаходяться в діапазоні 500-2000 Гц. У спектрі є шумові компоненти, особливо в діапазоні 200-500 Гц для низьких регістрів і 2 кГц для високих.

Динамічний діапазон фортепіано досягає 45-50 дБ. Для окремо зіграної ноти динамічний діапазон 35 дБ, найгучніший рівень 85 дБ-С (на 10 м) і тихий 50 дБ-А. Зміна гучності істотно впливає на зміну спектрального складу звуку і тембру.

Лекція 10

АКУСТИКА СТРУННИХ МУЗИЧНИХ ІНСТРУМЕНТІВ

1. Утворення звуку у струнних музичних інструментах.
2. Загальна класифікація струнних музичних інструментів.
3. Акустичні характеристики струнних музичних інструментів.

1. Утворення звуку у струнних музичних інструментах

Струнні музичні інструменти – це музичні інструменти, в яких джерелом звуку (елементом, що вібрує) є коливання струн. Відповідно до системи Хорнбостеля – Закса вони називаються хордофонами (*про що йшлося у змісті попередньої лекції*). Типовими представниками струнних інструментів є скрипка, віолончель, альт, контрабас, гітара, бандура, домра, балалайка, комуз, хомус, кілкіяк, кобиз, арфа, гуслі та інші.

Іноді на побутовому рівні кажуть, що дека або корпус «підсилюють» звук струн. Технічно, посилення не відбувається, тому що вся енергія для звучання приходить від струни, що коливається. Насправді резонатор інструменту надає струні в розпорядження велику поверхню. Ця поверхня, що вібрує, передає свої коливання повітряному середовищу, виробляючи гучніший звук.

Досягти тональних характеристик, які будуть ефективні і приємні на слух – це складне мистецтво. Майстри струнних інструментів часто для цього відбирають деревину дуже високої якості, особливо ялина (за її легкість, міцність і гнучкість) і клен (дуже твердий). З ялини робиться корпус струнних інструментів (починаючи від скрипки і закінчуючи до фортепіано).

Акустичні струнні інструменти також можуть бути зроблені з штучних матеріалів, таких як вуглецеве волокно або скловолокно (особливо великі інструменти, типу віолончелі або контрабаса).

Типовим прикладом струнного інструменту, де збудження струни проводиться ударом, є фортепіано (*про що йшлося у змісті попередньої лекції*). У скрипковому сімействі інструментів довгі звуки видобуваються смичком, за допомогою якого до струни прикладається змінна зсувна сила, що підтримує коливання струни. Під дією рухомого смичка струна за рахунок тертя відводиться в сторону, поки через збільшення сили натягу не зривається. Повернувшись у вихідне положення, вона знову захоплюється смичком. Цей процес повторюється, таким чином на струну діє періодична зовнішня сила.

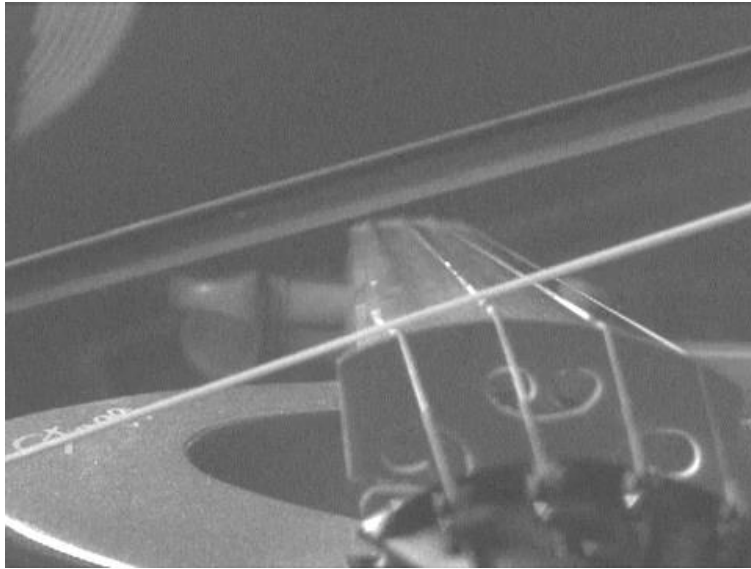


Рис. 10.1. Взаємодія скрипкової струни та смичка

У порядку збільшення розмірів і зниження частотного діапазону основні смичкові струнні інструменти розташовуються так: скрипка, альт, віолончель, контрабас. Частотні спектри цих інструментів особливо багаті обертонами, що, додає особливу теплоту і виразність їх звучанням. У скрипковому сімействі струна, що коливається акустично пов'язана з повітряною порожниною і корпусом інструменту, якими в основному і визначається структура формант, що займають досить широкий частотний діапазон. Великі представники скрипкового сімейства мають набір формант, зміщений в діапазон низьких частот. Тому одна і та ж нота, узята на двох різних інструментах скрипкового сімейства, набуває різну темброве забарвлення через відмінності в структурі обертонів.

2. Загальна класифікація струнних музичних інструментів



Рис. 10.2. Струнні музичні інструменти

Характер і інтенсивність звучання струнного інструменту визначається способом спричинення коливання струн. Цей критерій є в основі найбільш поширеної класифікації струнних музичних інструментів:

1. Смичковий метод – звук зі струн видобувається в основному за допомогою смичка, за допомогою якого до струни прикладається змінна зсувна сила, підтримує коливання струни. До цієї групи належать: альт, віола, віолончель, гудок, кеманча, контрабас, скрипка. Група смычкових інструментів у симфонічному оркестрі, зазвичай, містить 5 партій: 1) перші скрипки; 2) другі скрипки; 3) альти; 4) віолончелі; 5) контрабаси. Іноді додається партія октобаса (субконтрабаса) – (найбільший струнний смычковий музичний інструмент за найнижчим діапазоном, що поєднує риси скрипкового сімейства та сімейства віол).



Рис. 10.3. Струнні смычкові музичні інструменти симфонічного оркестру

2. Щипковий метод – звуковидобування здійснюється щипками струн пальцями або плектром. До цієї групи належать: арфа, бандура, балалайка, вимбі, валіха, домбра, гітара, гуслі, лютня, мандоліна.

У свою чергу щипкові інструменти об'єднують у групи грифових і безгрифових. У інструментів першої групи (гітара, мандоліна та інші) кожна струна в затиснутому стані створює ряд основних тонів, а всі струни разом забезпечують досить широкий частотний діапазон. До другої групи належать інструменти, струни яких не змінюються по довжині в процесі гри (арфа, цитра), тому для створення звучань в широкому частотному діапазоні кількість струн у них має бути великим.

Струни інструментів цього типу після щипка здійснюють власні затухаючі коливання. Потужність таких коливань невелика, а рівні тихих і гучних звуків рівні 42 і 56 дБ. Ось чому динамічний діапазон цих інструментів не перевищує 20 дБ. Особливо він малий у арфи, для якої використовуються струни малої маси і резонатор невеликих розмірів.

3. Ударний метод – звук зі струн видобувається ударами по струні молоточком, паличками або тангетом. Приклад: цимбали.

Існує також дві категорії музичних інструментів, які відносять до струнних, що мають змішаний спосіб звуковидобування. Це ударно-клавішні (фортепіано) і щипково-клавішні (клавесин, спінет) *(про що йшлося у змісті попередньої лекції)*.

Один з найдавніших серед струнних інструментів – арфа. Арфи були зображені в стародавньому Єгипті вже за часів 4-ої Династії (приблизно 26-е століття до н.е.), і вони були дуже великі (понад 1,8 метра). Два типи арф були відомі в Сирійській цивілізації (8-7 століття до н.е.). Найбільш рання арфа з ще існуючих – інструмент від Шумерської цивілізації, приблизно 3000 років до н.е.

Перші ліри також згадуються у шумерів. Ці інструменти були великими, приблизно 3 1/2 фута (1 метр). Їх струни розходилися від звукової коробки по мосту до зв'язки управління. Звук утворювався від перебирання пальцями струн. Через якийсь час ліра стала компактнішою. Інструмент, відомий в Єгипетській цивілізації в 2 тисячолітті до н.е. розташовувався майже горизонтально. Звук видобувався шляхом перебирання струн спеціальною паличкою, попередницею сучасного смичка. Кількість струн на інструментах того періоду відрізнялася у діапазоні між шістьма і дванадцятьма.

Серед струно-смичкових інструментів, представники сімейства віола були поширені всюди в Європі від починаючи з XV до XVII сторіччя, хоча вони з'явилися набагато раніше. На початку XI століття, віоли зображені у візуальних мистецтвах і згадані в літературі. У той час як походження їх достеменно не з'ясоване, це ймовірно час від кінця X сторіччя, коли смичок був визнаний в Європі. Коли скрипка та інструменти, пов'язані з цим з'явилася в XVII столітті, був період, протягом якого ніяке сімейство інструментів не було домінуючим, але віола була переважно замінена скрипкою. Проте, до кінця XVIII сторіччя, найбільш «низький» за звучанням представник цього сімейства, віола da gamba, все ще використовувався як інструмент для соло виконання.

Сімейство скрипки, яке витісняло інструменти сімейства віола, з'явилося в Європі на початку XVI сторіччя і до середини XVI сторіччя

згадувалося в творах того періоду. З тих пір ці інструменти скрипка, альт, violoncello (або віолончель), і контрабас стали головним компонентом оркестрів симфонії і ансамблів камерної музики. У порівнянні з віолою, ці інструменти голосніше і більш чутливі, зі струнами, які є більш важкими і тугими.

Вид інструментів сімейства скрипки було осучаснено в кінці XVI сторіччя.

В кінці XVIII століття, коли основний тон підвищився і з'явилася потреба в більш сильному звуці, скрипка була видозмінена. Міст був піднятий, шия була нахилена під кутом і подовжена, і натяг струн було збільшено. Смичок був схожий на смичок віоли до початку XVIII століття. До кінця XVIII сторіччя, сучасний смичок був удосконалений французом Франкоіс Тоуртом. Найбільш видатні скрипкові інструменти були з Італії, і ніяке інше місто не славалося своїми інструментами більше, ніж Кремона.

Гітари традиційно характеризувалися плоскою задньою частиною, хоча інструменти також існують з задніми частинами, м'яко спрямованими назовні. Зазвичай гітари роблять з клена, бука, ялини або сосни. Інструменти часто прикрашалися інкрустаціями зі слонової кістки, ебенового дерева або перламутру. У той час як старовинні інструменти мали десять або дванадцять струн, сучасні гітари для концерту мають традиційно шість струн. Найбільш видатні інструменти сімейства належать Amati, чії інструменти встановлюють міжнародний стандарт для звуку, і Antonio Stradivari, чиє ім'я все ще синонімічно з неперевершеними скрипками. Незважаючи на те, що гітари існували всюди в Європі, саме в Іспанії вони стали національним музичним інструментом. Головний розповсюджувач і можливий винахідник інструменту в сучасній формі був іспанський романіст Вісент Еспінель, який проживав в XVI столітті в Малазі.



Рис. 10.4. Скрипка

3. Акустичні характеристики струнних музичних інструментів

Як уже зазначалося, проведення смичком по струні спричиняє її коливання різних видів. Це перш за все поперечні коливання, які утворюють сигнал основного тону і його обертонів. Крім цього струна, розтягуючись, коливається в довжину, і навколо своєї осі, за рахунок закручування смичком. Ці поздовжні і крутильні коливання є паразитними, тому, що їх частоти не співвідносяться з висотою отриманого тону. Ці супутні коливання музиканти зазвичай називають «каніфоллю». Для того, щоб зменшити їх, підставка струнних смичкових інструментів конструюється такої форми, щоб не передавати шкідливі коливання зі струни на деку. На високих звуках «каніфоль» стає більш чутною.

Випромінювання всіх струнних смичкових інструментів є направленим. З підвищенням частоти звук концентрується на верхній деці, стає спрямованим перпендикулярно до неї. Так само спрямовані і паразитні коливання.

Всі струнні смичкові інструменти сконструйовані так, що їх корпус менше, ніж це потрібно для резонування на найнижчій ноті. Отже, у всіх струнних смичкових інструментів на найнижчих нотах слабо виражений основний тон.

Як уже зазначалося, скрипка – струнний смичковий інструмент, що набув популярності у XVII столітті. Попередниками скрипки вважають арабський ребаб, іспанську фідель, британську кротту, злиття яких утворило віолу, від якої походить італійська назва скрипки *violino*, а також слов'янський чотирьохструнний інструмент квінтового ладу жига (звідси німецька назва скрипки - *geige*). Тривала протягом декількох століть боротьба між віолою і скрипкою закінчилася перемогою останньої. В якості народного інструменту скрипка особливо широке поширення набула в Білорусії, Польщі, Україні, Румунії, Істрії і Далмації.

Акустичні характеристики скрипки

Динамічний діапазон скрипки становить 40 дБ (35 ... 75 дБА). Нижча частота 196 Гц, що відповідає ноті сіл'ї малої октави. Вища частота основного тону досягає 4 кГц, це вже флажолети. Спектр звуків інструменту досягає 8-10 кГц.

Частотний спектр скрипки має чотири форманти: приблизно в діапазоні 400-500 Гц, 800-1000 Гц, 2-2,6 кГц і 3-4 кГц. Причому, чим ближче вища форманта до 4 кГц, тим якіснішим вважається звук. У старовинних італійських інструментів, наприклад, він має характерну «сиплість».

Альт (скрипковий) – струнний смичковий музичний інструмент такої ж будови, що і скрипка, але більших розмірів, тому звучить в більш

низькому регістрі. Струни альта налаштовані на квінту нижче скрипкових і на октаву вище віолончельних. Попередником альта вважається віола да браччо (італ. Viola da braccio), або віола для руки. Ця віола, як і сучасні скрипки і альти, трималася на лівому плечі, на відміну від віола да гамба (італ. Viola da gamba), які трималися на коліні або між колін. Згодом італійська назва інструменту скоротилося до просто viola, під яким він увійшов, наприклад, в англійську мову, або до Bratsche (спотворене braccio), що закріпилося в німецькій і близьких до неї мов.



Рис. 10.5. Порівняння розмірів скрипки і альта

Акустичні характеристики альта

Характеристики скрипки можна віднести і до альта, якщо не брати до уваги деяких особливостей. Нижній звук альта 131 Гц, а його спектр досягає 9 кГц. На нижній частоті альт майже не резонує. Якщо скрипка на нижніх нотах майже ненаправлена, то ще більшою мірою це є характерним і для альта, оскільки в його звуці менше високочастотних обертонів.

Появу віолончелі зазвичай пов'язують з початком XVI століття. Спочатку вона застосовувалася як басовий інструмент для супроводу співу або виконання на інструменті більш високого регістру. Існували численні різновиди віолончелі, які відрізнялися один від одного розмірами, кількістю струн, ладом (найчастіше зустрічалася настройка на тон нижче сучасної). У XVII-XVIII століттях зусиллями видатних музичних майстрів італійських шкіл (Ніколо Амати, Джузеппе Гварнері, Антоніо Страдіварі, Карло Бергонці, Доменіко Монтаньяна) була створена класична модель віолончелі з усталеним розміром корпусу.



Рис. 10.6. Віолончель

Акустичні характеристики віолончелі

Якість звучання віолончелі суттєво залежить від якості самого інструменту, в більшій мірі, ніж у скрипки. При надлишку високих частот стає чутною «каніфоль», звуки ударів струн по грифу. При нестачі високих частот, або при надлишку низьких частот звучання стає млявим.

Динамічний діапазон віолончелі 35 дБ (від 35 дБ до 70 дБА). Найнижча нота - до великої октави звучить на частоті 65 Гц. Спектр досягає 8 кГц. У віолончелі три діапазони формант: це 250-300 Гц, 400-500 Гц і 1,4-1,5кГц. Вища форманта надає звучання віолончелі деяку «політність».

У віолончелі досить млява атака через велику масу струн, підставки, деки. При грі arco час атаки становить до 500 мс, при грі pizzicato – 15 мс. У момент різкої зміни смичка віолончельна підставка також починає коливатися, що призводить до появи специфічних низькочастотних ударів.

Контрабас – другий найбільший за розмірами і другий найнижчий за звучанням із поширених смичкових струнних музичних інструментів. Має чотири струни (рідше п'ять), налаштовані по квартах. Перша згадка про контрабас датується 1566 роком. Попередником сучасного контрабаса

вважають контрабасову віолу. Вона мала 5 струн, (D1, E1, A1, D, G -ре, мі, ля контроктави, ре, сінь великої октави), і, як більшість віол, мала лади на грифі. В середині XVII століття італійський майстер Мікеле Тодіні на її основі сконструював новий інструмент, на якому не було п'ятої (найнижчої) струни і ладів, проте залишилася форма корпусу і квартовий лад (серед сучасних смичкових інструментів він єдиний з таким строєм). В XX столітті контрабас стає незмінним учасником джазових оркестрів. На відміну від симфонічної музики, в джазовій на контрабасі грають майже винятково прийомом *pizzicato* (не використовуючи смичок). Проте в другій половині XX століття з появою бас-гітари контрабас поступово витісняється з неакадемічної музики цим інструментом.



Рис. 10.7. Контрабас

Акустичні характеристики контрабаса

Контрабас має найнижчий звук зі струнних. Для активного резонансу на нижчих частотах контрабасового діапазону розмір інструменту повинен бути значно більше, ніж він є. При налаштуванні нижньої струни контрабаса на частоту 41 Гц (Е контроктави) фактично корпус інструменту починає резонувати з частоти приблизно 70 Гц, з якою у нього починається формантна частина. Властивість людського слуху відновлювати основний тон з набору його обертонів дозволяє в цьому випадку чути звуки саме тієї октави, де повинен бути цей тон, а не, скажімо, на октаву вище.

Найнижча частота контрабаса 41 Гц (Е контроктави у чотириструнного контрабаса) або 32 Гц (С контроктави у п'ятиструнного

контрабаса). Обертони досягають 5 кГц. Контрабасовий діапазон має дві частини формант. Це діапазони приблизно 70-250 Гц і 400-500 Гц.

Походження гітари достеменно невідоме. Найбільш ранні згадки про струнні інструменти з резонаторним корпусом і грифом, які, ймовірно, є попередниками гітари, належать до II тисячоліття до н. е.. Зображення кіннора (шумеро-вавилонський струнний інструмент, згадується в Біблії) знайдені на глиняних барельєфах при археологічних розкопках в Месопотамії. У Стародавньому Єгипті та Індії також були відомі схожі інструменти: набла, нефер, цитра в Єгипті, вина і ситар в Індії. В Стародавніх Греції і Римі був популярний інструмент кіфара. Попередники гітари мали видовжений округлий пустотілий резонуючий корпус і довгий гриф з натягнутими на нього струнами. Корпус виготовлявся цільним – з висушеного гарбуза, панцира черепахи, або видовбаним з цільного шматка дерева. У III-IV століттях н. е. в Китаї з'являються інструменти жуань (або юань) і юецінь, у яких дерев'яний корпус збирався з верхньої та нижньої деки обичайки, що їх з'єднувала.

В Європі це викликало появу латинської і мавританської гітар близько VI століття. На думку деяких дослідників, найбільш раннє зображення подібного інструмента зустрічається на надгробній стелі з Меріди. Більш архаїчними виглядають зображення «сітари з грифом» на мініатюрах з Утрехтського псалтиря (820-830 pp.). Штутгартський псалтир, виконаний в скрипторіумі абатства Сен-Жермен-де-Пре (820-830 pp.) також містить кілька мініатюр, на яких можна побачити струно-щипкові музичні інструменти, що мають вже усі основні риси гітари: резонаторний корпус, гриф і коробкою з кілками. Струни (від трьох до шести) прикріплюються до круглого виступу на нижньому краї корпусу і призводяться коливання з допомогою плектра. Латинське слово *cithara*, яким названі інструменти в описаному псалтирі, походить від грецького слова «кіфара» і в епоху середньовіччя набуває форми: *kithare*, *quithare*, *quitharre*.

Пізніше, в XV-XVI століттях з'явився інструмент віуєла, який, ймовірно, також вплинув на формування конструкції сучасної гітари.

Основним середньовічним центром розвитку гітари була Іспанія, генезис якої зазвичай пов'язують з арабським впливом (мавританська гітара). У XV столітті набуває поширення винайдена в Іспанії гітара з 5 здвоєними струнами. Такі гітари отримують назву іспанських. До кінця XVIII століття іспанська гітара в процесі еволюції отримує 6 одиночних струн і чималий репертуар творів.

Наразі поширеними є два різновиди гітар: класична гітара (має нейлонові струни) та акустична гітара (має металеві струни), що відрізняються не лише розмірами, але і будовою та призначенням.



Рис. 10.8. Класична гітара (верхнє зображення) та акустична гітара (нижнє зображення)

У свою чергу акустичні гітари об'єднують декілька різновидів, які відрізняються розмірами і конструкцією.



Рис. 10.9. Різновиди акустичних гітар

Акустичні характеристики акустичної гітари

Частотний діапазон от 82 Гц до 1175 Гц (у стандартному строї – три октави – від Мі великої октави до Мі першої октави. Обертони гітари досягають 13 кГц. Динамічний діапазон 40-55 dB. Резонанс, пов'язаний з особливостями виготовлення гітари, зазвичай відбувається на частоті близько 100 Гц. У гітари три діапазони формант: це 200-240 Гц, 2,2-2,5 кГц і 3-3,5 кГц.

Лекція 11

АКУСТИКА ДУХОВИХ МУЗИЧНИХ ІНСТРУМЕНТІВ

- 1.** Загальна класифікація духових музичних інструментів та утворення звуку у них.
- 2.** Акустичні характеристики дерев'яних духових музичних інструментів.
- 3.** Акустичні характеристики мідних духових музичних інструментів.

1. Утворення звуку у духових музичних інструментах

Гра на більшості духових інструментів пов'язана з використанням людського дихання. Звідси походить їх назва: старовинне слов'янське слово «дух» означає повітря. Звучить у будь-якому духовому інструменті стовп повітря всередині інструменту.

За способом звукоутворення, по елементу, що вібрує, який приводить стовп повітря в коливання, духові інструменти діляться на флейтові, язичкові і мундштучні.

Флейтові (лабіальні або свистячі) духові музичні інструменти.

Вібрує у цих інструментах струмінь повітря, який розсікається об гострий край лабіального отвору або стінки стовбура. До флейтових належать:

1) окариновидні інструменти – різні керамічні свистульки з ігровими отворами;

2) поздовжні флейти: відкриті – інструменти, стовбур яких відкритий з обох кінців;

3) багатостовбурні – інструменти, що представляють собою набір трубок різних розмірів, причому один з кінців кожної трубки закритий, інший відкритий;

4) свисткові – інструменти, в верхній кінець (голівку) стовбура яких вставляється втулка, губа або язик виконавця, що утворюють щілину, через яку струмінь повітря спрямовується на гострий край зрізу свисткового отвору;

5) поперечні флейти – інструменти з одним закритим кінцем (головкою), де є звуковий отвір, на край якого спрямовується струмінь повітря.

Язичкові духові музичні інструменти.

Вібрує у цієї групи інструментів є еластична пластинка – переривник (тростина, пищик). До язичкових належать:

1) інструменти з одинарним або подвійним язичком, що б'ється;

Всі інструменти цієї групи можуть бути класифіковані (за типом тростин і за формою основної труби-резонатора) на п'ять груп:

1) інструменти з вільним язичком: у вигляді берестяної пластинки, трав'яного листа тощо;

2) з циліндричною трубою з одинарної тростиною: кларнет, деякі язичкові труби органу;

3) з конічною трубою з подвійною тростиною: гобой, фагот, англійський ріжок і ін.;

4) з конічною трубою з одинарною тростиною: саксофон;

5) інструменти язичком, що проскакує: гармоніки, фісгармонії та інші.

Мундштучні духові музичні інструменти.

Елементом, що вібрує у цих інструментів є відповідним чином зімкнуті і зібрані губи виконавця. Положення, ступінь пружності і гнучкості губних і лицьових м'язів виконавця, їх тренуваність, витривалість і сила при грі на духовому інструменті прийнято називати амбушуром. Виконавці на мундштучних інструментах щільно приставляють губи до мундштука, а струмінь повітря, що посиляється, викликає їх вібрацію. Таким чином, на відміну від всіх інших духових інструментів у мундштучних амбушур не просто бере участь в процесі звукоутворення, а є спричинює коливання. І хоча виконавці на флейтових і язичкових інструментах також повинні мати амбушур (флейтист з його допомогою направляє струмінь повітря на зріз інструменту, виконавець на язичкових інструментах, охоплюючи тростину губами, за допомогою амбушюра управляє її вібрацією), саме мундштучні інструменти називають амбушурними.

Частота коливань стовпа повітря в трубці духового інструменту (висота звуку) залежить від довжини трубки. При збільшенні її довжини частота коливань зменшується (висота звуку знижується), при зменшенні довжини частота коливань збільшується (висота звуку підвищується). Крім того, шляхом збільшення напруги амбушюра і швидкості повітря, що вдихається (передування) стовп повітря можна змусити вібрувати не тільки повністю, але і розділеним на 2, 3, 4 тощо рівні частини. Стовп повітря, що звучить повністю, дає основний тон. Стовп повітря, розділений на дві рівні частини, звучить на октаву вище основного тону, на три рівні частини – дуодецимою вище основного тону, на чотири рівні частини – двома октавами вище основного тону тощо. Ця послідовність звуків, що утворюється на духовому інструменті шляхом передування, називається натуральним звукорядом, а самі звуки – натуральними або

обертонами. На гобої, кларнеті, фаготі передування відбувається за допомогою спеціальних «октавних» клапанів.

Як уже зазначалося, абсолютна висота основного тону залежить від довжини трубки інструменту, але інтервали між обертонами не залежить від абсолютної висоти основного тону, а завжди залишаються постійними: між першим і другим обертоном – чиста октава, між другим і третім – чиста квінта, між третім і четвертим – чиста кварта тощо. Інтервали між обертонами не відповідають однойменним інтервалам рівномірно-темперованого ладу, однак ця невідповідність не настільки велика, щоб не вживати натуральні звуки в практиці. Виняток становлять сьомий, одинадцятий, тринадцятий і чотирнадцятий обертони, які настільки відрізняються від відповідних звуків рівномірно-темперованої гама, що сприймаються на слух як фальшиві. Незважаючи на це до винаходу хроматичних інструментів вони широко використовувалися при грі на натуральних валторна і трубах.

Духові музичні інструменти відомі з доісторичних часів. Імовірно в епоху палеоліту (приблизно 80-13 тисяч років до н. е.) з'явилися флейта, труба, труба-раковина; в епоху неоліту (приблизно 5-2 тисячі років до н. е.) флейта з ігровими отворами, флейта Пана, поперечна флейта, поперечна труба, дудки з одинарним язичком, носова флейта, металева труба, дудки з подвійним язичком.

Флейтові і язичкові духові інструменти являють собою порожнисті трубки циліндричного або конічного, а іноді і обернено-конічного перетину. Найпростіші флейтові і язичкові інструменти давали можливість отримувати на них лише невелику кількість натуральних звуків. На флейті Пана поступенева звукова шкала досягалася за допомогою трубок різної величини (чим коротше трубка, тим вище звук). Однак їх зміна в процесі гри ускладнювала техніку виконання. Виникла думка спробувати варіювати довжину повітряного стовпа в межах однієї трубки, просвердливши в ній отвори. Відкритий отвір дозволяв повітрю, яке посилається виконавцем в інструмент, вийти з трубки раніше її закінчення, що вкорочувало повітряний стовп і таким чином підвищувало звук. Отвір, закритий пальцем, відновлював цілісність трубки.

Флейта набула широкого поширення в Стародавньому Єгипті (мем – поздовжня флейта з п'ятьма ігровими отворами і собі – поперечна), Палестині (угаб – поздовжня відкрита флейта), в Китаї (пайсяо – різновид флейти Пана; сяо – поздовжня бамбукова флейта з шістьма ігровими отворами; ді – бамбукова поперечна флейта з шістьма ігровими отворами, чотирма отворами для підстроювання і одного для забарвлення тембру;

сюань – поздовжня глиняна флейта з шістьма ігровими отворами), Індії (Ванш – поперечна флейта і Лайю – поздовжня). В значно меншій мірі інструмент був поширений у Стародавній Греції та Римі. Це різновиди сірінкс (сопілки): флажолет (високий по регістром різновид поздовжньої флейти) з ігровими отворами і флейта Пана.

У країнах Стародавнього світу крім флейт широке поширення мали язичкові інструменти. У Стародавній Греції одним з найулюбленіших інструментів був авлос – циліндрична або конічна трубка з 3-4 або 6 ігровими отворами і з подвійною тростиною. Виконавець зазвичай користувався двома авлос одночасно. На одному звучала мелодія, на іншому – супроводжуючий її незмінний тон. В останньому столітті до нашої ери авлос був вдосконалений. Число ігрових отворів збільшилася до 15. Деякі з них закривалися обертовими кільцями, що полегшувало процес виконання. Авлос супроводжував театральні вистави, гімнастичні вправи, використовувався він і у військових походах. Популярні були Піфійський (низький) і хоровий (високий) авлос. У Римі авлос називався тібією.

Виникнення європейського гобоя пов'язано з двома середньовічними типами східного гобоя. Це індійська зурна і арабський замр. Європейські музиканти застосовували східний спосіб гри: тростину інструменту повністю знаходилася в роті і вільно вібрувала, чому звук виходив дуже гучним і монотонним. В епоху Середньовіччя виникло відгалуження гобойної групи – сімейство західноєвропейських сопілок з конічним стволом. Дискантові і сопранові сопілки називалися шалмеями, альтові і тенорові – поммерами, басові – бомбардами або великими басовими поммерами. Ці інструменти мали діатонічний звукоряд майже в дві октави і мали різні лади. Загальний діапазон сімейства сопілок становив до кінця XVI ст. п'ять з половиною октав: від фа контроктави до сі третьої.

Удосконалення дерев'яних духових інструментів пов'язано, насамперед, зі збільшенням числа ігрових отворів. Розташовуючись на певних відстанях один від одного, вони стали розділятися на основні і на отвори з клапанами. Останні в свою чергу ділилися на отвори з клапанами, що спочатку знаходяться в закритому положенні і на отвори з клапанами, що спочатку знаходяться у відкритому положенні.

Основні отвори дали можливість отримати основний діатонічний звукоряд інструмента. Як правило, вони прикриваються кільцями (вічками), з'єднаними зі спеціальними коригуючими клапанами. Отвори з клапанами, що знаходяться в закритому положенні і відкриваються при натисканні, дають можливість отримати на інструменті альтеровані тони. Отвори з кла-

панамі, що знаходяться у відкритому положенні і закриваються при натисканні, використовуються для отримання найнижчих звуків інструменту.

У гобоя, кларнета і фагота є ще октавні клапани. Вони знаходяться з протилежного боку від основних отворів і допомагають виконавцю здійснювати передування. Для октавного обертоу використовується та ж аплікатура, що і для основного тону (на фаготі більш ускладнена), тільки весь звукоряд інструмента буде звучати на октаву вище.

Флейта, гобой і фагот належать до «октавуюючих» інструментів. Вони дають як парні, так і непарні обертони. Кларнет є «квінтуючим» інструментом, оскільки при передуванні він дає відразу квінту через октаву від основного тону. Парні ж обертони отримати на ньому неможливо.

Попередниками сучасних мідних духових інструментів були раковини і роги, що виникли ще в доісторичну епоху. Прості роги, виготовлені з рогів тварин і навіть бивнів слона, широко використовувалися в тих випадках, коли потрібно було видати сигнал, що перевершує за силою людський голос. Вони видавали по кілька натуральних звуків, тембрально невиразних, з переважанням низьких обертонів.

У Стародавньому Єгипті, Палестині, Греції, Римі широке поширення як військового і сигнального інструменту отримала пряма металева натуральна труба. У Стародавньому Китаї використовувалися бронзові труби так-чун-ку (з великим розтрубом) і сяо-чун-ку (з малим розтрубом). У Стародавній Індії були поширені: найдавніший духовий інструмент шанкха (труба з морської раковини) і рана-срінга (ріг).

У первіснообщинному суспільстві слов'янські дружини мали найпростіші музичні інструменти. Для збору дружини і подачі військових сигналів застосовувалися роги турів. У літописах X-XI ст. згадуються труби і бубни, а на фресках Київського Софійського собору (XI ст.) зустрічаються зображення флейт і прямих труб. В Іпатіївському літописі 1151 р. сказано про те, що рух військ в київських дружинах починався під звуки труб.

У XII в. відбувся поділ між трубами і рогами. Труби використовувалися у військовій практиці, роги перейшли в сторожовий, мисливський побут. В епоху хрестових походів труби стали приналежністю привілейованих класів (1096-1270), за своїм значенням вони були прирівняні до зброї.

Прості роги використовувалися багатьма народами Європи аж до Середовіччя. Розрізнялися три типи рогів: малі (цинки), середні і повні, або половинні. Виготовляли їх з рогу буйвола. У XIV ст. стовбур рогу почали згинати. Так були створені кільцеподібні вигнуті мисливські або лісові роги, а в кінці XV – початку XVI ст. – кілька менших розмірів

сигнальні (поштові). На початку XVI ст. в Німеччині з'явилися мисливські роги в три оберти.

Подальше вдосконалення мідних духових інструментів пов'язано перш за все з поповненням їх натурального звукоряду. В результаті на довгих вузькомензурних 12 інструментах з'явилася можливість отримувати натуральний звукоряд з другого по шістнадцятий обертон, а на коротких широкомензурних – з другого по шостий-восьмий обертони. Разом з удосконаленням мідних духових інструментів удосконалювалася і виконавська техніка. Так, в кінці XVII – початку XVIII в. виникла нова техніка гри – кларіно (від лат. *clarus* – ясний). Вона полягала в максимальному використанні верхнього відрізка натурального звукоряду, де послідовність видобутих звуків стає поступеневою. Постійне використання верхнього регістру інструменту (труби або валторни) вимагало від виконавця високої майстерності. Найвищі досягнення цієї техніки знайшли відображення у творчості композиторів А. Вівальді (1678-1741), Г. Генделя (1685-1759) і Й. С. Баха (1685-1750).

Пошуки, пов'язані зі створенням хроматичних мідних духових інструментів, найбільш наочно простежуються на прикладі удосконалення валторни. Часом ці пошуки приводили і до абсолютно несподіваних результатів. Так, досвід зі створення валторни з клапанами, здійснений в 1760 р Ф. Кельбелем, привів до створення бюгельгорнів – широкомензурних інструментів з клапанами, що набули широкого поширення в духових оркестрах.

Вентильний механізм, винайдений на початку XIX ст., значно розширив можливості мідних духових інструментів, хоча в тембровому відношенні натуральні інструменти перевершували хроматичні. Вентильний механізм буває двох видів: помповий (пістони) і такий, що обертається. Помпу вперше застосували берлінські майстра Ф. Блюмель і Г. Штьольцель в 1814 р. для валторни. Конструкція вентиля, що обертається, була створена в 1832 р. П. Рідлем з Відня. Вентильний механізм складається з декількох додаткових трубок або кронів різної довжини. Кожному з крону відповідає свій вентиль, який включає крон в основну трубку і відповідно знижує весь стрій інструменту.

Всі хроматичні мідні духові інструменти, крім тромбона, забезпечені трьома основними вентилями. Перший вентиль знижує весь лад інструменту на 1 тон, другий – на 1/2 тону, третій – на 2,5 тони. Всі три вентиля, натиснуті разом, знижують лад інструменту на 3 тони. Таким чином хроматично заповнюються всі інтервали між натуральними звуками (крім октави між I і II). Необхідно враховувати, що при включенні кронів

окремо звукоряд основний трубки знижується точно на необхідну величину: для зниження на $1/2$ тону довжина основної трубки повинна бути збільшена на $1/15$ її частина, для зниження на тон – на $1/8$, для зниження на півтора тону – на $1/5$. При включенні ж двох або трьох кронів одночасно – співвідношення різко зміниться. Так, якщо одночасно з першим натиснути третій вентиль, довжина його крона становитиме вже не $1/5$ довжини основної трубки, а дещо меншу величину, оскільки до довжини основної трубки вже додалася довжина першого крона. При включенні всіх трьох кронів одночасно ця різниця стане ще більш відчутною (замість зниження на 3 тони загальний звукоряд знизиться на $2,3 / 4$ тони). Тому кожен крон роблять дещо довше розрахункового, що лише незначно знижує звуки при натисненні будь-якого одного вентиля. Зате при комбінації вентилів виходять інтонаційно чистіші звуки. Проте, в комбінаціях за участю третього вентиля розрахункові співвідношення між основною і додатковими трубками значно змінюються.

Застосування на деяких інструментах четвертого вентиля (квартвентиля) дає можливість хроматично заповнити інтервали між I і II обертонами, але практично всі звуки, взяті за допомогою комбінацій вентилів, звучать значно вище, причому при одночасному натисканні всіх чотирьох вентилів замість зниження на $5,1 / 2$ тонів основний звукоряд знизиться всього на 5 тонів. Однак застосування квартвентиля спрощує комбінації вентилів. Крім того, застосування квартвентиля збільшує діапазон інструменту на велику терцію вниз.

Кулісний механізм має єдиний інструмент – тромбон.



Рис. 11.1. Духові музичні інструменти

Отже, флейтові і язичкові інструменти, які використовуються в професійному виконавстві, прийнято називати дерев'яними духовими, незважаючи на те, що далеко не завжди матеріалом для їх виготовлення є дерево; мундштучні – мідними духовими інструментами.

2. Акустичні характеристики дерев'яних духових музичних інструментів

Звучання у дерев'яних музичних інструментах, як уже зазначалося, спричиняється коли повітря потрапляє на гострий край стінки резонатора, або коливаннями гнучкої поверхні язичка в повітряному потоці. В обох випадках в локалізованій частині інструменту виникають періодичні зміни тиску.

Перший з цих способів звукоутворення заснований на виникненні «крайових тонів». Коли з щілини виходить потік повітря, що розбивається клиноподібною перешкодою з гострим краєм, періодично виникають вихори – то по одну, то по іншу сторону клина. Частота їх утворення тим більше, чим більше швидкість повітряного потоку. Якщо такий пристрій акустично пов'язано з резонуючим повітряним стовпом, то частота крайового тону «захоплюється» резонансною частотою повітряного стовпа, тобто частота утворення вихорів визначається повітряним стовпом. В таких умовах основна частота повітряного стовпа захоплюється тільки тоді, коли швидкість повітряного потоку перевищить деякий мінімальне значення. У певному інтервалі швидкостей, що перевищують це значення, частота крайового тону дорівнює цій основній частоті. При ще більшій швидкості повітряного потоку (наближеній до тієї, при якій крайова частота під час відсутності зв'язку з резонатором дорівнювала б другій гармоніці резонатора) крайова частота стрибком подвоюється і висота тону, що випускається всією системою, виявляється на октаву вище. Це і називається передуданням.

Крайовими тонами порушуються повітряні стовпи в таких інструментах, як орган, флейта і флейта-пікколо. При грі на флейті виконавець створює крайові тони, дуючи збоку в бічний отвір поблизу одного з кінців. Ноти однієї октави, починаючи з «ре» і вище, отримують за рахунок зміни ефективної довжини стовбура, відкриваючи бічні отвори, при нормальному крайовому тоні. Вищі ж октави отримують передуданням.



Рис. 11.2. Велика концертна флейта

Частотний діапазон звучання великої концертною флейти становить: для основних тонів від 246,94 Гц (В3) до 2489,02 Гц (Еь7), проте ноти нижче С4 і вище С7 важко видобуваються, тому зазвичай використовується діапазон від 261,6 Гц (С4) до 2093,0 Гц (С7). При виконанні на досить гучному рівні повний частотний діапазон за рахунок обертонів має верхню межу приблизно до 6 кГц. Для флейти-пікколо основний діапазон становить 587,3 Гц (D5) -4186 Гц (С8). Характерною особливістю флейти є плавний спад амплітуд парних і непарних гармонік щодо амплітуди основної частоти.

Динамічний діапазон становить 25 дБ на низьких і 10 дБ на високих частотах. Максимальний рівень (ff) для низьких нот досягає 75 дБ-С, для високих нот – 85 дБ-С (на відстані 9 м від інструменту). Тихі рівні (pp) зростають від 50 дБ-А для низьких тонів до 75 дБ-А для високих.

Перехідні спотворення: час атаки звуку у флейти найдовший серед групи дерев'яних інструментів.

Тривалість наростання звуку зменшується з підвищенням тону від 100 мс до 30 мс.

Коефіцієнт корисної дії цього інструменту низький, менше 1%, гра на флейті вимагає великого обсягу повітря при неекономічному його витрачанні. Характеристика спрямованості залишається досить широкою до високих частот, оскільки діаметр вихідного отвору малий у порівнянні з довжиною хвилі. Є досить значне випромінювання від амбушурних отворів і від відкритих бічних отворів, які починають випромінювати з частоти близько 2 кГц.. Тембр звучання флейти чистий, світлий, прозорий в середньому регістрі, що переходить в різкі свистячі звуки в високому регістрі.

Інший спосіб звучання духового інструменту заснований на періодичному перериванні повітряного потоку язичком, який називається тростиною, так як виготовляється з тростини. Такий спосіб застосовується в різних дерев'яних і мідних духових інструментах. Можливі варіанти з

одиначною тростиною (як, наприклад, в кларнеті, саксофоні) і з симетричною подвійною тростиною (як, наприклад, в гобої і фаготі). В обох випадках коливальний процес однаковий: повітря продувається через вузьку щілину, в якій тиск відповідно до закону Бернуллі знижується. Палиця при цьому втягується в щілину і перекриває її. За відсутності потоку пружна тростина випрямляється і процес повторюється.

Резонансна частота тростини у кларнета складає приблизно 1500-3000 Гц.

Частотний діапазон: для сопранового кларнета in B діапазон основних частот 146,8 Гц (D3) -1864,7 Гц (B₆) (для кларнета in A на півтону нижче); для бас-кларнета in B 58,27 (B₁) -698,46 Гц (F₅); для пікколо-кларнета in Es 196 Гц (G₃) -2093 Гц (C₇)



Рис. 11.3. Кларнет

Спектр досить багатий обертонами, тому повний частотний діапазон може досягати 7 кГц (при виконанні ff навіть до 12 кГц). Цікаво, що в спектрі звуків нижніх регістрів чітко видно практично повну відсутність парних гармонік, різниця в рівнях непарних і парних гармонік досягає 25 дБ, в верхніх регістрах парні гармоніки присутні приблизно з однаковими рівнями. У спектрі є дві слабкі формантні частини: 1500-1700 Гц і 3700-4300 Гц.

Динамічний діапазон у кларнета найширший з дерев'яних інструментів, які використовуються в оркестрі. На низьких частотах він становить близько 35 дБ, на середніх – 50 дБ, на високих – 25 дБ. Найгучніші звуки – 80 дБ-С (можуть досягати рівня 90 дБ-С на високих частотах), найтихіші – близько 45 дБ-А (на відстані 9 м від інструменту).

Перехідні процеси, атака звуку ясна і чітка, відбувається плавне наростання амплітуд всіх гармонік, час наростання – 15-20 мс при гострій атаці і доходить до 50 мс при м'якій.

Наявність бокових отворів, що виконують функцію фільтру високих частот, призводить до складної структури характеристики спрямованості: на низьких частотах вона має кругову форму, вище частоти 1000

Гц випромінювання відбувається в основному з отворів, а на частотах вище 3000 Гц гостра пелюстка звужується і прямує вниз, звук надходить до слухачів за рахунок відбиття від підлоги. Тільки якщо розтруб кларнета спрямований на тверду поверхню підлоги, буде забезпечений високий рівень відображених високочастотних звуків для слухачів.

Тембр: через низький рівень парних гармонік в нижніх регістрах спектра тембр кларнета дещо глухуватий, гучний; в середніх регістрах – чистий (сопрановий) звук; в високих регістрах – різкий (свистячий). На тембр відчутно впливає настройка частоти зрізу фільтра високих частот за рахунок отворів: якщо при всіх відкритих отворах частота зрізу вище 1500 Гц – тембр більш яскравий, якщо нижче – більш глухий.

Гобой – музичний інструмент з групи духових з подвійною тростиною.



Рис. 11.4. Гобой

Принцип звукоутворення в цих інструментах аналогічний однотростевим інструментам (наприклад, кларнету), однак в них використовуються подвійні тростини і конічна форма труб. Власні резонанси тростин зазвичай 2000-3000 Гц, резонанси труби значно нижче, тому в діапазоні низьких частот труба активно «управляє» коливаннями тростин. Музиканти за ігровими властивостями поділяють тростини на легкі, середні і важкі.

Основний частотний діапазон гобоя – від 233,1 (В3) до 1567,98 Гц (G6), з урахуванням обертонів він досягає 9 кГц (навіть 12 кГц при ff).

Максимальна енергія в спектрі 500-1500 Гц, є дві виражені формантні частини 1400 Гц і 3000 Гц (слабка форманта є в приблизно на частоті 4500 Гц).

Динамічний діапазон для нижніх регістрів складає 20 дБ, для середніх частот – 30 дБ, для високих – 25 дБ.

Максимальний рівень звукового тиску (при ff) досягає 75 дБ-С нижче S_6 і 80 дБ-С вище, мінімальний (pp) – 50 дБ-А (на відстані 9 м).

Перехідні процеси: гобой має коротку ясну атаку, тривалість якої 40 мс для нижніх нот і 20 мс для високих (на найвищих вона може становити навіть 10 мс); для м'якої атаки можливе збільшення часу встановлення до 100 мс в нижньому регістрі і до 40 мс в верхньому;

В діапазоні середніх частот також є сильне випромінювання через бокові отвори, в діапазоні понад 4 кГц випромінювання направлено вниз, і звук потрапляє до слухачів в основному за рахунок відбиття від підлоги.

Тембр в низькому регістрі грубуватий, носовий; в середньому – чистий, приємний схожий на флейту; в високому – світлий, різкий.

3. Акустичні характеристики мідних духових музичних інструментів

Мідні духові інструменти. У мідних інструментах (в тому числі валторна, труба, корнет-а-пістон, тромбон, горн і туба) звук утворюється губами, дія яких в поєднанні з мундштуком особливої форми багато в чому аналогічна дії подвійний тростини. Тиск повітря при звукоутворенні тут значно вище, ніж в дерев'яних духових. Мідні духові, як правило, представляють собою металевий ствол з циліндричної і конічної секціями, що закінчується розтрубом. Секції підібрані так, що забезпечується повний спектр гармонік. Повна довжина ствола має межі від 1,8 м для труби до 5,5 м для туби. Туба закручена у вигляді равлика для зручності в використанні, а не з акустичних міркувань.

При фіксованій довжині стовбура в розпорядженні виконавця є тільки ноти, які визначаються власними частотами стовбура (причому основна частота зазвичай «не береться»), а вищі гармоніки створюються підвищенням тиску повітря в мундштук. Так, на горні фіксованої довжини можна взяти лише кілька нот (другу, третю, четверту, п'яту і шосту гармоніки). На інших мідних інструментах частоти, що лежать між гармоніками, «беруться» зі зміною довжини стовбура. Унікальний в цьому сенсі тромбон, довжина ствола якого регулюється плавним переміщенням висувною U-подібною кулісою. Перебір нот всього звукоряду забезпечується сім'ю різними позиціями куліси зі зміною обертонів стовбура, що створюються. В інших мідних інструментах це досягається шляхом ефективного збільшення повної довжини стовбура за допомогою трьох бічних каналів різної довжини і в різних комбінаціях. Це дає сім різних довжин стовбура. Як і на тромбоні, ноти

всього звукоряду беруться через утворення різних серій обертонів, які відповідають цим семи довжинам стовбура.

Прикладом таких духових інструментів є труба. Частотний діапазон (труби in B) – основні тони 164,8 Гц (E3) – 1046,5 Гц (C6). (Верхній діапазон труби істотно залежить від виду музики, в останні роки використовується діапазон до F6.) Повний діапазон разом з обертонами досягає 8 кГц.



Рис. 11.5. Труба

В спектрі багато високочастотних гармонік, є виражені формантні частини: перша – 1200-1400 Гц, друга – 2500 Гц. Динамічний діапазон – 35 дБ в низькому регістрі, 15 дБ в високому, рівень звукового тиску від 83 дБ-С до 93 дБ-С (на 14 м), так що це один з найгучніших інструментів оркестру.

Перехідні процеси: тривалість наростання 25-30 мс в нижніх регістрах і 20 мс в верхніх. Характерною особливістю процесів атаки у труб є виникнення короткого імпульсу (тривалістю 5 мс) через 10-15 мс після початку атаки за рахунок появи високих обертонів з частотами в області 2-3 кГц. При «м'якій» атаці тривалість перехідних процесів може досягати 180-150 мс в нижньому і середньому регістрі.

Характеристика спрямованості: звук випромінюється тільки вперед через розтруб, ширина пелюстки плавно загострюється до високих частот.

Тембр – сильний, блискучий в середньому регістрі; різкий, пронизливий в верхньому.

Динамічний діапазон – в середньому становить 37 дБ, при цьому найгучніші звуки мають рівень 95 дБ-С (на відстані 16 м від виконавця). Слід зазначити, що рівень звукового тиску з переходом до високих регістрів зростає: якщо на низьких нотах на тихих рівнях (pp) можна отримати 40 дБ-А, то в високих регістрах він піднімається до 70 дБ-А.

Перехідні процеси: час наростання 40 мс в нижніх регістрах і 20 мс в верхніх.

Характеристика спрямованості звужується до верхніх частотах головна пелюстка, спрямована вгору.

Тембр: в нижньому регістрі потужний, серйозний; в середньому регістрі – дуже яскравий, чіткий, блискучий.

Труба і валторна призначені для гри в набагато ширшому діапазоні гармонік, ніж, наприклад, у горна. Партія труби, що солює, в творах І.Баха містить багато пасажів у четвертій октаві ряду, що доходять до 21-ї гармоніки цього інструменту.

Туба – найнижчий за звучанням мідний інструмент, має довгу згорнуту в кілька разів трубу з великим розтрубом. Наразі використовуються туби різних розмірів і діапазонів: тенорова (in B), басова (in Es) і контрабасова (in B).



Рис. 11.6. Туба

Частотний діапазон: для контрабасової туби in B, у Східній Європі, діапазон основних частот становить 30,87 Гц (B0) 349,2 Гц (F4). Повний діапазон 1-1,5 кГц для низьких нот, 1,5-2 кГц для високих, є форманта в діапазоні 210-250 Гц.

Динамічний діапазон: на відстані 16 метрів від інструменту можна отримати рівень 54 дБ-А (in), 74 дБ-В (mf), 87 дБ-С (ff). Середній використовуваний динамічний діапазон 20 дБ.

Перехідні процеси: час наростання для низьких нот складає 60 мс (в області C1), для середніх – 40 мс (C2), для високих – 25 мс (C3). Таким чином, туба має порівняно з іншими мідними інструментами коротку атаку, оскільки в спектрі у неї є мало обертонів і вони досить швидко встановлюються.

Характеристика спрямованості: головна пелюстка спрямована вгору від розтруба, вона плавно загострюється до високих частот. Тембр: суровий, масивний, глибокий.

Тромбон (італ. Trombone, букв. «Велика труба», англ. і фр. Trombone) – європейський духовий амбушурний інструмент. Складається з довгої тонкої згорнутої металевої трубки з висувною U-кровою (кулісою), розтруба, мундштука. За всю історію існування зазнав мінімальних конструктивних змін. З'явився в XV столітті, сучасний вигляд набув в середині XIX століття.



Рис. 11.7. Тромбон

Основний тон тромбону можливо отримати тільки на перших трьох-чотирьох позиціях. Називається він педальним звуком і видобувається з певною обережністю і неголосно.

Блискучому звучанню тромбона в великою мірою сприяє його трубка, мало заокруглена і без додаткових завитків і крон, неминучих при механізмі вентилів. Куліса висувається правою рукою, ліва рука притримує інструмент.

При 7-й позиції права рука повністю витягнута вперед, і куліса знаходиться на решті трубіці лише найменшою своєю частиною. Якщо потягнути кулісу ще трохи далі, то вона просто зніметься з трубки (спаде з штехів).

Діапазон тромбона від сіль контроктави, до фа другої октави. Тембр – яскравий і світлий в верхньому регістрі; благородний і твердий – в середньому; таємничий, похмурий і навіть зловісний – в нижньому. Звук тромбона дуже багатоманітним, він може створювати святковий і драматичний ефект.

Тромбон володіє дуже красивим густим і «соковитим» звуком. Його динамічний діапазон дорівнює 36 дБ. Частотний діапазон основних тонів 50 – 580 Гц. Тромбон має багатий спектр, який досягає 8 кГц. У звуці тромбона є сорок обертонів, з яких двадцять дуже гучних. Час атаки 20 мс.

Тони всіх мідних інструментів багаті гармоніками. Це пояснюється в основному наявністю розтруба, що підвищує ефективність випромінювання звуку на високих частотах.

РЕКОМЕНДОВАНІ ДЖЕРЕЛА ІНФОРМАЦІЇ

1. Белявіна Н. Д., Белявін В. Ф., Бондарець Н. Л., Дьяченко В. В. Основи звукорежисури : *навчальний посібник*. / під ред. Н.Д. Белявіної. Київ : НАКККиМ, 2011. Ч. I. 84 с.
2. Вітвицька Є.В. Акустика залів: *навчальний посібник*. Одеса: Астропринт, 2002. 144 с.
3. Войтович О. Об'єктивні параметри та їх суб'єктивні кореляти в оцінці акустики концертних зал. *Наукові збірки Львівської національної музичної академії ім. М.В. Лисенка. Музикознавчі студії – 2015: збірка статей*. Львів, 2015. Вип. 36. С. 213–226.
4. Грінченко В.Т., Вовк І.В., Маципура В.Т. Основи акустики. Київ: «Видавництво НВП «Наукова думка» НАН України», 2009. 867с.
5. Грінченко В.Т. Теоретичні основи акустики: *навчальний посібник*. Київ: Національний технічний ун-т України «КПІ», 1998. 374 с.
6. Десятник Г.О., Бадіон С.В. Професія: звукорежиссер : *тексти лекцій*. Київ, Інститут журналістики КНУ, 2019. 69 с.
7. Дідковський В.С., Луньова С.А. Основи архітектурної та фізіологічної акустики. Київ: Аван-постприм, 2001. 422 с.
8. Машенко І. Г. Термінологічний словник основних понять і виразів : телебачення, радіомовлення, кіно, відео, аудіо : енциклопедія електронних масмедіа : в 2 т. Т. 2. Запоріжжя : Дике Поле, 2006. 511 с.
9. Ньюэлл Ф. Звукозапись: Акустика помещений. Пер. с англ. А. Кравченко. Москва, 2004. 197 с.
10. Рязанцев Л.В. Звукорежисура: *навчальний посібник*. Київ: ДАКККиМ, 2009. 144 с.
11. Chaigne A., Kergomard J. Acoustics of musical instruments. New York: Springer-Verlag, 2016. 845 p.
12. Everest F.A. The master handbook of acoustics. New York: McGraw-Hill, 2001. 616 p.
13. Barron M. Auditorium Acoustics and Architectural Design. Second Edition. Spon Press, London and New York, 2010. 481 p.
14. Berg R.E., Stork D.G. The physics of sound. San Francisco: Pearson Education, Inc., 2005. 399 p.
15. Encyclopedia of Acoustics / Ed. by M.Crocker / V. 1-4. N.Y: Jonh Wiley & Sons. 1997. 1554 p.
16. Gilkey R., Anderson T. Binaural and Spatial Hearing in Real and Virtual Environments. New York and London: Psychology Press, 2014. 795 p.
17. Hall D.E. Musical acoustics. Thomson Brooks/Cole, 2004. 480 p.
18. Hartmann W.M. Principles of musical acoustics. Springer, 2013. 364 p.
19. Howard D., Angus J. Acoustics and Psychoacoustics. G-B.: Focal-Press, 2006. 412 p.

20. Montagu J.. Origin and Development of Musical Instruments. *The Scarecrow Press, Laham*, Maryland-Toronto-Plymouth, UK 2007. 280 p.
21. Rossing T. Science of Percussion Instruments. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2000. 215 p.
22. Rossing T. The Science of String Instruments. Springer Science + Business Media, LLC, 2010. 469 p.
23. Toole F. Sound Reproduction: The Acoustics and Psychoacoustics of Loudspeakers and Rooms. New York-London, 2013. 550 p.

ДОДАТКИ

Додаток А

Сумський державний педагогічний університет
імені А.С.Макаренка

НН інститут культури і мистецтв

Кафедра хорового диригування, вокалу та методики музичного навчання

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор НН інституту культури і
мистецтв
 О.А. Устименко-Косоріч
« 31 » серпня 2021 р.



РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Основи музичної акустики

галузь знань 02 Культура і мистецтво

спеціальність 025 Музичне мистецтво

освітня-програма/програми Музичне мистецтво


мова навчання українська

Погоджено науково-методичною
комісією

НН інституту культури і мистецтв

« 31 » серпня 2021 р.

Голова

 О.Ф. Руденко

Суми – 2021

Розробник: Корякін Олексій Олексійович – кандидат педагогічних наук,
старший викладач кафедри хорового диригування, вокалу та методики
музичного навчання

Робоча програма розглянута і схвалена на засіданні кафедри хорового
диригування, вокалу та методики музичного навчання

Протокол № 1 від «27» серпня 2021 р.

Директор ННі культури і мистецтв  О.А.Устименко-Косоріч

Опис навчальної дисципліни

Найменування показників	Освітній ступінь	Характеристика навчальної дисципліни	
		денна форма навчання	заочна форма навчання
Кількість кредитів – 3	Перший бакалаврський	Обов’язкова	
		Рік підготовки:	
		1-й	1-й
		Семестр	
1-й		1-й	
Лекції			
22 год.		6 год.	
Практичні, семінарські			
18 год.		6 год.	
Лабораторні			
Самостійна робота			
48 год.		76 год.	
Консультації:			
2 год.		2 год.	
Загальна кількість годин – 90			Вид контролю: залік

1. Мета вивчення навчальної дисципліни

Метою дисципліни є практична підготовка студентів до майбутньої професійної діяльності як артистів, озброєння їх основними знаннями про природу звуку та теорію звуковисотності, музичну акустику, особливості розповсюдження звуку та формування необхідних професійних компетенцій бакалаврів музичного мистецтва – майбутніх артистів. Засвоєння програмного

матеріалу дисципліни «Основи музичної акустики» забезпечує оволодіння загальними та фаховими компетенціями відповідно до освітньо-професійної програми «Музичне мистецтво»: ЗК 1 – здатність до спілкування державною мовою як усно, так і письмово; ЗК 2 – знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності; ЗК 4 – вміння виявляти, ставити та вирішувати проблеми; ЗК 8 – здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях; ЗК 9 – здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями; ЗК 11 – здатність оцінювати та забезпечувати якість виконуваних робіт; ЗК 14 – навички використання інформаційних і комунікаційних технологій; здатність використовувати знання про основні закономірності й сучасні досягнення у теорії, історії та методології музичного мистецтва; ФК 5 – здатність використовувати знання про основні закономірності й сучасні досягнення у теорії, історії та методології музичного мистецтва; ФК 6 – здатність використовувати професійні знання та навички в процесі творчої діяльності; ФК 11 – здатність оперувати професійною термінологією; ФК 20 – здатність ефективно використовувати музично – технічні засоби у педагогічній та виконавській діяльності. Опанування дисципліни «Основи музичної акустики» дозволить застосовувати теоретичні знання та навички в звукорежисерській практичній діяльності, а також використовувати технічні засоби у процесі сценічного виконання музичних творів з метою поглиблення їх художньо – технічного змісту.

2. Передумови для вивчення дисципліни

Навчальна дисципліна «Основи музичної акустики» вивчається у першому семестрі. Передумові для вивчення відсутні.

3. Результати навчання за дисципліною

Результати навчання за дисципліною «Основи музичної акустики» передбачають оволодіння навичками роботи звукорежисера з ансамблевим колективом та солістами, а також роботи артистів – вокалістів зі звукорежисером. Опанування дисципліни передбачає також уміння здійснювати розрахунки акустичних параметрів приміщення та врахуванням акустичних особливостей процесі сценічного виконання музичних творів. Вивчення дисципліни «Основи музичної акустики» передбачає розвиток здатності застосовувати теоретичні знання з музичної акустики у практичній діяльності та врахування акустичних особливостей концертного майданчика у процесі виконання музичних творів.

<p>Знання: особливостей ансамблевого виконавства, акустичних особливостей ансамблевого звучання.</p> <p>Уміння: організовувати та здійснювати ансамблеві виступи.</p> <p>Комунікація: взаємодія зі звукорежисером, колегами.</p>	ПРН 2	<p>Володіти методами та навичками оркестрової та ансамблевої гри (ансамблевого / хорового співу), репетиційної роботи та концертних виступів.</p>
---	--------------	---

<p>Знання: змісту художньої інтерпретації музичного твору, акустичних особливостей, які враховуються для посилення драматургії твору.</p> <p>Уміння: здійснювати відтворення драматургічної концепції музичного твору, створювати його художню інтерпретацію.</p>	ПРН 5	Відтворювати драматургічну концепцію музичного твору, створювати його художню інтерпретацію.
<p>Знання: особливостей організації роботи з ансамблевим колективом, акустичних особливостей ансамблевого звучання.</p> <p>Уміння: організовувати та здійснювати творчу роботу з ансамблевим колективом.</p> <p>Комунікація: взаємодія зі звукорежисером, колегами.</p>	ПРН 10	Володіти базовими знаннями, практичними навичками організаційної та творчої роботи з ансамблевим колективом.
<p>Знання: закономірностей розповсюдження звуку в різних умовах, теорії звуковисотності.</p> <p>Уміння: використовувати теоретичні знання з музичної акустики у звукорежисерській практичній діяльності.</p> <p>Комунікація: взаємодія зі звукорежисером, колегами.</p>	ПРН 11	Застосовувати теоретичні знання та навички в редакторській / менеджерській / лекторській / звукорежисерській практичній діяльності.
<p>Знання: змісту термінів, понять та категорій музичного мистецтва.</p> <p>Уміння: застосовувати музичну термінологію у процесі професійної діяльності.</p> <p>Комунікація: взаємодія та комунікація у сфері сценічного виконавства.</p>	ПРН 12	Володіти термінологією музичного мистецтва, його понятійно-категоріальним апаратом.
<p>Знання: критеріїв звучання музичних творів, технічних засобів, які використовуються з метою поглиблення художньо-технічного змісту сценічного виконання музичних творів.</p> <p>Уміння: використовувати технічні засоби у процесі сценічного виконання музичних творів.</p> <p>Комунікація: взаємодія зі звукорежисером, колегами.</p>	ПРН 18	Використовувати технічні засоби у процесі сценічного виконання музичних творів з метою поглиблення їх художньо-технічного змісту.
<p>Знання: змісту продуктивних форм взаємодії в процесі організації та здійснення репетицій.</p> <p>Уміння: організовувати та здійснювати репетиційну роботу у процесі підготовки концертних номерів, реалізовувати взаємодію та діалог.</p> <p>Комунікація: взаємодія зі звукорежисером, керівництвом, колегами.</p>	ПРН 19	Організовувати та здійснювати репетиційну роботу у процесі підготовки концертних номерів.

<p>Знання: критеріїв звучання та акустичних особливостей, які впливають на звук; принципів організації самостійної роботи.,</p> <p>Уміння: здійснювати самостійну роботу та бути критичним у професійній діяльності, зокрема, власній.</p> <p>Комунікація: взаємодія зі звукорежисером, колегами.</p>	ПРН 24	Здатність здійснення самостійної роботи, гнучкого мислення, відкритості до нових знань, критичності і самокритичності у професійній діяльності.
--	--------	---

4. Критерії оцінювання результатів навчання

Кількість балів	Критерії оцінювання навчальних досягнень здобувача вищої освіти
90 – 100	Здобувач вищої освіти володіє теоретичними знаннями з навчальної дисципліни «Основи музичної акустики» у межах програми, вміє використовувати набуті знання і прикладні уміння у практичній діяльності. Спроможний аналізувати акустичні особливості концертного майданчика, розраховувати час реверберації. Здобувач вищої освіти здатний у повній мірі використовувати акустичні особливості у процесі виконання музичного твору.
82 – 89	Здобувач вищої освіти має міцні ґрунтовні знання в межах програми з навчальної дисципліни, в цілому може використовувати набуті знання і прикладні уміння у практичній діяльності. Вміє аналізувати акустичні особливості концертного майданчика, розраховувати час реверберації без суттєвих помилок. Здобувач вищої освіти здатний без помилок використовувати акустичні особливості у процесі виконання музичного твору.
74 – 81	Здобувач вищої освіти володіє знаннями з навчальної дисципліни, але має стандартне мислення, не завжди може сформулювати власні висновки, використати знання у практичній діяльності. Здобувач вищої освіти виявляє достатній рівень засвоєння теоретичного матеріалу з навчальної дисципліни, але при цьому у аналізі акустичних особливостей концертного майданчика, розрахунку часу реверберації припускається помилок, потребує допомоги викладача. Трапляються недоліки у використанні акустичних особливостей у процесі виконання музичного твору.
64 – 73	Здобувач вищої освіти володіє частиною теоретичного матеріалу навчальної дисципліни, тому не завжди вміє самостійно помітити і проаналізувати помилки у аналізі акустичних особливостей концертного майданчика, розрахунку часу реверберації. Недостатньо стійкі навички використання акустичних особливостей у процесі виконання музичного твору, але є позитивні зміни у розвитку здобувача вищої освіти.
60 – 63	Здобувач вищої освіти з великими труднощами відтворює теоретичний матеріал навчальної дисципліни, на практиці використовує його непослідовно і не завжди вміє аналізувати акустичні особливості концертного майданчика, припускається помилок. Навички

	використання акустичних особливостей у процесі виконання музичного твору нестійкі, водночас є позитивні зміни розвитку здобувача вищої освіти.
35 – 59	Здобувач вищої освіти здатний відтворювати окремі фрагменти теоретичного матеріалу навчальної дисципліни, знайомий з мінімальним теоретичним матеріалом, але не здатний використати його у процесі аналізу концертного майданчика. Розвиток навички використання акустичних особливостей у процесі виконання музичного твору на низькому рівні. Припускається багатьох помилок і не може їх виявити.
1 – 34	У здобувача вищої освіти оволодіння матеріалом навчальної дисципліни на дуже низькому рівні, не сформоване вміння аналізувати акустичні особливості концертного майданчика, навички використання акустичних особливостей у процесі виконання музичного твору.

Розподіл балів

Поточний контроль												ІНДЗ	Разом	Сума
РОЗДІЛ 1			РОЗДІЛ 2			РОЗДІЛ 3			РОЗДІЛ 4					100
Т 1.1	Т 1.2	Т 1.3	Т 2.1	Т 2.2	Т 2.3	Т 3.1	Т 3.2	Т 3.3	Т 4.1	Т 4.2	Т 4.3			
Поточний контроль												16	76	
5	5	5	5	5	5								24	
Контроль самостійної роботи														
2	2	2	2	2	2	2								

Т 1.1, Т 1.2 ... Т 4.3 – теми розділів

Результати навчання, здобуті шляхом неформальної та/або інформальної освіти, визнаються в системі формальної освіти в порядку, визначеному законодавством. Перезарахуванню можуть підлягати результати навчання шляхом неформальної освіти, що за тематикою, обсягом вивчення та змістом відповідають навчальній дисципліні «Основи музичної акустики» в цілому, так і її окремому розділу, темі (темам), які передбачені робочою програмою даної навчальної дисципліни.

Для перезарахування результатів навчання, отриманих у неформальній освіті, здобувач вищої освіти подає викладачу: завірені у встановленому порядку копії документів, що підтверджують участь здобувача у заході неформальної освіти (свідоцтва, сертифікати, дипломи тощо, які підтверджують ті вміння, які здобувач отримав під час навчання), а також опис заходу неформальної освіти та його змісту (інформаційний лист, запрошення, програма тощо).

Програма навчальної дисципліни передбачає можливість визнання результатів навчання, здобутих у неформальній чи інформальній освіті в обсязі, що, як правило, не перевищує 10% від загального обсягу навчальних годин, передбачених для опанування навчальної дисципліни.

Шкала оцінювання: національна та ECTS

Сума балів за всі види навчальної діяльності	Оцінка ECTS	Оцінка за національною шкалою
		для екзамену, заліку, курсового проекту (роботи), практики
90 – 100	A	відмінно
82 – 89	B	добре
74 – 81	C	
64 – 73	D	задовільно
60 – 63	E	
35 – 59	FX	незадовільно з можливістю повторного складання
1 – 34	F	незадовільно з обов’язковим повторним вивченням дисципліни

5. Засоби діагностики результатів навчання

Тестування, завдання на звуко-технічному обладнанні, презентації результатів виконаних завдань, залік.

6. Програма навчальної дисципліни

Розділ 1. Акустика як наука про звук.

Розділ 2. Сприйняття звуку людиною.

Розділ 3. Акустика приміщень.

Розділ 4. Акустика музичних інструментів.

7.1. Інформаційний зміст навчальної дисципліни

Розділ 1. Акустика як наука про звук

Тема 1.1. Поняття акустики. (Зміст поняття акустики та її основні розділи)

Тема 1.2. Зміст музичної акустики. (Предмет музичної акустики та історія її становлення)

Тема 1.3. Поняття звуку. (Зміст поняття звуку, види звуків, зміст поняття шуми, види шумів)

Розділ 2. Сприйняття звуку людиною

Тема 2.1. Психофізіологія слуху людини. (Процес сприйняття звуку людиною та його складові, предмет психоакустики)

Тема 2.2. Гучність та динаміка звуку. (Поняття гучності, звукового тиску, сили звуку, децибел)

Тема 2.3. Теорія звуковисотності та тембр. (Основні складові теорії звуковисотності, поняття тембру та сонорики)

Розділ 3. Акустика приміщень

Тема 3.1. Зміст акустики приміщень. (Акустика приміщень як розділ музичної акустики та значення шумів для звукового поля, основні теорії акустичних процесів (статистична, хвильова, геометрична) у приміщеннях)

Тема 3.2. Закономірності розповсюдження звукових хвиль у закритих приміщеннях. (Принципи розповсюдження звуку у приміщенні, поняття реверберації, розрахунок реверберації, імпульсні характеристики приміщення, «акустичні» матеріали)

Тема 3.3. Стереофонія. (Поняття стереофонії та історичні етапи її розвитку)

Розділ 4. Акустика музичних інструментів.

Тема 4.1. Акустика ударних музичних інструментів. (Особливості утворення звуку в ударних музичних інструментах)

Тема 4.2. Акустика струнних музичних інструментів. (Струнні музичні інструменти як складні коливальні системи, утворення звуку в струнних музичних інструментах)

Тема 4.3. Акустика духових музичних інструментів. (Особливості утворення звуку в ударних музичних інструментах)

Індивідуальне науково-дослідницьке завдання:

Розрахунок стандартного часу реверберації.

7.2. Структура та обсяг навчальної дисципліни

Назви розділів і тем	Кількість годин											
	Денна форма						Заочна форма					
	Усього	у тому числі					Усього	у тому числі				
		Лекції	Практичні	Лабораторні	Консультації	Самостійна робота		Лекції	Практичні	Лабораторні	Консультації	Самостійна робота
РОЗДІЛ 1. Акустика як наука про звук												
Тема 1.1. Поняття акустики.	6	2				4	6					6
Тема 1.2. Зміст музичної акустики.	6	2				4	6					6
Тема 1.3. Поняття звуку.	8	2	2			4	10	2	2			6
РОЗДІЛ 2. Сприйняття звуку людиною												
Тема 2.1. Психофізіологія слуху людини.	6		2			4	6					6
Тема 2.2. Гучність та динаміка звуку.	8	2	2			4	10	2	2			6
Тема 2.3. Теорія звуковисотності та тембр.	8	2	2			4	6					6
РОЗДІЛ 3. Акустика приміщень												
Тема 3.1. Зміст акустики приміщень.	8	2	2			4	6					6
Тема 3.2. Закономірності розповсюдження звукових хвиль у закритих приміщеннях.	10	2	2		2	4	12	2	2		2	6

Тема 3.3. Стереофонія.	8	2	2			4	6					6
РОЗДІЛ 4. Акустика музичних інструментів												
Тема 4.1. Акустика ударних музичних інструментів.	6	2				4	6					6
Тема 4.2. Акустика струнних музичних інструментів.	8	2	2			4	8					8
Тема 4.3. Акустика духових музичних інструментів.	8	2	2			4	8					8
Усього годин	90	22	18		2	48	90	6	6		2	76

Теми лекційних занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин	
		Денна форма	Заочна форма
1.	Поняття акустики.	2	
2.	Зміст музичної акустики.	2	2
3.	Поняття звуку.	2	
4.	Гучність та динаміка звуку.	2	2
5.	Теорія звуковисотності та тембр.	2	
6.	Зміст акустики приміщень.	2	
7.	Закономірності розповсюдження звукових хвиль у закритих приміщеннях.	2	2
8.	Стереофонія.	2	
9.	Акустика ударних музичних інструментів.	2	
10.	Акустика струнних музичних інструментів.	2	
11.	Акустика духових музичних інструментів.	2	
Разом		22	6

Теми практичних (семінарських) занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин	
		Денна форма	Заочна форма
1.	Поняття звуку.	2	2
2.	Психофізіологія слуху людини.	2	
3.	Гучність та динаміка звуку.	2	2
4.	Теорія звуковисотності та тембр.	2	
5.	Зміст акустики приміщень.	2	
6.	Закономірності розповсюдження звукових хвиль у закритих приміщеннях.	2	2
7.	Стереофонія.	2	
8.	Акустика струнних музичних інструментів.	2	
9.	Акустика духових музичних інструментів.	2	
Разом		18	6

8. Рекомендовані джерела інформації

Основні:

1. Вітвицька Є.В. Акустика залів: *навчальний посібник*. Одеса: Астропринт, 2002. 144 с.
2. Грінченко В.Т., Вовк І.В., Маципура В.Т. Основи акустики. Київ: «Видавництво НВП «Наукова думка» НАН України», 2009. 867с.
3. Десятник Г.О., Бадіон С.В. Професія: звукорежиссер : *тексти лекцій*. Київ, Інститут журналістики КНУ, 2019. 69 с.
4. Дідковський В.С., Луньова С.А. Основи архітектурної та фізіологічної акустики. Київ: Аван-постприм, 2001. 422 с.
5. Мащенко І. Г. Термінологічний словник основних понять і виразів : телебачення, радіомовлення, кіно, відео, аудіо : енциклопедія електронних масмедіа : в 2 т. Т. 2. Запоріжжя : Дике Поле, 2006. 511 с.
6. Рязанцев Л.В. Звукорежисура: *навчальний посібник*. Київ: ДАКККиМ, 2009. 144 с.
7. Chaigne A., Kergomard J. Acoustics of musical instruments. New York: Springer-Verlag, 2016. 845 p.
8. Everest F.A. The master handbook of acoustics. New York: McGraw-Hill, 2001. 616 p.
9. Hall D.E. Musical acoustics. Thomson Brooks/Cole, 2004. 480 p.
10. Hartmann W.M. Principles of musical acoustics. Springer, 2013. 364 p.

Додаткові:

1. Бондаренко А. І. Виявлення і аналіз акустичних подій в електронній музиці (на прикладі «Мотус» А. Загайкевич). *Питання культурології: збірник наукових праць*. 2015. № 31. С. 22–28.
2. Бондаренко А.І., Шульгіна В.Д. Музична інформатика: *навчальний посібник*. Київ: НАКККиМ, 2011. 190 с.
3. Грінченко В.Т. Теоретичні основи акустики: *навчальний посібник*. Київ: Національний технічний ун-т України «КПІ», 1998. 374 с.
4. Даценко М.С. Просторове середовище та акустика приміщення у формуванні професійної культури майбутнього викладача музичного мистецтва. *Молодий вчений*. № 12 (64), 2018. С. 76–78.
5. Дідковський В.С., Дідковська М. В., Продеус А. М. Акустична техніка: *навчальний посібник*. Т.12. Комп'ютерна обробка акустичних сигналів. Київ, 2010. 430 с.
6. Дьяченко В. В. Звук як фізичний процес і художня інформація. *Питання культурології : збірник наукових праць*. 2008. Вип 24. С. 18–19.
7. Дьяченко В. В. Теорія фонокомпозиції як мистецька технологія. *Вісник Харківської державної академії дизайну і мистецтв* [Мистецтвознавство: № 2]: зб. наук. пр. / за ред. В. Я. Даниленка. Харків : ХДАДМ, 2012. С. 132-135.
8. Козлін В. Й. Фізичні основи впливу смичка на струну скрипки. *Наукові записки Національного педагогічного університету імені М. П. Драгоманова*. Серія: Фізико-математичні науки / Міністерство освіти і науки України, НПУ ім. М. П. Драгоманова. Київ, 2002. № 3. С. 152–157.
9. Кононов С.П. Основи звукотехніки: *навчальний посібник*. Вінниця: ВДТУ, 2001. 70 с.

10. Куш Є. В. До питання тембрової виразності електромузичних інструментів. *Українська культура: минуле, сучасне, шляхи розвитку*. 2012. Вип. 18 (1). С. 181–186.
11. Мазуренко А. Акустичні та психоакустичні дослідження в системі звуковисотного аналізу етномузики. *Київське музикознавство*. 2014. Вип. 50. С. 13–19. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/kmuz_2014_50_4
12. Мащенко І. Г. Всесвітній відеоаудіолітопис : дати, події, факти, цифри, деталі, коментарі, персоналії : енциклопедія електронних масмедіа : в 2 т., Т. 1. Запоріжжя: Дике Поле, 2006. 384 с.
13. Папченко В. П. Інтерактивність шумів і пауз у звуковому образі фільму. *Науковий вісник Київського національного університету театру, кіно і телебачення імені І. К. Карпенка-Карого*. Київ, 2018. № 22. С.101–107.
14. Barron M. Auditorium Acoustics and Architectural Design. Second Edition. Spon Press, London and New York, 2010. 481 p.
15. Berg R.E., Stork D.G. The physics of sound. San Francisco: Pearson Education, Inc., 2005. 399 p.
16. Encyclopedia of Acoustics / Ed. by M.Crocker / V. 1-4. N.Y: Jonh Wiley & Sons. 1997. 1554 p.
17. Gilkey R., Anderson T. Binaural and Spatial Hearing in Real and Virtual Environments. New York and London: Psychology Press, 2014. 795 p.
18. Howard D., Angus J. Acoustics and Psychoacoustics. G-B.: Focal-Press, 2006. 412 p.
19. Montagu J.. Origin and Development of Musical Instruments. *The Scarecrow Press, Laham, Maryland-Toronto-Plymouth, UK* 2007. 280 p.
20. Rossing T. Science of Percussion Instruments. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2000. 215 p.
21. Rossing T. The Science of String Instruments. Springer Science + Business Media, LLC, 2010. 469 p.
22. Toole F. Sound Reproduction: The Acoustics and Psychoacoustics of Loudspeakers and Rooms. New York-London, 2013. 550 p.

9. Інструменти, обладнання та програмне забезпечення, використання яких передбачає навчальна дисципліна (за потребою)

Обладнання для практичних занять з навчальної дисципліни: «Основи музичної акустики»: ноутбук або ПК з зовнішнім аудіоінтерфейсом та програмним забезпеченням (Steinberg Cubase 10.5 (або більш сучасна версія), Adobe Audition CC 2017.0.1 (або більш сучасна версія), набір FabFilter TotalBundle 2017 (або більш сучасна версія) мікрофон вокальний класом не нижче Shure SM58, студійний конденсаторний мікрофон класом, не нижче Samson C03 з тримачем типу «павук», стійкою та поп-фільтром, інструментальний мікрофон класом не нижче AUDIX ADX51, Shure SM137, USB-пульт мікшерний мінімум з 2-ма мікрофонними каналами з компресорами на кожному та 2-ма незалежними pre/post-фейдерними AUX-ами, DSP процесори REC-U формату, студійні навушники (закритого типу), студійні монітори ближнього поля (2 шт.), активні моніторні акустичні системи (2 шт.), мікрофонні стійки (типу «журавель») з тримачами для мікрофонів – 2 шт., сценічні попітри (2 шт.).

Методичне видання

КОРЯКІН Олексій Олексійович

ОСНОВИ МУЗИЧНОЇ АКУСТИКИ: КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

*для здобувачів вищої освіти спеціальності
025 Музичне мистецтво*

Комп'ютерна верстка Н.С.Цьома

Підп. до друку 20.10.2021.

Формат 60x84/16. Гарнітура Times New Roman.

Папір офсетний. Друк офсетний. Ум. друк. арк. 7,61.

Ум. фарб.-відб. 7,61. Обл.-вид. арк. 6,08.

Тираж 50 пр. Вид. №154

Видавець і виготовлювач:

ФОП Цьома С.П. 40002, м. Суми, вул. Роменська, 100.

Тел.: 066-293-34-29.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

серія ДК, № 5050 від 23.02.2016.