МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ОСНОВИ ЗВУКОТЕХНІКИ

Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 7 від 27.04.2023 р.)
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Електронні системи мультимедіа
та засоби інтернету речей»
спеціальності 171 «Електроніка»,

Укладачі: О.П. Гребінь, В.Б. Швайченко, Н.Ф. Левенець

Електронне мережне навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2023

Рецензент: *Прядко О.М.*, доцент, к.т.н., професор кафедри кінотелеоператорства, Київський національний університет театру, кіно і телебачення імені І. К. Карпенка-Карого

Відповідальний редактор: *Пілінський В.В.*, професор, к.т.н., професор кафедри акустичних та мультимедійних електронних систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 7 від 27.04.2023 р.)
за поданням Вченої ради ФЕЛ (протокол № 03/2023 від 27.03.2023 р.)

Викладено основні поняття звукотехніки. Наведено основні характеристики звукових сигналів, особливості сприйняття звуку людиною, характеристики джерел звукових сигналів. Докладно описано функціональні схеми, параметри та функціональні можливості звукотехнічного обладнання, зокрема пристроїв звукозапису, систем звуковідтворення, систем запису аналогових звукових програм на носії звукозапису.

Значну увагу в посібнику приділено цифровим технологіям у звукотехніці, зокрема аналого-цифровому перетворенню, цифровому звукозапису та носіям такого запису

Навчальний посібник призначено для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Електронні системи мультимедіа та інтернету речей» спеціальністю 171 «Електроніка». Буде також корисним студентам, аспірантам та фахівцям, які спеціалізуються на звукотехніці, зокрема для здобувачів напрямку звукорежисура, та широкому колу читачів, яких цікавлять показники якості засобів та пристроїв звукотехніки та звукозапису.

Реєстр. № НП 22/23-635. Обсяг 21,5 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056
https://kpi.ua
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023

ЗМІСТ

Передмова 6
Перелік умовних позначень та скорочень 8
Вступ 10
В.1. Фрагменти з історії розвитку звукотехніки та звукозапису 11
В.2. Узагальнений перелік звукотехнічного обладнання 15
В.3. Узагальнена структура формування звукового контенту 15
Контрольні запитання 17
1. Загальні поняття і характеристики звуку 18
1.1 Визначення та характеристики звуку 18
1.2. Прості та складні звуки 22
1.3. Лінійні та енергетичні характеристики звуку 29
1.4. Види звукових хвиль та особливості їх поширення 32
1.4.1. Плоска хвиля 32
1.4.2. Сферична хвиля 33
1.4.3. Циліндрична хвиля 34
1.4.4. Інтерференція та дифракція хвиль 34
1.4.5. Відбиття, заломлення та загасання звуку 36
1.5 Рівні звукового сигналу 39
Контрольні запитання 43
2. Основи психоакустики. Основні властивості слуху 45
2.1. Будова вуха 45
2.2. Сприйняття за частотою 47
2.3. Сприйняття за амплітудою. Поріг чутності та больовий поріг 53
2.4. Гучність і рівень гучності звуку 56
2.5. Ефект маскування 61
2.6. Гучність складних звуків 62
2.7. Часові характеристики слухового сприйняття 64
2.8. Нелінійні властивості слуху 67
2.9. Бінауральний ефект. Локалізація звуку 68
2.10. Слуховий аналіз консонансів і дисонансів 69
Контрольні запитання 71
3. Акустичні сигнали 73
3.1. Статистичний аналіз. Динамічний діапазон і середній рівень сигналу 74
3.2. Спектральний аналіз. Частотний діапазон і спектри 78
3.3. Кореляційний аналіз. Часові характеристики акустичного сигналу 86
3.4. Вторинний сигнал 87
Контрольні запитання 91
4. Джерела звукових сигналів 93
4.1 Основи музичної акустики 93
4.1.1 Музичні шкали та інтервали. Стандартна висота тону 93
4.1.2. Деякі закономірності сприйняття музичних і мовних сигналів 97
4.1.3. Тембр 99
4.1.4. Перехідні процеси 100
4.2. Акустика музичних інструментів 104
4.2.1. Духові музичні інструменти 106
4.2.2. Струнні інструменти 110

4.2.3. Фортепіано 114
4.2.4. Ударні інструменти 116
4.2.5. Оркестр 120
4.3. Первинний мовний сигнал 125
4.3.1. Структура апарату формування голосу 125
4.3.2. Утворення звуків мови 130
4.3.3. Акустичні характеристики мови 131
4.3.4. Особливості звукоутворення і акустичні характеристики вокальної мови (співу) 133
Контрольні запитання 142
5. Системи звукопередавання та звуковідтворення 144
5.1. Якість звуковідтворення в системах звукопередавання 144
5.2. Призначення та узагальнена структура систем звукопередавання 153
5.3. Класифікація систем звуковідтворення 156
5.3.1. Звичайна одноканальна (монофонічна) система передавання 158
5.3.2. Звичайна двоканальна стереофонічна система 159
5.4 Багатоканальні стереофонічні системи 162
5.4.1. Стереоамбіофонічні системи звукопередавання 166
5.4.2. Бінауральні системи 168
5.4.3. Системи звукопередавання з панорамним кодуванням 171
5.4.4. Звукові системи фірм Dolby Lab, DTS і SDDS 172
5.5. Універсальний формат звукопередавання 180
5.6. Апаратне забезпечення систем звукопередавання 183
5.6.1. Звукові процесори 183
5.6.2. Пристрої оброблення стереофонічних сигналів 185
Контрольні запитання 189
6. Звукотехнічне обладнання. Аналоговий звукозапис 191
6.1. Узагальнена структура тракту звуковідтворення 191
6.2. Класифікація звукотехнічного обладнання та пристроїв та узагальнені технічні параметри 193
6.3. Підсилювач звукових частот 194
6.4. Пристрої запису-відтворення звукових сигналів 198
6.4.1. Механічний звукозапис 198
6.4.1.1. Технологія виготовлення платівок 203
6.4.1.2. Звукознімачі 203
6.4.1.3. Показники якості ЕПП 208
6.4.2. Магнітний запис 212
6.4.2.1. Магнітні властивості матеріалів 214
6.4.2.2. Процес магнітного запису 221
6.4.2.3. Стирання запису 226
6.4.2.4. Магнітна стрічка 229
6.4.2.5. Магнітні головки 234
6.4.2.6. Корекція амплітудно-частотної характеристики 238
6.4.2.7. Стрічкопротягувальний механізм 240
6.4.2.8. Функціональна схема магнітофона 243
6.4.2.9. Функціональні параметри і показники 245
6.4.3. Особливості фотографічних фонограм 250
6.5. Типи інтерфейсів для передавання аудіосигналів. Рознімачі 252

Контрольні запитання 257
7. Перетворення та оброблення параметрів звукових сигналів 259
7.1. Необхідність та напрямки оброблення звуку 259
7.2. Класифікація та узагальнені технічні параметри пристроїв оброблення звуку 261
7.3. Аналіз пристроїв оброблення звуку 265
7.3.1. Оброблення за рівнем 265
7.3.1.1. Регулятори із застосуванням потенціометра 265
7.3.1.2. Автоматичні регулятори рівня 266
7.3.1.3. Лімітер та стабілізатор, компресор, гейт та експандер 269
7.3.2 Частотне оброблення 272
7.3.2.1. Ручні регулятори спектральних характеристик 272
7.3.2.2. Еквалайзер 273
7.3.2.3. Фільтри 274
7.3.3 Оброблення часових параметрів 275
Контрольні запитання 277
8. Аналого-цифрове перетворення сигналів. Цифровий звукозапис 278
8.1. Основні поняття перетворення аналогового сигналу в цифровий 279
8.2. Особливості цифрового звукозапису та порівняння з аналоговим звукозаписом 286
8.3. Формування цифрового сигналу для запису на носій 291
8.4. Перетворення звукового сигналу в системі "компакт диск" 297
8.4.1. Принцип запису та параметри формату CD-Audio 297
8.4.2. Варіанти дисків формату CD 302
8.4.3. Відтворення інформації з компакт-диска 306
8.4.4. Система DVD 310
8.4.5. Super Audio CD (SACD) 318
8.5. Цифровий магнітний запис. 321
8.5.1. Основні принципи цифрового магнітного запису 321
8.5.2. Цифрові магнітофони S-DAT та R-DAT 325
8.5.3. Функціональна схема цифрового магнітофона 329
8.6. Система магнітооптичного запису звуку «Мінідиск» 331
8.7. Перспективи розвитку дискових носіїв інформації 335
Контрольні запитання 339
Перелік посилань 341

ПЕРЕДМОВА

Дисципліна «Основи звукотехніки» має за мету вивчення засобів та способів формування, перетворення, оброблення, запису, відтворення звукових сигналів, вивчення принципів побудови різноманітного звукотехнічного обладнання, носіїв звукозапису.

В дисципліні «Основи звукотехніки» наведено інформацію щодо звукових(аудіо) сигналів та їх параметрів; сприйняття людиною сигналів, первинних та вторинних; пристроїв перетворення сигналів; принципів застосування апаратних та програмних засобів для запису та відтворення звукових сигналів в комплексах звукотехнічного обладнання систем телекомунікації, телебачення та радіомовлення, кінематографі, сучасних комплексах звукозапису, звуковідтворення, звукопередавання; технічних параметрів, структурних схем та функціональних можливостей сучасного звукотехнічного обладнання, як апаратного так і програмного; сучасних тенденцій розвитку обладнання у створенні звукових програм різного призначення.

Результатом вивчення має стати знання принципів та методів формування звукового сигналу, його запису та відтворення, а також перетворення для різних сфер застосування, розуміння складу та параметрів засобів запису та відтворення аудіо інформації для різноманітних заходів та застосувань, можливість самостійно читати та аналізувати структурні схеми технічного обладнання для запису, відтворення, перетворення та передавання звукових програм, раціональне застосування звукотехнічного обладнання й програмних засобів для виконання робіт по створенню програм та оброблення звуку, вміння вимірювати параметри звукових сигналів та обладнання, використовуючи апаратні та програмні засоби.

Метою дисципліни є підготовка здобувачів ступеня бакалавра в області звукотехніки. Дисципліна передбачає вивчення:

- понять звуку та звукового сигналу, основних характеристик звукового сигналу, видів та принципів поширення звукового сигналу в повітряному середовищі;
- джерел звукових сигналів, їх параметри та принципи формування звуку;
- сприйняття звукових сигналів людиною та будова органу слуху людини;
- систем та форматів звуковідтворення;
- засобів та методів оброблення звукових сигналів в звукотехніці;
- загальних принципів аналого-цифрового перетворення звукових сигналів;
- технологій та засобів аналогового та цифрового запису звуку на носії;
- показників якості звукотехнічного обладнання.

Зміст навчального посібника відповідає силабусу дисципліни «Основи звукотехніки», яка входить до сертифікатної програми вибіркових дисциплін «Технології та засоби звукозапису і основи звукорежисури» підготовки здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Електронні системи мультимедіа та засоби інтернету речей» спеціальності 171 «Електроніка».

В результаті вивчення дисципліни здобувач освіти опановує:

- основні характеристики звукового сигналу як акустичного, так і в електричного;

- характеристики аналогових і цифрових звукових сигналів;
- акустичні характеристики натуральних джерел звукових сигналів;
- принципи та особливості сприйняття акустичних сигналів органом слуху людини;
- структуру та можливості звукових систем й формати звуковідтворення;
- класифікацію звукотехнічного обладнання;
- показники якості звуковідтворення та технічні параметри звукотехнічного обладнання;
- технології та обладнання запису звукового контенту на носій для зберігання та подальшого відтворення;
- основи цифро-аналогового перетворення звукових сигналів;
- системи та пристрої аналогового й цифрового звукозапису;
- засоби оброблення параметрів звукових сигналів;
- особливості застосування звукотехнічного обладнання у технологічних процесах створення звукового контенту.

В результаті вивчення дисципліни здобувач освіти набуває уміння:
- визначати параметри звукотехнічного обладнання;
- оцінювати індивідуально якість звукових програм;
- раціонально застосовувати звукотехнічне обладнання для виконання відповідних робіт із створення програм;
- підключати звукотехнічне обладнання для виконання відповідного технологічного процесу;
- обслуговувати сучасне звукотехнічне обладнання;
- оцінювати придатність того чи іншого звукотехнічного обладнання для виконання відповідних робіт;
- контролювати параметри та визначати якість програм із застосуванням звукотехнічного обладнання.

Силабус дисципліни «Основи звукотехніки» передбачає разом з лекційними заняттями проведення лабораторних занять із обслуговування та дослідження параметрів звукотехнічного обладнання, якості звуковідтворення, порівняльного аналізу обладнання та звучання фонограм.

Матеріал посібника раціонально структурований. Перед кожним розділом наведено перелік ключових слів за відповідною темою для полегшення пошуку матеріалів в Інтернет-ресурсах. Окремі фрагменти тексту та деякі формули повторено за різним контекстом щоб зменшити час пошук матеріалу в різних розділах. В кінці кожного розділу наведено контрольні питання.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

АДП - адаптивний декодувальний пристрій;
АЗЗ - апарат звукозапису;
АМ - амплітудна модуляція;
АМЗ - апарат магнітного запису;
АМЗВ - апарат магнітного запису/відтворення;
АРР - автоматичний регулятор рівня;
АТ - аудіотехніка;
АХ - амплітудна характеристика;
АЦП - аналого-цифровий перетворювач;
АЧХ - амплітудно-частотна характеристика;
БП - біфонічний процесор;
БРН - бінауральний регулятор напрямку;
БФСЗ - блок формування сигналу запису;
ВЧ - верхня частота;
ВЧП - високочастотне підмагнічування;
Гм - гучномовець;
ГСП - генератора стирання і підмагнічування;
ДД - динамічний діапазон;
ДЗ - джерело звуку;
ДК - декодер;
ДКП - декодувальний пристрій;
ДМ - демодулятор;
ДП - диференціальний підсилювач;
ДС - джерело сигналів;
ЕПП - електронний програвальний пристрій;
ЕРС - електрорушійна сила;
ЗВ - звуковідтворення;
ЗЕ - звуковий ефект;
ЗП - звуковий процесор;
ЗС - звуковий сигнал;
ЗТ - звукотехніка;
ІКМ - імпульсно-кодова модуляція;
К - комутатор;
КД - компакт-диск;
КДМ - керована декодувальна матриця;
КК - канальний кодер;
КМЗВ - канал магнітного запису-відтворення;
КП - кодувальний пристрій;
ЛЗ - лінія затримки;
ЛК - лівий канал;
М - матриця;
М - мікрофон;
МГ - магнітна головка;
МДД - мінідискова дека;
МЗ - магнітний запис;
МП - мікрофонний підсилювач;

МС - магнітна стрічка;
ННЧ - наднизькі частоти;
НЧ - нижня частота;
ОЗП - оперативно-запам’ятовуючий пристрій;
ОМ - оптичний модулятор;
ПВЗ - пристрій вибірки-зберігання;
ПВКП - пристрій відтворення карт пам'яті;
ПЗ - програмний засіб;
ПЗ - пульт звукорежисера;
ПЗ - підсилювач запису;
ПЗЧ - підсилювач звукових частот;
ПК - правий канал;
ПКД - програвач компакт-дисків;
ПКН - початкова крива намагнічування;
ПКП - панорамно-кодувальний пристрій;
ПОЗ - пристрої оброблення звуку;
ПП - підсилювач потужності;
РР - регулятор рівня;
РТ - регулятор тембру;
САР - система автоматичного регулювання;
СВ - система відтворення;
СГ - сигналограма;
СЗП - система звукопередавання;
СПЗ - синтезатор просторового звучання;
СПМ - стрічкопротягувальний механізм;
СК - схема керування;
СФ - смуговий фільтр;
ТК - тонкомпенсація;
ТЛФ - телефони;
УДЗ - удаване джерело звуку;
УП - узгоджувальний пристрій;
ФАПЧ - фазове автопідстроювання частоти;
ФВЧ - фільтр високих частот;
ФМ - фазова модуляція;
ФНЧ - фільтр низьких частот;
ФЧХ - фазочастотна характеристика;
ЦАП - цифро-аналоговий перетворювач;
ЧК - частотний коректор;
ЧМ - частотна модуляція;
ШЗ - шумознижувач.

ВСТУП

Ключові слова: акустичний сигнал, електричний сигнал, звуковий сигнал, аудіотехніка, звукотехніка, звукотехнічне обладнання, історія звукозапису, історія звукотехніки.

Звукотехніка (ЗТ) (аудіотехніка (АТ)) – є однією з областей масової технологічної діяльності, за якою засобами електроніки здійснюють формування, перетворення, оброблення, запис, накопичення, збереження, передавання, поширення та відтворення сигналів звукового діапазону частот як електронних, так і акустичних.

Звукотехніка як прикладна галузь електроакустики, пов'язана з розробленням методів і технічних засобів отримання, передавання, реєстрування, відтворення й оброблення звукових сигналів.

Звукотехніка починає свій розвиток від 1877 р., коли Т. Едісон винайшов фонограф, який зробив можливим запис та відтворення звукових сигналів [1].

Однак, якщо розуміти під терміном «звукотехніка» метод передавання звукових сигналів, то першим пристроєм для перетворення звукових коливань та їх передавання електричним сигналом є телефон, винайдений і запатентований А. Беллом 1876 р. у США.

Сучасні звукотехнічні засоби є складовою частиною звукового кінематографа, систем створення програм та ведення радіо- і телемовлення, апаратури для запису музичних і мовних програм на магнітних, оптичних та інших носіях тощо.

Як галузь промисловості аудіотехніка об'єднує виробництво засобів запису й відтворення звуку (магнітофони, програвачі компакт-дисків, тощо), підсилення та оброблення звукових сигналів (мікшерні пристрої, реверберatори, підсилювальна апаратура, шумознижувачі); перетворювачів звукових акустичних коливань на електричні, і навпаки (мікрофони, гучномовці, акустичні системи концертних та кінозалів тощо).

Початком виробництва пристроїв аудіотехніки вважають 1888 р., коли Берлінер уперше відштампував металеву матрицю для виготовлення платівок із целулоїду. Тоді ж він розробив перший прилад для відтворення звуку із платівок – прототип рупорного грамофона.

З 1981 р. почався випуск систем формату компакт-дисків. У 1992 р. фірма «Sony» виготовила перший у світі міні-диск. Можливості звукотехніки значно розширилися у зв'язку з розробленням та випуском компакт-дисків, звукових карт до ПК та твердотільної пам’яті.

В Україні чимало підприємств, спроможних виробляти різноманітну аудіотехнічну апаратуру сучасного рівня (у Києві, Одесі, Запоріжжі, Сімферополі, Харкові, Кропивницькому). Серед закордонних виробників – фірми «Sony», «Philips», «Panasonic», «Tektronix» тощо.

Розвиток звукотехніки відбувається за декількома основними напрямками. По-перше, це використання цифрових технологій у формуванні, перетворенні, обробленні, запису, зберіганні, передаванні та відтворенні звукових сигналів, а також в управлінні цими процесами, по-друге, підвищення показників якості звукозапису та звуковідтворення, а також зберігання звукового контенту, по-третє,

розробка та широке застосування спеціалізованої елементної бази у звукотехнічному обладнанні і, по-четверте, забезпечення максимальної відповідності звукової інформації в процесі та після формування, перетворення, оброблення, запису, зберігання, передавання та відтворення звукових сигналів в різних формах існування.

В разі оброблення параметрів сигналів в електронних звукових пристроях прагнуть за можливості більш повно зберегти інформацію, що міститься в сигналах. При цьому об'єктивну оцінку якості звукотехнічних пристроїв здійснюють за такими основними показниками:

- лінійні спотворення (нерівномірність амплітудно- і фазо-частотної характеристик),
- нелінійні спотворення і паразитна модуляція (виникнення нових складових в частотному спектрі сигналу, варіації рівня і частоти сигналів - детонація),
- відносний рівень завад і шумів (відношення сигнал/шум).

Розвиток аудіотехніки спрямований на:

- збільшення щільності магнітних й оптичних методів звукозапису,
- розроблення методів компресії мовних сигналів,
- уведення та відтворення мовної і музичної інформації в комп'ютері,
- створення нових елементів звукотехнічних систем та пристроїв оброблення мовних та музичних сигналів, зокрема носіїв звукової інформації.

Згадані цілі досягають завдяки широкому застосуванню нових компонентів елементної бази та матеріалів, цифрових методів оброблення й компресії сигналів.

В.1. Фрагменти з історії розвитку звукотехніки та звукозапису

Історія розвитку звукотехніки та звукозапису починає свій відлік з 19 століття і по теперішній час [1].

Початок 19 століття - Англійський вчений Т.Юнг (Thomas Young)- запис звуку камертона на закопченій поверхні обертового барабана.

1877 р. - Шарль Кро (Charles Cros) - ідея механічного запису і наступне відтворення.

Кінець 1877 р. - Американець Томас Алва Едісон (Thomas Alva Edison)- виготовлення першого звукозаписувального пристрою - фонографа. Носій - валик (барабан), обгорнутий фольгою з олова з попередньо нарізаною спіральною канавкою. Запис за глибиною. Великі спотворення, частотний діапазон – від 200 Гц до 4000 Гц, малий рівень сигналу, шуми.

1888 р. - Еміль Берлінер (Emile Berliner)- запропонував цинковий диск з покриттям тонким шаром воску і спіральною канавкою. Перша матриця з металу і перша відштампована платівка. Перший апарат відтворення з платівок - прототип рупорного грамофона.

1896 р. - Лужна платівка (Берлінер).

1897 р. - Перший грамофон, потім патефон.

1898 р. - Датчанин В. Поульсен (Valdemar Poulsen) - магнітний запис на дріт, намотаний на барабан. Як головка запису – електромагніт.

1903 р. - Платівка з двостороннім записом.

1914 р. - Перше автомобільне радіо Ford-T.

1925 р. – У фірмі Bell Labs винаходять стрічковий динамічний мікрофон, проводить перші досліди з електромагнітного запису на диск.

Електромеханічний запис з мікрофона. Покращення параметрів запису: частотний діапазон – від 50 Гц до 10000 Гц, динамічний діапазон - 40 дБ.

1926 р. - Перша електрична радіола з підсилювачем 1Вт.

1928 р. – Г. Нойманн (Georg Neumann) розробляє перший конденсаторний мікрофон.

Л. Гаммонд (Laurens Hammond) представляє перший орган Гаммонд з 91 електромагнітним дисковим генератором.

1929 р. – А. Д. Блумлайн (Alan Dower Blumlein) розроблє теорію стереозвучання та стереозапису, А. Келлер (Arthur C. Keller) з компанії Bell Labs - перші досліди стерео запису.

1930 р. - Запис на магнітну стрічку на паперовій основі.

1931 р. – Фірма Bell Labs розробляє двосмугову акустичну систему 50-10000 Гц.

Фірма Neumann представляє перший directdrive привід для запису дисків.

Фірма Rickenbacker Guitars випускає на ринок перші електрогітари.

1932 р. - Англійський інженер Х. Хартлей вводить в обіг термін Hi-Fi (high fidelity – з англійської висока точність) для звуку.

Винахід Емануеля Шюллера - кільцева магнітна головка, вдалося суттєво (до 72 см/с) знизити швидкість протягування стрічки.

1933 р. - дослідження особливості слуху у людини - криві однакової гучності Fletcher-Munson.

На ринок випускають перші пристрої запису на металевий дріт.

1934 р. – Фірма BASF починає виробництво пластикової магнітної плівки.

1935 р. – Фірма AEG проводить першу демонстрацію "Magnetophone" на берлінській радіовиставці.

1936 р. - Німецькі вчені Браунмюль і Вебер (Von Braunmuhl and Weber) винаходять кардіоїдний конденсаторний мікрофон.

1937 р. – Д. Мінтон та А. Рінгель (John Minton and Abraham Ringel) винаходять кросовер для гучномовців.

Фірма Shure випускає свої перші головки звукознімачів.

1938 р. – Р. Бірвірт (Rudolph Bierwirth) патентує підсилювач із регуляторами тембру.

1939 р. - Незалежно у різних країнах винаходять високочастотне підмагнічування для запису.

Перші спроби стандартизувати регулятори рівня запису VU-meter (VU – абр. Volume Unit meter – з англійської вимірювач рівня (одиниць) гучності).

Е. Армстронг (Edwin Howard Armstrong) організовує експериментальне FM радіомовлення (FM – абр. frequency modulation з англійської частотна модуляція).

Ю. Вайнбергер (Juilus Weinberger) впроваджує регулювання смуги сигналу та тембру в радіоприймачі.

Фірма Western Electric розробляє першу motional feedback, vertical-cut головку для записів платівок.

Фірма Shure випускає одноелементний мікрофон Model 55 Unidyne - найвідоміший мікрофон у світі.

1940 р. – Г. Дадлі (Homer W. Dudley) з фірми Bell Labs розробив перший Vocoder (Voice Operated reCOrDER) пристрій аналізу та синтезу мови.

1941 р. - Магнітний звукозапис на магнітну стрічку на пластмасовій основі. Створення звукозаписувального пристрою для запису на магнітну стрічку - «магнєтофона». Німецькі вчені Браунмюль і Вебер - застосування ультразвукового підмагнічування і магнітної головки, що призвело до значного покращення якості запису і відтворення.

А. Гедді (Arthur Haddy) з фірми Decca розробляє motional feedback головку для високоякісних записів дисків.

Початок комерційного FM радіомовлення у США.

Перша монолітна електрогітара Л. Пола (Les Paul, справжнє ім'я Lester William Polsfuss).

1942 р. - На Берлінському радіо Г. Крюгер (Helmut Kruger) зробив перший стереозапис на магнітофон.

Фірма RCA випускає гучномовець LC-1, референсний стандарт для студійних моніторів.

Прийнятий перший стандарт на рівні запису. "0" VU визначений як рівень +4 dBu синусоїдного сигналу.

1945 р. - Американські та британські інженери вперше розбирають та досліджують німецькі Magnetophon.

Л. Пол у себе в гаражі створює експериментальну студію – close placement, multi-miking, echo, flanging.

Капітан Д. Маллін (John Mullin) виявляє на радіо Франкфурта склад магнітної 6,5мм плівки та переправляє 2 магнітофони зі стрічкою в США.

1946 р. – Фірма Webster-Chicago розпочав продаж побутових пристроїв запису на дріт.

1947 р. – Фірма Neumann випускає конденсаторний мікрофон U-47 з регульованою діаграмою спрямованості Починається ера сучасних студійних мікрофонів.

Фірма 3M випускає першу американську магнітну плівку.

Б. Кросбі (Bing Crosby) використовує "Rangertone" американську версію Magnetophon у своєму радіо шоу.

Значне покращення технології запису механічних носіїв - головки із зворотним зв'язком Presto 1D, Fairchild 542, Cook.

Фирма Scotch випускає ацетатну магнітну плівку Type 112.

1948 р. - Довгограюча платівка - мікродоріжковий віниловий LP диск на 33i1/3 об/хв (фірма Columbia Records). Частотний діапазон – від 50 Гц до 16000 Гц, динамічний діапазон - 50 дБ.

Перший американський магнітофон Ampex Model 200 винахідника О. Понятова (Alexander M. Poniatoff).

Утворено американське товариство аудіоінженерів Audio Engineering Society (AES).

Фірма Magnecord випускає PT-6, перший магнітофон у портативному корпусі.

1949 р. – Фірма RCA випускає першу сорокоп'ятку - 7" платівку з великим отвором.

В. Кок та Ф. Гарві (W. E. Kock and F. K. Harvey) з фірми Bell Labs розробляють акустичну лінзу для високоякісних гучномовців.

Ф. Макінтош та Г. Гов (Frank H. McIntosh and Gordon J. Gow) продають перший підсилювач McIntosh 50W1 1% спотворень у діапазоні від 20 Гц до 20 кГц.

В. Штудер (Willi Studer) робить перший Dynavox магнітофон і передає його в Revox.

Московським експериментальним заводом освоєно виробництво магнітофонів МЕЗ-2.

1950 р. - Гітарист та винахідник Л. Пол модифікує свій Ampex 300 для "Sound-on-Sound" overdubs.

1951 р. - Закінчилася війна швидкостей - Victor тепер продає LPs, а Columbia 45s.

Вперше застосовано технологію гарячого різця для запису дисків.

Фірма Pultec випускає перший активний еквалайзер EQP-1.

Фірма Bell Labs створює германієвий транзистор.

С. Кудельський (Stefan Kudelski) у Швейцарії будує перший портативний магнітофон Nagra portable.

М. Грюндіг (Max Grundig) у Німеччині випускає перший магнітофон Reporter

Гітара з цілісним корпусом Les Paul Gibson (Джефф Бек, Ерік Клептон, Джиммі Пейдж).

Розпочато масове виробництво магнітофонів Studer 27.

П Баксандал (Peter J. Baxandall) публікує найпоширенішу схему регуляторів тембру.

І. Кук (Emory Cook) проводить перші досліди з бінауральних записів.

1953 р. – електрогітара Gibson Electric Bass.

Перший безпроводовий мікрофон Vagabond із живленням від кислотних батарей.

Прийнято стандарт RIAA корекції для мікродоріжкового запису.

Фірма Ampex випускає 4-доріжкову 35 мм магнітну стрічку для випуску фільму "The Robe" у багатоканальному форматі - surround sound.

1954 р. – Фірма EMT представляє електромагнітний пластинковий ревербератор.

Електрогітара Fender Stratocaster.

1957 р. – Впроваджено стандарт на стереозапис «45х45».

1958 р. – Впроваджено єдиний стандарт стереозапису.

1965 р. - Японська радіомовна корпорація NHK - теорія цифрового магнітного запису.

1967 р. - Досліди цифрового магнітного запису.

1970 р. - Прискорене введення цифрового магнітному запису.

1977 р. – Фірмами Philips та Sony розроблено CD-формат.

1979 р. – Затверджено загальні технічні умови на CD-формат.

1982 р. – Впроваджено стандарт CD-формату. Починається ера цифрової звукотехніки.

Починаючи з 80-х років XX століття почалось масове впровадження цифрових технологій в життя, побут, професійну діяльність, зокрема в звукотехнічне обладнання, носії звукозапису, а також змінились і особливості прослуховування звукового контенту [1].

В.2. Узагальнений перелік звукотехнічного обладнання

Узагальнено до складу звукотехнічного обладнання відносять:
- пристрої перетворення акустичного сигналу в електричний (мікрофони);
- підсилювачі звукових сигналів;
- пристрої запису звуку;
- пристрої відтворення звуку;
- пристрої звукопередавання;
- пристрої оброблення звуку (регулятори тембру, регулятори рівня гучності, шумознижувачі, компресори динамічного діапазону, лімітери тощо), пристрої звукових ефектів;
- перетворювачі звукового сигналу (АЦП, ЦАП, компресори об'єму, кодери, декодери, модулятори тощо);
- фільтри та кросовери;
- передавачі та приймачі звукових сигналів;
- вимірювальні засоби параметрів звукового сигналу;
- засоби формування (синтезу, імітації) звуку;
- пристрої комутації та мікшування;
- пристрої випромінювання звуку (гучномовці);
- активні та пасивні накопичувачі (носії) звукових сигналів тощо.

В.3. Узагальнена структура формування звукового контенту

Робота із звуковими сигналами потребує, в першу чергу, перетворення акустичних сигналів в електричні мікрофонами.

Сигналами, що застосовують в звукотехніці є акустичні, електричні, звукові сигнали. Тому важливо зазначити визначення цих термінів - акустичний, електричний, звуковий сигнал.

Акустичний в класичному визначенні – чутний, тобто це сигнал, який людина сприймає слуховим органом. Акустичний сигнал формується безпосередньо в повітряному просторі як зміна статичного атмосферного тиску і визначається звуковим тиском в паскалях (Па) або рівнем звукового тиску у у відносних одиницях децибелах (дБ). Крім тиску акустичний сигнал характеризують інтенсивністю, але інтенсивність як сила звуку є енергетичним параметром і визначає потужність саме джерела сигналу. За фізіологічного сприйняття акустичного сигналу людина сприймає тиск і не коректно стосовно сприйняття людини зазначати інтенсивність звуку. Мікрофон теж сприймає тиск, а не інтенсивність.

Акустичний сигнал як фізичне явище не може підлягати будь-якому обробленню, окрім, наприклад, застосування рупора для концентрації енергії.

Зменшити гучність акустичного сигналу в момент виникнення або «відключити» його неможливо, змінити тембр не можна.

Звуковий сигнал – сигнал, що відповідає параметрам сприйняття його людиною, а саме, коливання з частотами від 20 Гц до 20000 Гц та звуковий тиск, який змінює статичний атмосферний тиск в межах від 20 мкПа ($2 \cdot 10^{-5}$ Па), що відповідає рівню звукового тиску 0 дБ, до приблизно 63 Па, що відповідає рівню 130 дБ. Якщо порівняти сприйняття акустичних сигналів для окремих тварин, то параметри саме звукового (чутного ними) сигналу будуть інші, наприклад, собаки сприймають звуки в діапазоні, приблизно від 100 Гц до 60 кГц, дельфіни – від 60 Гц до 200 кГц.

Електричний сигнал – сигнал, сформований на виході мікрофона після його перетворення, за своєю формою повторює форму акустичного сигналу, що діє на мікрофон. Електричний сигнал на виході мікрофона характеризують напругою в мілівольтах (мВ) або відносним рівнем напруги (дБ).

Електричний сигнал може бути оброблено за частотою, рівнем, формою, збережений на носії, переданий каналами зв'язку тощо.

Електричний сигнал може бути перетворено в акустичний з відповідними акустичними параметрами гучномовцями. Змінюючи електричні параметри звукового сигналу, а саме, напругу, силу струму, потужність, а також частотну характеристику сигналу можна змінювати отримані акустичні параметри – гучність, тембр, напрямок поширення.

На рис. В.1 наведено узагальнену структуру формування та перетворення звукового контенту.

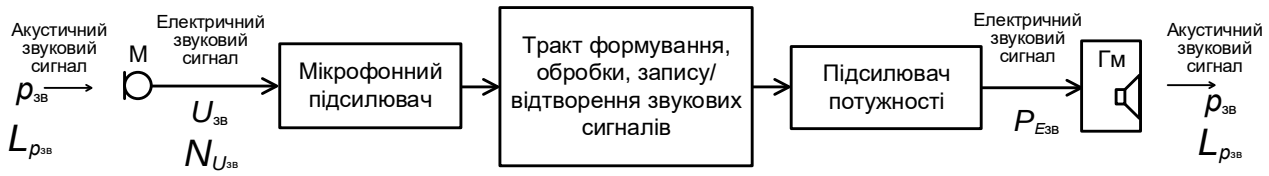


Рис. В.1 Узагальнена структура формування та перетворення звукового контенту

На рис. В.1: $p_{зв}$ – звуковий тиск, Па; $L_{pзв}$ – рівень звукового тиску, дБ; $U_{зв}$ – напруга звукового електричного сигналу, В; $N_{Uзв}$ – рівень напруги звукового електричного сигналу, дБ; $P_{Eзв}$ – потужність звукового електричного сигналу, Вт.

Створення звукового контенту передбачає, в першу чергу, перетворення акустичних сигналів в електричні мікрофонів, адже джерелами звукових сигналів є, в більшості, натуральні джерела – музичні інструменти, мова, шуми природи. Враховуючи, що сигнал на виході мікрофона має достатньо низький рівень, необхідно підсилення сигналу, що забезпечує мікрофонний підсилювач.

Після попереднього підсилення сигналу з мікрофона подальша робота над звуковим контентом передбачає оброблення за формою та необхідними параметрами для подальшого перетворення; безпосереднє перетворення сигналу, наприклад, в цифровий вигляд або в аналоговий модульований сигнал; оброблення сигналу за рівнем, динамічним діапазоном, частотною характеристикою, у часі або додавання у сигнал різноманітних звукових ефектів тощо; запис сигналу на носій з

попередньою «підготовкою» і узгодженням за параметрами запису; подальше накопичення, збереження, архівування звукового контенту в архівах; передавання, поширення, звукового контенту каналами передавання, а також приймання контенту на звукотехнічні засоби споживача; остаточне підсилення сигналів звукового діапазону підсилювача потужності для подальшого відтворення гучномовцями. Кінцевим результатом формування сигналу звукового контенту для слухачів є перетворення електричного сигналу в акустичний в, який може сприймати слухач.

Контрольні питання.

1. Які питання охоплює звукотехніка?
2. Що є основою звукотехніки?
3. Наведіть найбільш цікаві для Вас історичні події з розвитку звукотехніки.
4. Наведіть визначення та основні параметри, що характеризують акустичний звуковий сигнал.
5. Наведіть визначення та основні параметри, що характеризують звуковий сигнал в електричній формі.
6. Що означає термін «звуковий сигнал»?
7. Поясніть особливості структури формування та перетворення звукового контенту.

1. ЗАГАЛЬНІ ПОНЯТТЯ І ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВУКУ

Ключові слова: акустика, акустичний рівень, амплітуда, децибел, гармоніка, дифракція, електричний рівень, звук, звуковий тиск, звукотехніка, інтенсивність звуку, інтерференція, мова, музика, обертон, параметри подразнення, параметри відчуття, потужність, тембр, частота, частотний діапазон.

1.1 Визначення та характеристики звуку

Звук створюють механічні коливання різних елементів музичних інструментів, голосового апарату людини тощо, а поширюється він внаслідок передавання енергії механічних коливань частинок середовища як звукова хвиля.

Звук має подвійну природу [2]:

- з одного боку, це об'єктивний процес передавання енергії механічних коливань частинок в пружному середовищі (повітрі, рідині, твердому тілі);

- з іншого боку, це тільки ті види механічних коливань середовища, які сприймає слухова система людини.

Таким чином, звук - це особливий вид механічних коливань, здатних спричинювати слухові відчуття.

Звук - суб'єктивна характеристика акустичних коливань, що відображає здатність слухового апарату людини розпізнавати частоту і інтенсивність акустичних коливань певного частотного діапазону.

Акустика (з грецької ακουω (акуо) - «чую») - наука про звук, є одним з напрямків фізики (точніше - механіки).

Серед основних проблем, що входять в сферу сучасної акустики, виділяють такі:

- виникнення звуку, що вимагає дослідження фізичної природи звуку, а також методів і засобів його створення. Ці питання є також об’єктом досліджень в акустиці музичних інструментів, акустиці мови, електроакустиці;

- передавання звуку від джерела до слухача - це завдання архітектурної акустики, електроакустики тощо;

- сприйняття звуку слуховою системою і зв'язок слухових відчуттів з об'єктивними параметрами звуку – це сфера досліджень психоакустики.

Приблизно 25% інформації про навколишній світ людина отримує від слухових аналізаторів, 60% - від зорових і 15% - від інших.

Слух людини сприймає тільки обмежений клас механічних коливань середовища, що є в певних межах за рівнем гучності (зміна рівня звукового тиску від 0 дБ до 120 дБ) і за висотою тону (зміна частоти від 20 Гц до 20000 Гц). В цьому відношенні людина дуже поступається іншим біологічним суб'єктам (наприклад, діапазон чутних частот дельфіна сягає 200 кГц тощо)

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

- за способом створення - на натуральні та штучні (природний шум, мова, музика, біосигнали, електронні сигнали);

- за інформаційною ознакою - на звуки для передавання семантичної

(змістовної) і емоційної інформації (мова, спів і музика); для передавання інформації щодо навколишнього середовища (шум, сигнальні звуки тощо);

- за фізичними параметрами, такими як: частотний діапазон (інфразвук, ультразвук, гіперзвук тощо); ступінь передбачуваності (випадкові сигнали, наприклад білий шум; детерміновані сигнали; квазівипадкові сигнали, в тому числі музика і мова); часові параметри (періодичні, неперіодичні, імпульсні) тощо.

Всі ці види сигналів є об’єктом досліджень різних напрямків в акустиці як науки.

Напрямки акустики:

Загальна (фізична) акустика - теорія випромінювання і поширення звуку в різних середовищах, теорія дифракції, інтерференції і розсіювання звукових хвиль. Лінійні і енергетичні характеристики поширення звуку [3].

Архітектурна акустика - закони поширення звуку в закритих (напівзакритих, відкритих) приміщеннях, методи управління структурою поля в приміщенні тощо [4].

Психоакустика - основні закони слухового сприйняття, визначення зв'язку об'єктивних і суб'єктивних параметрів звуку, визначення законів розшифрування «звукового образу» [5].

Музична акустика - закономірності створення, поширення і сприйняття музичних звуків, точніше - звуків, які використовують в музиці [6].

Електроакустика - теорія і практика конструювання випромінювачів і приймачів, що перетворюють електричну енергію в акустичну і навпаки, а також всіх елементів сучасних звукових трактів запису, передавання та відтворення звуку [7].

Акустика мови - теорія і синтез мови, виділення мови на тлі шумів, автоматичне розпізнавання мови тощо [8].

Цифрова акустика – галузь, яку активно розвивають в останні роки, поступово виділяють в самостійний напрям у зв'язку зі створенням нового покоління мікропроцесорної (аудіопроцесорної) і комп'ютерної техніки.

Також є інші напрямки акустики, як то: біоакустика, будівельна акустика, аероакустика (авіаційна акустика), гідроакустика, акустика транспорту, медична акустика, ультразвукова акустика, квантова акустика (акустоелектроніка) тощо.

Звукова хвиля - це процес перенесення енергії механічних коливань в пружному середовищі (наприклад, у повітрі) і формується поступовим поширенням деформації (стиснення або розрідження) в пружному середовищі, тобто, хвилеподібною зміною щільності середовища, що викликано звуковими коливаннями [2].

Звуковими коливаннями називають коливальні рухи частинок середовища під дією збурення. Простір, в якому відбувається поширення цих хвиль, називають звуковим полем.

Звукові коливання в рідкому і газоподібному середовищах є поздовжніми коливаннями, тобто частинки середовища коливаються вздовж лінії поширення хвилі.

Напрямок поширення звукових хвиль називають звуковим променем, а поверхня, що з’єднує всі суміжні точки поля з однаковою фазою коливання

частинок середовища, називають фронтом хвилі. Фронт хвилі перпендикулярний звуковому променю.

Звукову хвилю характеризують:

- періодом коливань T – це час, протягом якого через певну точку середовища проходять два фронти звукового коливання з однаковою фазою, що надходять почергово один за одним. Період коливань зв'язаний з частотою коливань, якщо період коливань T, то частота коливань $f = 1/T$;

- довжиною хвилі λ – це відстань між сусідніми фронтами, що перебувають в однаковій фазі;

- швидкістю звуку c – швидкість, з якою поширюються звукові хвилі у відповідному середовищі. У різних середовищах і тілах швидкість звуку різна.

Довжина звукової хвилі дорівнює (рис. 1.1)

$$\lambda = cT = c/f,$$

де c - швидкість звуку [2].

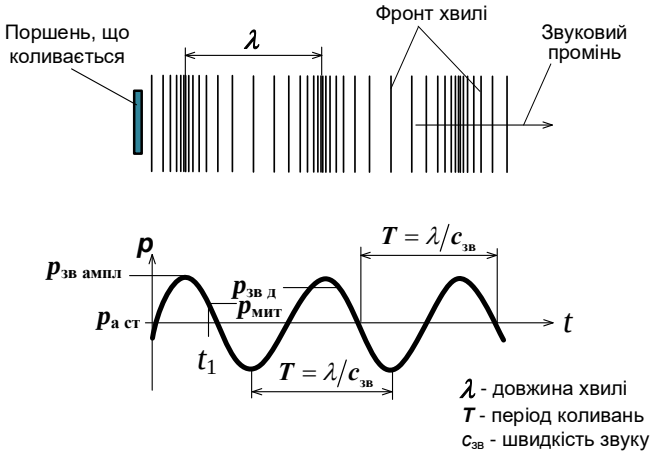


Рис. 1.1. Створення звукових коливань в повітряному середовищі в разі синусоїдного коливання джерела звуку

В газоподібних середовищах швидкість звуку залежить від густини (щільності) середовища ρ і статичного атмосферного тиску p_{ac} [2]:

$$c = \sqrt{\gamma p_{ac} / \rho},$$

де γ - коефіцієнт адіабати; $\gamma = C_p/C_V$, C_p й C_V - теплоємність середовища для постійного тиску та об'єму. Для повітря γ =1,402 за 15°С і тиску $p_{атм}$=101325 Па. (В рідких і твердих матеріалах швидкість звуку визначає густина (щільність) матеріалу ρ і модуль пружності E для відповідного виду деформації (подовжні коливання, крутильні, вигинні тощо): $c = \sqrt{E/\rho}$.)

У табл. 1.1 наведено значення швидкості звуку в деяких газоподібних і рідких середовищах, а також в твердих середовищах і тілах.

Нормальними умовами повітряного середовища, за яких проводять акустичні вимірювання, є $t_{повітря}$ = 20 °С, тиск 760 мм ртутного стовпа ($p_{атм}$=101325 Па) і вологість 80%.

Швидкість звуку в повітрі за температури 20°С становить $c_{зв}$=343 м/с, що дорівнює 1235 км/год. (за температури 0°С c = 331 м/с, для -20°С c = 319 м/с). Це значно більше швидкості переміщення людини (близько 6 км/год.) або поїзда (80-100 км/год.), але менше швидкості світла, яка становить 300000 км/с, або 108×10^7 км/год. Швидкість звуку не залежить від частоти.

Для розрахунків використовують значення 340 м/с за температури 17°С.

Таблиця 1.1. Швидкість звуку і питомий акустичний опір для деяких середовищ

Середовище	t, °С	$\rho, \frac{кг}{м^3}$	c, м/с	$\xi, \frac{кг}{м^2 \cdot с}$
Водяна пара	100	0.58	405	230
Повітря	0	1.29	331	428
Повітря	20	1.2	343	413
Вода прісна	15	999	1430	$1{,}43\cdot10^6$
Вода солона	15	1027	1500	$1{,}55\cdot10^6$
Гелій газ	0	0.18	970	172
Залізо	-	7800	~ 5.5 тис	$45\cdot10^6$
Скло	-	3250	5500	$18\cdot10^6$
Каучук	-	950	30	$28\cdot10^3$

Для повітряного середовища збільшення температури зумовлює збільшення швидкості, зменшення густини і питомого акустичного опору:

$$t°\uparrow - c\uparrow - \xi\downarrow - \rho\downarrow$$

Звуковими сигналами, які може чути людина, вважають сигнали з частотами від 20 Гц до 20 кГц, відповідно довжини звукових хвиль для цих сигналів від 17 м до 1,7 см. Реально людина сприймає діапазон 30-15000 Гц, відповідно довжини звукових хвиль для цих сигналів від 11,3 м до 2,27 см.

Частоти, що лежать нижче 20 Гц, називають інфразвуковими, а вище 20 кГц ультразвуковими. Звукові сигнали умовно ділять на низькочастотні (20 Гц - 500 Гц), середньочастотні (500 Гц - 5 кГц), високочастотні (5 кГц - 20 кГц).

Для зору людини, в разі сприйняття зображення, характерний параметр довжини хвилі сигналу становить λ=(380…760) нм, причому для червоного кольору λ_R=700 нм, для зеленого - λ_G=546,1 нм, для синього λ_B=435,8 нм, а довжина хвилі випромінювання лазера DVD λ_{DVD} = 635 нм, а для CD - λ_{CD} = 780 нм.

Собака сприймає частоти в межах від 40 Гц до 40 кГц, кішка – від 100 Гц до 100 кГц, дельфіни – від 60 Гц до 200 кГц, кажан - 1…160 кГц.

Звукові хвилі, що передають енергію і інформацію від джерела звукового сигналу у повітряному просторі, називають акустичними або звуковими акустичними сигналами. Акустичні звукові сигнали, що перетворені мікрофоном в електричні, називають електричними звуковими сигналами.

1.2. Прості та складні звуки

Існуючі в природі звуки збуджені або простими гармонічними (наприклад, синусоїдними) коливаннями, або складними, що складено з багатьох (іноді – багаточисленних), але одночасно здійснюваних гармонічних коливань [2].

Прості гармонічні коливання в природних умовах зустрічають вкрай рідко. Прості звуки - це синусоїдні коливання (чисті тони), що одержують з генератора звукових коливань. Прості звуки характеризують частотою і амплітудою. Частота простого звуку або основного тону складного звуку спричинює слухове відчуття, яке називають «висотою» тону. Зміна частоти коливань від 20 Гц до 20 кГц викликає сприйняття тону, що поступово змінюється від найнижчого (басового) до самого високого. Ступенем зміни висоти тону є октава. Октаві відповідає зміна частоти у 2 рази.

Просте гармонійне коливання (яке відображено рухом маси на пружині або рухом маятника без втрат і його називають синусоїдою) можна визначити як коливання тіла, зміщення якого описують формулою [5]

$$x(t) = A\sin(\omega t + \varphi_0),$$

де A - амплітуда коливань. Амплітудою коливань називають максимальне зміщення тіла від положення рівноваги (для сталих коливаннях вона постійна);

T - період коливань. Періодом коливань називають найменший проміжок часу, через який коливання повторюються (рис. 1.2). Наприклад, якщо маятник здійснює повний цикл коливань (в одну та іншу сторону) за 0,01 с, то його період коливань дорівнює цьому значенню: T = 0,01 с. Для простого гармонійного коливання період не залежить від амплітуди коливань;

f - частота коливань. Частоту коливань визначають числом коливань (циклів) за секунду. Одиниця її вимірювання дорівнює одному коливанню за 1 с і її називають 1 герц (Гц). Частота коливань - це величина, зворотна періоду: $f = 1 / T$.

Наприклад, якщо період коливань дорівнює T = 0,01 с, то частота коливань дорівнює $f = 1 / T = 1 / 0{,}01$ с = 100 Гц. Такий зв'язок між періодом і частотою коливань характеризує тільки просте гармонійне коливання;

ω - кутова (кругова) частота. Кутова частота пов'язана з частотою коливань за формулою $\omega = 2\pi f$. Її вимірюють в радіанах за секунду (рад/с). Наприклад, якщо частота f = 100 Гц, то ω = 628 рад / с;

φ_0 - початкова фаза. Початкова фаза визначає положення, з якого почалося коливання. Її вимірюють у градусах. Наприклад, якщо маятник почав коливатися з положення рівноваги, то його початкова фаза дорівнює нулю. Якщо маятник спочатку відхилити в крайнє праве положення і потім штовхнути, він почне коливання з початковою фазою 90°. Якщо два маятника (або дві струни, мембрани тощо) почнуть свої коливання з затримкою в часі, то між ними утворюється зсув фаз; якщо затримка в часі дорівнює одній чверті періоду, то зсув фаз - 90°, якщо половині періоду -180°, трьох чвертей періоду - 270°, одного періоду - 360°.

Якщо якесь тіло (пружину, маятник, струну, камертон тощо) вивести з положення рівноваги (тобто, прикласти силу і відпустити), то воно буде

здійснювати вільні періодичні коливання з певною частотою, яка залежить тільки від його жорсткості і маси. Цю частоту називають власною частотою коливань.

З урахуванням коефіцієнта жорсткості пружини (k) і маси тіла, що коливається (m), власну кутову частоту визначають як:

$$\omega^2 = \frac{k}{m}, \quad \text{або}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}},$$

а власна частота

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}.$$

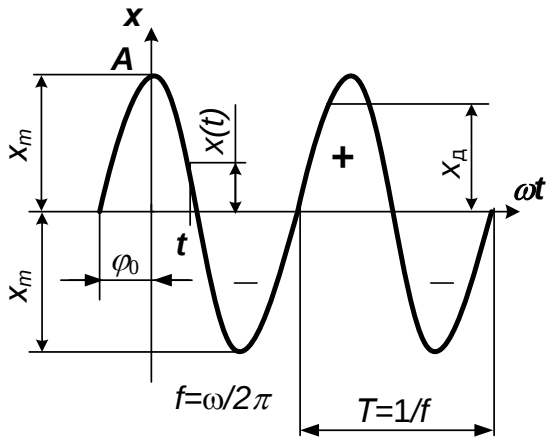


Рис. 1.2. Форма гармонійного синусоїдного коливання маси на пружині

Наприклад, струна завдовжки l, масою m і натягом G має основну власну частоту:

$$f = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{G}{ml}}.$$

В процесі коливання будь-якого тіла відбувається перехід одного виду енергії в інший вид, наприклад, кінетична енергія руху тіла у потенціальну енергію спокою. При цьому, частину енергії у реальних умовах витрачено на подолання тертя о повітря, тертя на опорах тощо. В результаті цього амплітуда коливань зменшується, а з часом коливання зупиняються і амплітуда дорівнює нулю. Має місце загасання коливань.

Загасаюче коливання можна графічно навести у вигляді коливань з амплітудою, що поступово зменшується (рис. 1.3).

Рівняння механічних коливань з урахуванням загасання матиме такий вигляд:

$$m\frac{dx^2}{dt^2}+r\frac{dx}{dt}+kx=0,$$

де r - коефіцієнт внутрішнього тертя в матеріалі, x – зміщення [3].

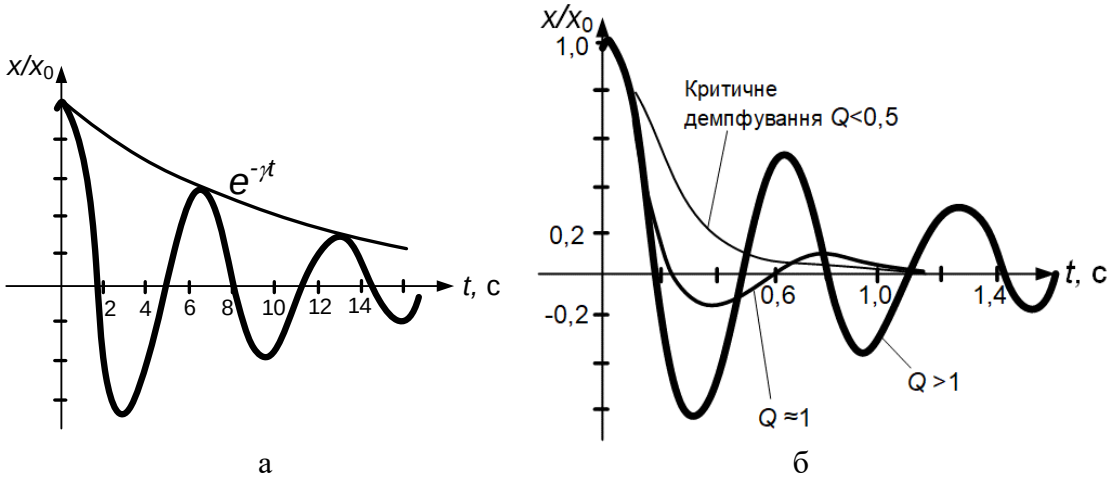
Рішення цього рівняння дає змогу отримати таку залежність зсуву від часу (рис 1.3,*а*)

$$x(t)=Ae^{-\gamma t}\sin(\omega' t+\varphi_0),$$

де γ - коефіцієнт загасання; він залежить від маси тіла і внутрішнього тертя матеріалу

$$\gamma=\frac{r}{2m}=\frac{1}{\tau}.$$

Чим більше коефіцієнт загасання, тим швидше згасають коливання (тим швидше зменшується їх амплітуда). Чим менша маса тіла, тим більший коефіцієнт загасання і коливання швидко загасають, тому у роялі верхні, тонкі струни не демпфують, їх коливання і так швидко згасають; на нижніх, важких струнах використовують демпфери, оскільки їх маса велика, отже, коефіцієнт загасання досить малий, і вони довго коливаються.



а б

Рис. 1.3. Процес загасання коливань за експонентною залежністю $e^{-\gamma t}$ (*а*) та кількість коливань для різних значень добротності Q системи (*б*)

Коефіцієнт загасання і, відповідно, швидкість загасання коливань залежать також від коефіцієнта внутрішнього тертя матеріалу, наприклад, в дереві, він досить великий, тому у ксилофона, де використовують дерев'яні пластинки, звук загасає швидко. У той же час у металевих пластинках металофона звук загасає набагато повільніше, адже коефіцієнт внутрішнього тертя у металі менше, ніж в дереві, (звук досить довго «дзвенить»).

Коефіцієнт загасання обернено пропорційний сталій часу τ (час, протягом якого амплітуда коливань зменшується в e=2,71828 раз). Враховуючи математичну сталу e, необхідно зазначити, що загасання коливання відбувається за

експонентою.

У електроакустиці, музичній акустиці, радіотехніці для визначення процесів загасання часто використовують величину, що називають добротністю системи - *Q*. Добротність *Q* визначають як величину, обернену коефіцієнту загасання [5]:

$$Q = \frac{\pi}{\gamma T} = \frac{\pi\tau}{T}.$$

Чим менше добротність, тим швидше згасають коливання. Добротність показує скільки періодів уміщено в проміжку часу, що дорівнює сталій часу τ.

Якщо $Q < 0{,}5$, то загасання буде настільки велике, що система взагалі не буде здійснювати коливання, вона практично відразу зупиниться (рис. 1.3,*б*). Такий рух називають аперіодичним. Значення добротності музичних інструментів досить велика: камертон Q = 10000, резонатор духового інструменту *Q* = 10-60 та ін. В той же час акустичні системи мають добротність на низьких частотах в межах *Q* = 0,7-1,2 [7].

За наявності загасання у системі процес коливання вже не буде періодичним, оскільки частота коливань буде зменшуватися зі збільшенням коефіцієнта загасання. Значення кутової частоти буде дорівнювати:

$$\omega' = \sqrt{\omega^2 - \gamma^2}.$$

Однак для музичних інструментів коефіцієнт загасання досить малий у порівнянні зі значенням власної кутової частоти, тобто, $\gamma << \omega$, тому зміна частоти в процесі загасання буде дуже незначною - можна вважати, що в процесі загасання в музичних інструментах висота тону практично не змінюється.

Необхідно відзначити, що процеси загасання звуку в музичних інструментах мають величезне значення для ідентифікації їх тембрів. Тому велику увагу в процесі виготовлення інструментів приділяють вибору матеріалів, технології оброблення тощо, оскільки від них залежить значення коефіцієнта загасання і, відповідно, швидкість і характер процесів загасання, тобто якість звучання даного інструменту.

Всі реальні тіла, що коливаються (струни, бруски, мембрани тощо) можна вважати з'єднанням нескінченно великого числа маленьких мас і пружин, тобто, як систему з нескінченно великим числом ступенів свободи. Такі системи називають розподіленими (на противагу системам з кінцевим числом мас і пружин, які називають зосередженими).

Струна має нескінченно багато власних частот і форм (мод) поперечних коливань, тому коливання струни називають коливанням складної форми.

У музичних інструментах використовують в основному поперечні коливання струн, пластин, мембран, однак у духових музичних інструментах збуджують поздовжні коливання «музичних» стовпів повітря в трубах.

У разі збудження реальних тіл вони роблять коливання складної форми, які можуть бути представлені у вигляді суми одночасних коливань з різними власними частотами і амплітудами (метод розкладання за частотами називають аналізом

Фур'є).

Набір власних частот і амплітуд коливань, які збуджують в даному тілі при впливі на нього зовнішньої сили (ударом, щипком, смичком тощо), називають амплітудним спектром. Якщо представлено набір фаз коливань на цих частотах, то такий спектр називають фазовим.

Приклад форми коливань струни гітари і її спектр наведено на рис. 1.4.

Основні терміни, які використовують для опису спектра тіла, що коливається, такі: перша основна (нижча) власна частота називають фундаментальною частотою f_1 (іноді її називають основною частотою f_0). Всі власні частоти вище першої називають обертонами, наприклад (рис. 1.5), фундаментальна частота $f_{0(1)}$=100 Гц, перший обертон - 110 Гц, другий обертон - 180 Гц тощо. Обертони, частоти яких знаходяться в цілочисельних співвідношеннях з фундаментальної частотою, називають гармоніками (а фундаментальну частоту називають першою гармонікою) [9].

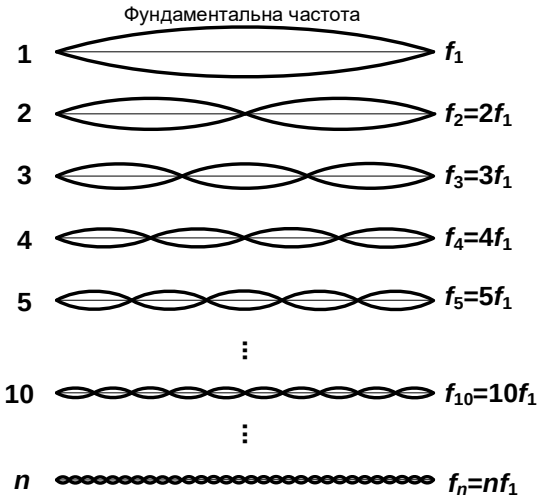


Рис. 1.4. Коливання струни на фундаментальній частоті та гармоніках

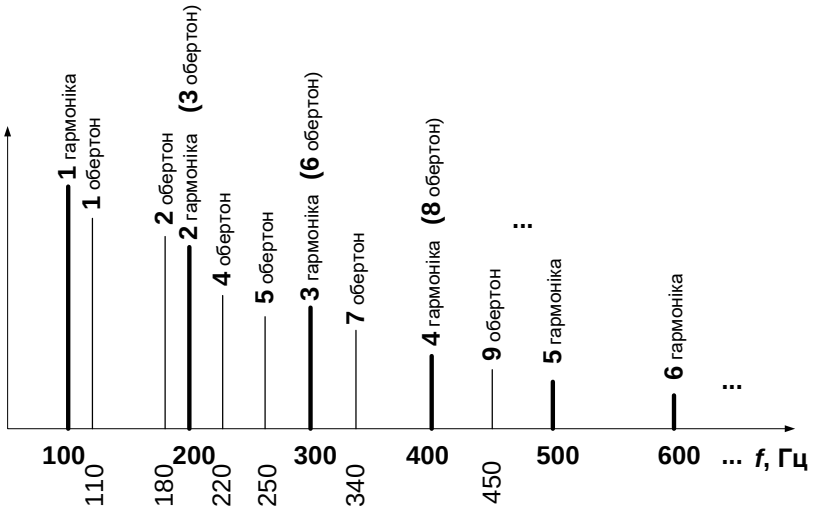


Рис. 1.5. Спектр (обертони, гармоніки) звукового сигналу

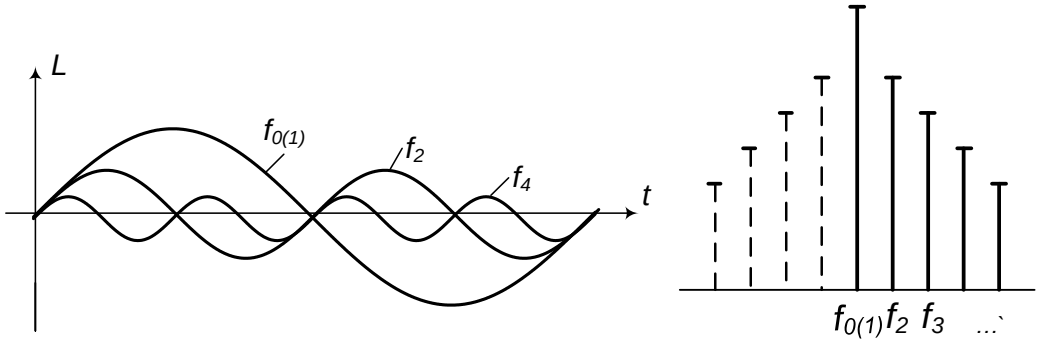
Слід зазначити, що не всі тіла можуть бути використані в якості вібраторів в музичних інструментах, що настроюють, а тільки ті, які мають власні частоти, що кратні фундаментальній, тобто, у яких всі обертони є гармоніками.

Отже, реальні випромінювачі, наприклад голосові зв'язки, струни рояля, скрипки коливаються одночасно не одним, а кількома способами, випромінюючи при цьому не тільки основне коливання, але і ряд інших, так званих вищих гармонік, або обертонів. Амплітуди обертонів завжди менше амплітуди основного коливання, а їх частоти в ціле число разів більше основної частоти. Склад обертонів визначає тембр (забарвлення) основного звуку, дають змогу розрізняти звучання одного і того ж тону, випромінюваного різними джерелами, наприклад, роялем і скрипкою, чоловічим голосом і жіночим тощо.

Внаслідок цього повний частотний діапазон спектра кожного музичного інструменту завжди ширше висотного діапазону основного ладу цього ж інструмента.

Складні музичні звуки створюють у результаті змішування простих гармонічних коливань – гармонік (рис. 1.6). Спектр складного музичного звуку обмежений числом складових його гармонік. Кожна з них має певні, тільки їй властиві значення частоти і амплітуди. Тому складні музичні звуки, як і мова, мають не суцільний (безперервний), а переривчастий, лінійчатий спектр [9].

Гармонічні складові, що є у спектрі складних звуків, надають їм характерного забарвлення, що називають тембром. Тембр визначають як числом гармонік в спектрі, так і співвідношенням їх амплітуд. Всі оцінки тембру є чисто суб'єктивними. Тембр може сприйматися приємним або неприємним, гучним, соковитим, м'яким, різким тощо.



а б

Рис. 1.6. Форма коливань (*а*) та спектр складного музичного звуку (*б*)

Складний музичний звук, крім цього, ще й нестаціонарний - він змінюється у часі: його спектральна густина (щільність) різна на різних ділянках відтворюваного частотного діапазону [10].

Мова, музика і шуми - це звуки, що збуджено коливаннями складної форми.

Частотний діапазон мови і музичних інструментів обмежений. Так, наприклад, нижнє «до» рояля дає тон з частотою 32,7 Гц, а верхнє, віддалене на сім октав від нижнього, - з частотою $32{,}7 \cdot 2^7 = 4186$ Гц (рис. 1.7) [11].

Серед параметрів, що характеризують звук можна виділити параметри подразнення і параметри відчуття.

Звукотехніка передбачає двоякий підхід до одного і того ж звукового коливання: об'єктивний (фізичний) і суб'єктивний (психологічний).

Звук як об'єктивне фізичне явище, що існує поза нашою свідомістю, і яке

описують сукупністю параметрів, діючи на слуховий орган людини, створює відповідне роздратування. Тому всі фізичні (об'єктивні) характеристики звуку (частота, спектр, амплітуда коливань тощо) можна назвати параметрами подразнення.

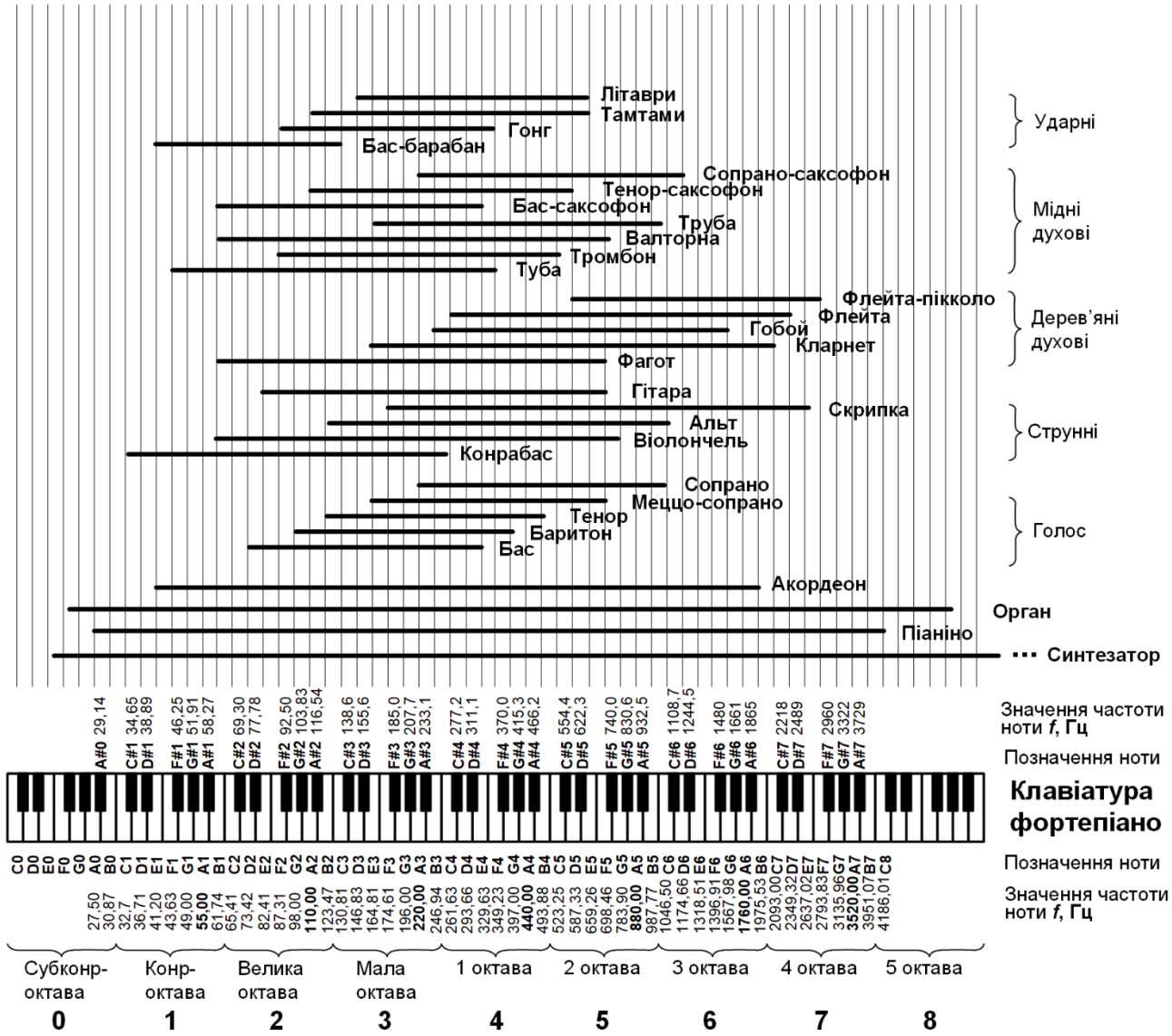


Рис. 1.7. Частотні діапазони музичних інструментів

Подразнення і його параметри можуть бути виміряні відповідними фізичними вимірювальними приладами.

Подразнення, що створено об'єктивно існуючими коливаннями повітря, викликає суб'єктивний ефект - відчуття звуку.

Суб'єктивне відчуття звуку - чуттєва копія фізичного явища - може бути розкладено на ряд складових, кожна з яких пов'язана з одним з параметрів роздратування. Ці складові і прийнято називати параметрами відчуття. До їх числа відносять: поріг чутності, поріг больового відчуття, гучність, тон, тембр тощо.

На відміну від параметрів подразнення, жоден з параметрів відчуття не піддається безпосередньому вимірюванню фізичними приладами. Щодо них, то можна оцінити лише опосередковано, вимірюючи, по суті, відповідні параметри

подразнення. В табл. 1.2 наведено відповідність параметрів подразнення та відчуття [10].

Таблиця 1.2. Параметри подразнення і параметри відчуття

Параметри подразнення	Параметри відчуття
Частота	Висота тону
Частотний діапазон, АЧХ	Тембр («сухий», «соковитий», різкий, натуральний).
Нерівномірність АЧХ	Зміна тембру
Амплітуда, рівень сигналу Інтенсивність сигналу	Гучність, рівень гучності
Нестабільність рівнів	Зміна гучності (коливання гучності)
Динамічний діапазон	Відчуття самих тихих і найгучніших звуків
Коефіцієнт нелінійних спотворень	Помітність спотворень
Зважений шум	Звукові завади

1.3. Лінійні та енергетичні характеристики звуку

Звукове поле характеризують лінійними і енергетичними характеристиками [2].

До лінійних характеристик звукового поля в рідинах і газах відносять звуковий тиск, зміщення частинок середовища, швидкість коливань і акустичний опір середовища.

До енергетичних характеристик звукового поля відносять інтенсивність звуку і щільність (густину) звукової енергії.

Лінійні характеристики

1) Звуковий тиск

Вважаємо, що тиск середовища за відсутності звукових коливань дорівнює $p_{а.ст}$ (див. рис.1.1), цей тиск називають статичним. Статичний атмосферний тиск визначають як 760 мм рт.ст., що відповідає тиску $p_{атм}$=101325 Па. В разі проходженні звукової хвилі тиск в кожній точці середовища безперервно змінюється: в моменти згущення частинок він більше статичного, а в моменти розрідження - менше.

Звуковим тиском у газах і рідинах називають різницю між миттєвим значенням тиску $p_{а\ м}$ в точці середовища в разі проходження через неї звукової хвилі і статичним тиском в тій же точці $p_{а\ ст}$, тобто

$$p_{зв} = p_{а\ м} - p_{а\ ст}.$$

Часто звуковий тиск називають надлишковим тиском середовища.

Звуковий тиск - величина знакозмінна: в моменти згущення (ущільнення) частинок середовища вона позитивна, в моменти розрідження (розширення) середовища - негативна. Цю величину оцінюють за амплітудою або за ефективним значенням. Для синусоїдних коливань ефективне значення p_e становить

$1/\sqrt{2} = 0,701$ від амплітудного, тобто $p_{\text{зв е}} = 0,701\ p_{\text{ампл}}$.

Звуковий тиск являє собою силу, що діє на одиницю поверхні:

$$p = F/S.$$

В системі SI його вимірюють в ньютонах на квадратний метр (Н/м^2). Цю одиницю називають паскалем (Па).

У системах зв'язку, мовлення і в подібних системах мають справу зі звуковим тиском, що не перевищує 100 Па, тобто, приблизно, у 1000 разів меншими атмосферного тиску ($p_{\text{атм}}$=101325 Па).

2) Зміщенням *u* називають відхилення частинок середовища від їх статичного положення під дією звукової хвилі, що проходить повз них. Якщо відхилення відбувається у напрямку руху хвилі, то зміщенню приписують позитивний знак, а у протилежному напрямку - негативний знак. Зміщення вимірюють в метрах (в системі SI).

3) Швидкістю коливань називають швидкість руху частинок середовища під дією звукової хвилі: $v = du/dt$, де *u* - зміщення частинок середовища; *t* - час.

Для руху частинки середовища у напрямку поширення хвилі швидкість коливань вважають позитивною, а у зворотному напрямку - негативною. Зауважимо, що цю швидкість не можна плутати зі швидкістю руху хвилі (швидкістю звуку), яка постійна для даного середовища і умов поширення хвиль.

Швидкість коливань вимірюють в метрах за секунду (м/с).

4) Середовище, в якому поширюється звук, чинить опір звуковому тиску, створюваному джерелом. Цей опір називають питомим акустичним опором. Його визначають відношенням звукового тиску *p* до швидкості коливань υ: $\zeta_a = p/\upsilon$.

Це слушно для лінійних умов, зокрема, коли звуковий тиск значно менше статичного. Питомим його називають тому, що являє собою опір для одиниці площі фронту хвилі. Питомий акустичний опір визначають властивості середовища або матеріалу і умови поширення хвиль. У табл. 1.1 наведено значення питомого опору для деяких середовищ і умов.

У загальному випадку питомий акустичний опір - комплексна величина $\zeta_a = w_a + iq_a$, де w_a и q_a - активна і реактивна складові питомого акустичного опору. Одиниця виміру питомого акустичного опору в системі SI – паскаль секунда на метр (Па·с/м).

Активний питомий акустичний опір визначають як

$$\zeta_a = \rho c_{\text{зв}}.$$

Оскільки питомий акустичний опір для повітря досить малий (за температури 20°С він складає 413 кг/(с·м^2), для порівняння: у металі він дорівнює приблизно $47,7\times10^6$ кг/(с·м^2)), то корисна енергія, яку випромінюють в повітряному середовищі також мала - музичні інструменти, голосовий апарат, гучномовці тощо мають коефіцієнт корисної дії (ККД) в межах 0,2-1% [7].

Енергетичні характеристики

1) Інтенсивністю звуку або силою звуку називають середню кількість звукової енергії, що проходить за одиницю часу (1 с) через одиницю площі (1 м), що

перпендикулярна до напрямку поширення хвилі. Позначають її *I*. Якщо кількість енергії за одиницю часу є акустична потужність будь-якого випромінювача, що визначено у ватах, тобто $P_{ак}$ (або $W_{ак}$), а $S_{фр}$ - повна площа фронту звукової хвилі, що визначено у квадратних метрах, то інтенсивність звуку у будь-якій точці цього фронту:

$$I = \frac{W_{ак}}{S_{фр}}, \frac{Вт}{м^2} .$$

Для точкового випромінювача і утвореної ним сферичної хвилі інтенсивність звуку у точці, що розташована на відстані *r* від джерела,

$$I = \frac{W_{ак}}{4\pi r^2}, \frac{Вт}{м^2},$$

оскільки площа сфери радіусом *r* дорівнює $4\pi r^2$.

Одиницею інтенсивності звуку є ват на квадратний метр (Вт/м^2) в системі SI.

Для періодичних процесів і неперіодичних процесів, відповідно

$$I = \frac{1}{T}\int_0^T p\upsilon dt \qquad \text{і} \qquad I = \lim_{T\to\infty}\int_0^T p\upsilon dt ,$$

де *p* і *v* - миттєві значення звукового тиску і швидкості коливань; *T* - період коливань.

Для синусоїдних коливань інтенсивність звуку пов'язана зі звуковим тиском і швидкістю коливань співвідношеннями

$$I = 0,5 p_m \upsilon_m \cos\psi = p_e \upsilon_e \cos\psi = \frac{p_e^2 \cos\psi}{|\zeta_a|},$$

де p_m і υ_m - амплітуди звукового тиску і швидкості коливань; p_e і υ_e - їх ефективні значення; ψ - зсув фаз між звуковим тиском і швидкістю коливань; ζ_a - питомий акустичний опір.

Інтенсивність звуку, створювана в даній точці в результаті одночасної дії двох або декількох джерел, визначають як суму інтенсивностей, що збуджено в цій точці кожним із джерел окремо

$$I_{заг} = I_1 + I_2 + \ldots + I_n.$$

Інтенсивність звуку у цій точці звукового поля пов'язана з ефективним (дієвим) значенням звукового тиску у тій же точці виразом

$$I = \frac{p_{еф}^2}{\rho_0 c_{зв}},$$

де $\rho_o = 1{,}2\cdot 10^3$ кг/м^3 - щільність повітря за нормальних умов: атмосферному тиску 760 мм рт. ст., температурі $t° = 20$ °С і вологості 80%, а $c_{зв} = 343$ м/с - швидкість поширення звуку у повітрі за тих же умов.

Звідси випливає, що дієве (ефективне) значення звукового тиску

$$p_{\text{еф}} = \sqrt{I \rho_0 c_{\text{зв}}},$$

і, отже, звуковий тиск, що створено в даній точці в результаті одночасної дії двох або декількох джерел, не може дорівнювати сумі тисків, що збуджено в цій точці кожним з джерел окремо.

2) Щільністю (густиною) звукової енергії ε називають кількість звукової енергії, що знаходиться в одиниці об'єму. Одиницею щільності є джоуль на кубічний метр (Дж/м^3) в системі SI і ерг на кубічний сантиметр (ерг/см^3) в абсолютній системі CGS одиниць: 1 Дж/м^3 = 10 ерг/см^3. Щільність енергії ε пов'язано з інтенсивністю звуку I і звуковим тиском p_e співвідношенням

$$\varepsilon = I/c = p_e^2/(c^2\ \rho).$$

1.4. Види звукових хвиль та особливості їх поширення

1.4.1. Плоска хвиля

Фронт плоскої хвилі - площина, звукові промені йдуть паралельно один одному (рис. 1.8,*а*). Енергія в плоскій хвилі не розходиться в сторони, інтенсивність звуку практично не залежить від відстані, що пройшла хвиля, якщо знехтувати втратами на в'язкість середовища, молекулярне розсіювання, турбулентний загасання і дифракцію хвиль [5].

Амплітуди звукового тиску і швидкості коливань в цій ситуації теж не залежать від відстані, що пройдено хвилею.

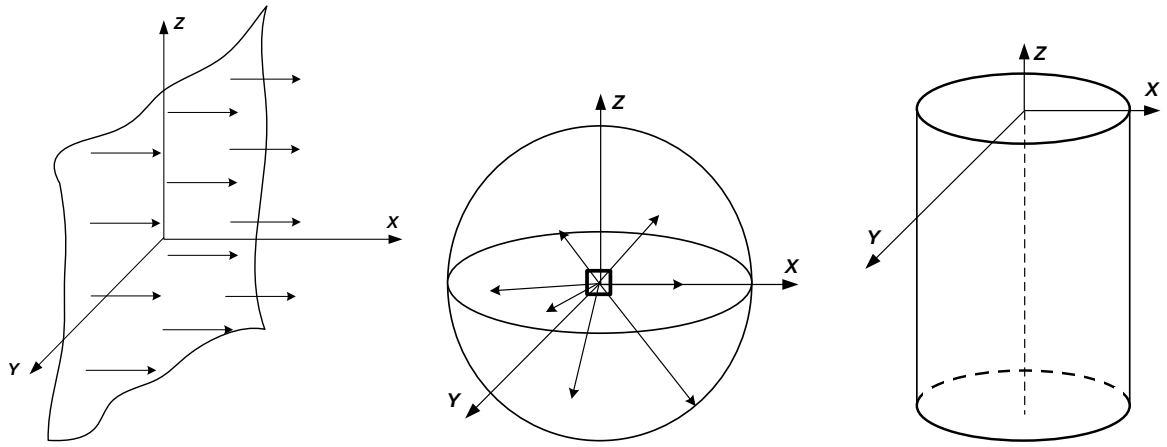
Питомий акустичний опір для плоскої хвилі чисто активний і становить

$$\zeta_a = p/\upsilon = p_m/\ \upsilon_m = p_e/\ \upsilon_e = \rho c_{\text{зв}}.$$

Для повітря за температури 20 °С і нормального атмосферного тиску акустичний опір ρc = 413 кГ/(м^2·с) = 41,3 г/(см^2·с). Інтенсивність звуку у плоскій хвилі

$$I = p_m\ \upsilon_m/2 = p_e\ \upsilon_e = p^2_e/(\rho c_{\text{зв}}),$$

де p_e і υ_e - ефективні значення звукового тиску і швидкості коливань.



а б в

Рис. 1.8. Вид плоскої звукової хвилі (*а*), сферичної (б) та циліндричної (*в*) хвилі

1.4.2. Сферична хвиля

Звукове поле сферичної хвилі - в області низьких частот, де довжина звукової хвилі велика по відношенню до розміру джерела $\lambda >> d$ (наприклад, на частоті 40 Гц, де довжина хвилі дорівнює 8,5 м, практично будь-яке джерело звуку матиме розміри менше довжини хвилі), можна вважати джерело сигналу точковим, а тривимірну звукову хвилю, що розходиться в різні боки навколо нього – сферичною (рис. 1.8,*б*) [5].

Фронт сферичної хвилі являє собою сферу, в центрі якої знаходиться джерело коливань, а звукові промені збігаються з радіусами сфери.

Повна потужність звуку, що виходить з джерела звуку і розходиться в усіх напрямках, не змінюється за значенням з віддаленням від джерела звуку, якщо знехтувати втратами на в'язкість середовища і молекулярне розсіювання, тобто

$$P_{\text{а}} = \text{const.}$$
$$P_{\text{а}} = 4\pi r_a^2 I_a = 4\pi r_b^2 I_b.$$

Інтенсивність звуку (тобто потужність, що припадає на одиницю площі) зменшується з відстанню, адже площа поверхні сфери, що розходиться, збільшується пропорційно $4\pi r^2$. При цьому зменшення її відбувається за законом: $I = P_{\text{а}}/(4\pi r^2)$, таким чином, інтенсивність звукової хвилі зменшується обернено пропорційно квадрату відстані. Тобто, інтенсивність звуку з видаленням від джерела звуку зменшується за квадратичним законом $I_r = I_1/r^2$, де I_1 - інтенсивність звуку на відстані одиниці довжини від центру джерела звуку; r - відстань фронту хвилі від цього центру.

Оскільки інтенсивність I і амплітуда звукового тиску p пов'язано таким співвідношенням: $I = p^2/\rho c$ (де ρ - щільність середовища, c - швидкість звуку в ній), то у полі сферичної хвилі звуковий тиск зменшується зі збільшенням відстані за таким законом: $p \sim 1/r$. Звуковий тиск для сферичної хвилі з відстанню зменшується за гіперболічним законом $p_r = p_1/r$, де p_1 - звуковий тиск на відстані одиниці довжини від центру джерела звуку.

Отже, рівень звукового тиску зменшується на 6 дБ кожен раз, коли відстань до

джерела подвоюється.

Питомий акустичний опір у сферичної хвилі має активну і реактивну складові.

Модуль опору

$$|\zeta_{\text{a}}| = \frac{p_m}{\upsilon_m} = \rho c \frac{\omega r}{\sqrt{c^2 + \omega^2 r^2}} = \rho c \cos\psi.$$

де r - відстань від центру джерела (радіус хвилі); ω - кутова швидкість коливань; ψ - зсув фаз між звуковим тиском і швидкістю коливань, tg ψ = λ/(2πr), (на середніх частотах на відстані 1 і більше метрів вже можна не враховувати зсув фаз); υ - швидкість коливань.

Тобто акустичний опір в сферичній хвилі за значенням не перевищує акустичного опору в плоскій хвилі.

Інтенсивність звуку для синусоїдних коливань у сферичної хвилі визначають як:

$$I = \frac{p_{\text{e}}^2}{|\zeta_{\text{a}}|}\cos\psi = \frac{p_{\text{e}}^2}{\rho c}.$$

1.4.3. Циліндрична хвиля

Для циліндричної хвилі фронт хвилі має круглу циліндричну форму, вісь циліндра збігається з віссю джерела звуку, а радіуси циліндра - зі звуковими променями (якщо джерело звуку має нескінченну довжину) (рис. 1.8,*в*). Потік енергії не розходиться уздовж твірної циліндра [5].

$$P_{\text{a}} = 2\pi h r_a I_a = 2\pi h r_b I_b.$$

Інтенсивність звуку в циліндричній хвилі з відстанню від джерела звуку зменшується за гіперболічним законом $I_r = I_1/r$, а звуковий тиск - за законом $p_r = p_1/\sqrt{r}$. Циліндрична хвиля виникає в разі озвучення простору довгими прямолінійними ланцюжками гучномовців.

1.4.4. Інтерференція та дифракція хвиль

Інтерференція звукових хвиль виникає за одночасного поширення двох або декількох хвиль, що поширюються у різних напрямках. Інтерференція – це взаємне накладення звукових хвиль одна на іншу [5].

Яскравий приклад інтерференції звукових хвиль ілюструє ситуація, якщо дві звукові хвилі з однаковими амплітудами поширюються у протилежних напрямках. Така ситуація виникає за відбиття звукової хвилі, що падає перпендикулярно на поверхню, у якій коефіцієнт звукопоглинання дорівнює нулю. За цих умов виникає хвиля, що стоїть, з пучностями і вузлами. Відстані між сусідніми вузлами, як і відстані між сусідніми пучностями, дорівнюють половині довжини хвилі (рис. 1.9), а між пучностями і сусіднім вузлом - чверті хвилі.

У пучності тиску амплітуда звукового тиску дорівнює подвоєній амплітуді хвилі, що біжить, у вузлі амплітуда дорівнює нулю.

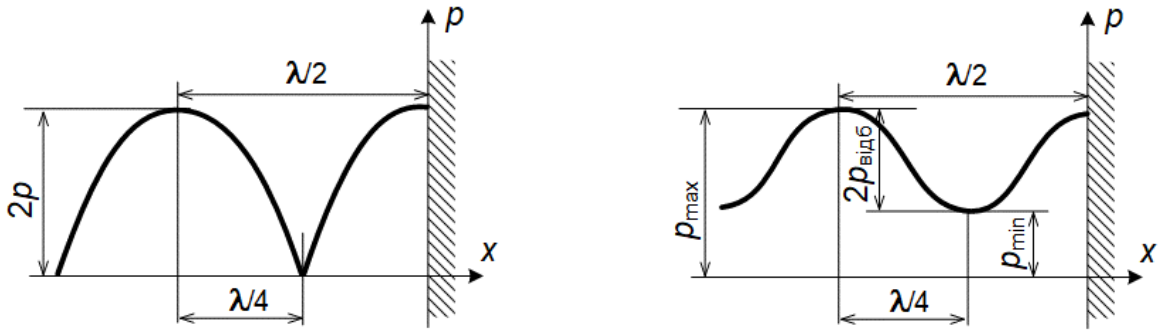
У стоячих хвилях потік енергії дорівнює нулю, тому їх характеризують або щільністю енергії, або квадратом звукового тиску.

За неоднакових амплітуд прямої і зворотної хвиль хвилю, що стоїть, утворюють зворотна хвиля і частина прямої, що за амплітудою дорівнює амплітуді зворотної хвилі. Інша частина прямої хвилі утворює хвилю, що біжить (рис. 1.9,*б*). Амплітуда її за звуковим тиском

$$p_{\text{біж}} = p_{\text{пр}} - p_{\text{звор}}.$$

У пучності такої комбінації хвиль амплітуди обох хвиль додаються, а у вузлі – віднімаються:

$$p_{\max} = p_{\text{пр}} + p_{\text{звор}}, \qquad p_{\min} = p_{\text{пр}} - p_{\text{звор}}.$$



а б

Рис. 1.9. Розподіл амплітуд звукового тиску і швидкості коливань у разі інтерференції для однакових амплітуд звукового тиску (*а*) та для неоднакових амплітуд звукового тиску (*б*).

Якщо відомі значення амплітуд тиску в пучності і вузлі, то

$$p_{\text{звор}} / p_{\text{пр}} = (p_{\max} - p_{\min})/(p_{\max} + p_{\min}) = (1 - \delta)/(1 + \delta),$$

а

$$p_{\min}/p_{\max} = \delta,$$

де δ - коефіцієнт хвилі, що біжить. У цьому випадку потік енергії створює тільки хвиля, що біжить. Щільність енергії містить дві складові - щільності хвилі, що біжить і хвилі, що стоїть.

Дифракція - огинання звуковими хвилями перешкоди. Якщо розміри перешкоди менші, ніж довжина звукової хвилі або хвиля падає близько до краю перешкоди (у порівнянні з довжиною хвилі), то хвиля дифрагує навколо перешкоди (рис. 1.10) [5].

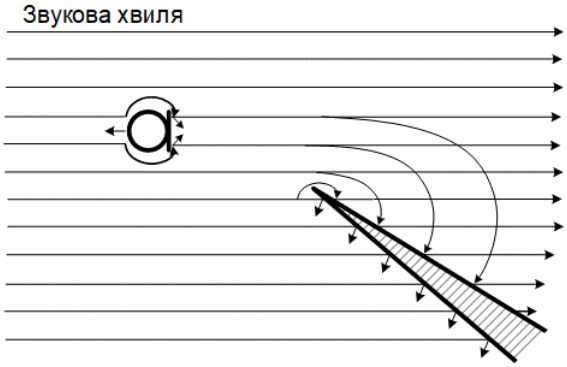


Рис. 1.10. Ілюстрація дифракції звукових хвиль

1.4.5. Відбиття, заломлення та загасання звуку

Якщо звукова хвиля має на своєму шляху яку-небудь перешкоду або середовище з іншими параметрами, то у разі падіння звукової хвилі на поверхню відбувається часткове поглинання і часткове відбиття звукової хвилі. Закони відбиття звукових хвиль аналогічні законам відбиття світлових хвиль: кут падіння φ_1 дорівнює куту відбиття φ_2 (рис. 1.11,*а*) – перший закон Снелліуса [5].

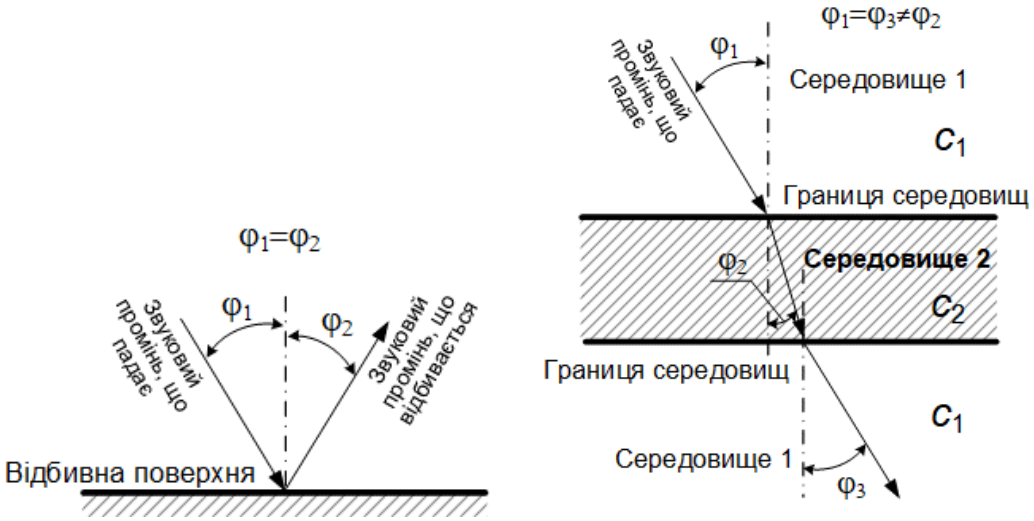


Рис. 1.11. Ілюстрація відбиття (*а*) та заломлення (*б*) звукових хвиль

Ефективність відбиття характеризують коефіцієнтом відбиття. В акустиці коефіцієнтом відбиття називають відношення інтенсивності відбитої звукової хвилі $I_{\text{відб}}$ й інтенсивності хвилі, що падає, $I_{\text{пад}}$, тобто коефіцієнт відбиття

$$\beta_{\text{відб}} = \frac{I_{\text{відб}}}{I_{\text{пад}}}.$$

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

$$p_{\text{відб}} = p_{\text{пад}} \frac{(\zeta_{\text{пад}} - \zeta_{\text{відб}})}{(\zeta_{\text{пад}} + \zeta_{\text{відб}})} = p_{\text{пад}} \cdot \beta \exp(\mathrm{i}\varphi),$$

де $\zeta_{\text{відб}}$ и $\zeta_{\text{пад}}$ - питомі акустичні опори середовища, що відбиває і середовища, в якому розглядають явища відбиття; β - модуль коефіцієнта відбиття за тиском; φ - зсув фаз в хвилях тиску в разі відбиття.

В разі відбиття виникає зсув фаз між звуковими тисками хвилі, що падає, і відбитої хвилі. Якщо опори обох середовищ активні, то зсув фаз дорівнює або нулю, (коли опір середовища, що відбиває, більше опору первинного середовища), або 180° (коли опір середовища, що відбиває, менше опору первинного середовища). Якщо один або обидва акустичних опори мають реактивні складові, то зсув фаз є в межах від 0° до 180°.

Коефіцієнт відбиття за звуковим тиском визначають за формулою

$$\beta_{\text{відб}} = \frac{(\zeta_{\text{пад}} - \zeta_{\text{відб}})^2}{(\zeta_{\text{пад}} + \zeta_{\text{відб}})^2} = \left(\frac{p_{\text{відб}}}{p_{\text{пад}}} \right)^2 .$$

Визначимо коефіцієнт відбиття від межі розділу повітряних мас з температурами 20 °С і 0 °С ($t^o \uparrow \rightarrow \xi_{\text{а}} \downarrow$). За даними з табл. 1.1 отримуємо

$$\beta_{\text{відб}} = \frac{(428-413)^2}{(428+413)^2} = 3 \cdot 10^{-6},$$

тобто мізерно малий коефіцієнт відбиття.

У разі, якщо відбиття відбувається від межі повітря і водяної пари, коефіцієнт відбиття становить

$$\beta_{\text{відб}} = \frac{(428-230)^2}{(428+230)^2} = 0{,}08,$$

тобто відбивається 8% всієї енергії.

Якщо відбиття створює вода (прісна), то коефіцієнт відбиття

$$\beta_{\text{відб}} = \frac{(428-1{,}43 \cdot 10^6)^2}{(428+1{,}43 \cdot 10^6)^2} = 0{,}9988,$$

тобто відбивається 99,88% всієї енергії.

Коефіцієнти відбиття залежать від кута падіння звукових хвиль, тому у таблицях зазвичай наведено величини дифузних коефіцієнтів відбиття, виміряних для можливих кутів падіння хвиль і нормальних (для кута падіння 90°).

Якщо зсув фаз щодо тиску в разі відбиття дорівнює нулю (акустичний опір середовища, що відбиває, багато більше акустичного опору первинного середовища), то на межі середовищ виходить пучність звукового тиску (рис. 1.9,*а*), а швидкість коливань буде мати вузол коливань. За зворотного співвідношення акустичних опорів обох середовищ зсув фаз для звукового тиску дорівнює 180°: біля межі розділу є вузол звукового тиску і пучність швидкості коливань.

Якщо зсув фаз у разі відбиття за звуковим тиском відрізняється від 0° і 180°, то вузли і пучності, відповідно, виникають подалі від межі середовищ.

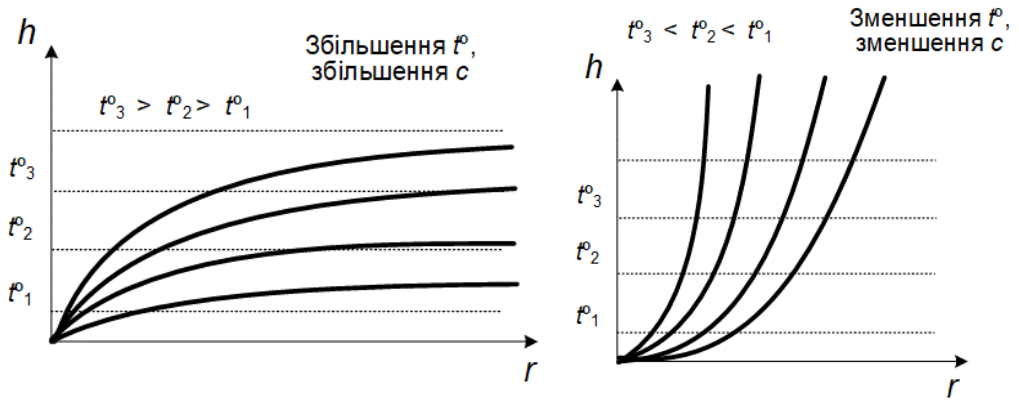
Звукова хвиля, що падає на межу двох середовищ, як і світлова хвиля, частково проходить у інше середовище. При цьому відбувається заломлення хвилі, тобто за умови, якщо хвиля падає на межу двох середовищ під кутом φ_1 з першого середовища, то у другому середовищі напрямок руху хвилі (звукового променя) буде під кутом φ_2 (рис. 1.10) [5].

Відношення кута падіння φ_1 до кута заломлення φ_2 (рис. 1.11,*б*) визначають відношенням швидкостей поширення звукових коливань в цих середовищах:

$$\sin \varphi_1 / \sin \varphi_2 = c_1 / c_2,$$

де c_1 і c_2 - швидкості звуку у обох середовищах. Якщо питомі акустичні опори обох середовищ близькі один до одного, то майже вся енергія перейде з одного середовища в інше, а якщо при цьому середовища (або матеріали з них) будуть мати різні швидкості звуку, то можна зробити акустичні лінзи з таких матеріалів.

Якщо середовище має змінні параметри (атмосферний тиск і щільність), то відбувається вигин звукових хвиль (рис. 1.12) [2]. Наприклад, для горизонтального поширення звукової хвилі у повітрі над землею температура шарів повітря з висотою *h* може змінюватись. У разі збільшенні температури повітря над землею, збільшується і швидкість звуку, звуковий промінь буде згинатися до низу (рис. 1.12,*а*). За зменшення температури повітря з висотою щодо поверхні землею швидкість звуку буде зменшуватись, а звуковий промінь буде вигинатися вгору (рис. 1.12,*б*). На вигин звукових хвиль дуже впливають вітер і потоки повітря у різних напрямках, а також відстань від джерела *r*.



$$t^\circ\uparrow - c\uparrow, \quad t^\circ\downarrow - c\downarrow.$$

а б

Рис. 1.12. Ілюстрація вигину звукових хвиль у разі зміні швидкості звуку у разі зменшення (*а*) та у разі збільшення (*б*), де *h* – висота поширення звукової хвилі щодо поверхні землі, *r* – відстань від джерела звуку

У реальних середовищах звукові хвилі загасають внаслідок в'язкості середовища і молекулярного загасання. Причому загасання звукових хвиль, спричинене через в'язкість, а також молекулярне загасання залежать від частоти

коливань, температури і вологості повітря і його визначають в децибелах на кілометр.

Повне загасання N визначають сумою загасання через в'язкість $N_В$ і молекулярне $N_М$.

Звукові хвилі загасають в разі поширення уздовж поверхні, що поглинає. При цьому, чим більше коефіцієнт поглинання цієї поверхні, тим більше загасання вона вносить у хвилю, що поширюється.

Залежно від частоти загасання зростає зі зменшенням довжини хвилі (зі збільшенням частоти). Наприклад, у разі поширення звукової хвилі дотично до поглинаючої поверхні (глядачі в залі, натовп на майдані) відбувається значне загасання звуку.

Так, на частоті 800 Гц звуковий тиск зменшується за квадратичним законом замість гіперболічного. Точніше, на цій частоті звукова хвиля отримує додаткове загасання на 21 дБ для десятикратної зміни відстані (загальне загасання дорівнює 41 дБ). На частоті 250 Гц додаткове загасання складає 3 дБ, а на частоті 6400 Гц – 8 дБ.

На великі відстані (понад 1 км) крім «класичного» загасання, що враховує вплив в'язкості середовища і молекулярного загасання, суттєво впливає загасання внаслідок турбулентності повітря. Це загасання визначено вітром і в чималому ступені потоками повітря у вертикальному напрямку (через різницю температур землі і повітря, а також різниці тиску за висотою). Обчислюють за спеціальними таблицями і графіками.

1.5 Рівні звукового сигналу

У акустиці, звукотехніці за рівень параметра приймають величину, пропорційну логарифму відносного значення цього параметра [9]. Таким чином, при застосуванні десяткових логарифмів для параметра K рівень

$$N=a\lg(K/K_0),$$

де a - коефіцієнт пропорційності, що визначено розміром обраних логарифмічних одиниць. Якщо обрати a = 1, то рівень енергетичних параметрів вимірюють у белах (Б):

$$N_е = \lg(K_е/K_{0е}),$$

а для лінійних параметрів рівень

$$N_л = 2\lg(K_л/K_{0л}),$$

оскільки $K_е = K_л^2$.

Більш зручною одиницею виявилася одиниця 0,1 Б - децибел (дБ), і тому застосовують такі формули для визначення рівнів [11]:

- для енергетичних параметрів $N_е = 10\lg(K_е/K_{0е})$
- для лінійних $N_л = 20\lg(K_л/K_{0л})$.

K_0 - умовне значення параметра, яке відповідає нульовому значенню рівня, і

тому його часто називають нульовим значенням, або нульовим рівнем. Якщо K_0 нормоване, то відповідний рівень параметра називають абсолютним, у всіх інших випадках рівень називають відносним.

Відносний рівень пов'язаний з абсолютним таким чином

$$N_{\text{відн}} = N_{\text{абс}}(K) - N_{\text{абс}}(K_0),$$

де $N_{\text{абс}}(K)$ - абсолютний рівень для заданого значення параметра K; $N_{\text{абс}}(K_0)$ - абсолютний рівень для заданого значення параметра K_0. Обидва рівня визначають відносно нормованого значення K_0.

Зміна енергетичного параметра у 2 рази відповідає зміні рівня на 3 дБ, у 4 рази - на 6 дБ, у 10 разів - на 10 дБ, у 100 разів - на 20 дБ, у 10^n раз - на $10n$ дБ.

Зміна лінійного параметра у 2 рази відповідає зміні рівня на 6 дБ, зміна його у 4 рази - на 12 дБ, зміна у 10 разів - на 20 дБ, зміна у 100 разів - на 40 дБ, у 10^n раз - на $2n \cdot 10$ дБ тощо.

Наприклад, звуковий тиск 2 Па відповідає рівню звукового тиску 100 дБ, а звуковий тиск 1 Па відповідає рівню 94 дБ, звуковий тиск 4 Па - рівню 106 дБ тощо.

Крім того слід звернути увагу на те, що рівні звукового тиску декількох різних джерел, які працюють одночасно, не можна безпосередньо додавати. Для визначення сумарного рівня необхідно обчислити значення звукового тиску, відповідного кожному рівню: p_1 і p_2. Потім визначити сумарний тиск $p = \sqrt{p_1^2 + p_2^2}$ і рівень L.

Наприклад, якщо звучать дві скрипки з рівнем 80 дБ і 86 дБ, то їх сумарний рівень звукового тиску визначають таким чином: рівню 80 дБ відповідає звуковий тиск 0,2 Па, рівню 86 дБ звуковий тиск 0,4 Па. Сумарний тиск дорівнює: p = 0,447 Па, звідси скрипка і рояль разом створюють рівень звукового тиску 86,98 дБ.

Якщо дано два рівня і треба знайти «сумарний рівень», наприклад рівень сумарної потужності, то розрахунки виконують таким чином: знаходять різницю між рівнями і до великого рівня додають поправку, що наведено на рис. 1.13 для різних значень різниці рівнів. Таке підсумовування придатне тільки у випадках незалежності процесів один від одного.

Перерахунок рівня у відносні значення

- для енергетичних параметрів

$$K = K_{\text{оЕ}} \cdot 10^{0,1N},$$

- для лінійних -

$$K = K_{\text{оЛ}} \cdot 10^{0,05N},$$

де N - рівень в дБ.

В звукотехніці аналізують електричні рівні та акустичні рівні залежно від фізичних особливостей формування сигналу.

В електроніці рівні аналізують за потужністю, як основного енергетичного параметра електричних кіл, та за напругою.

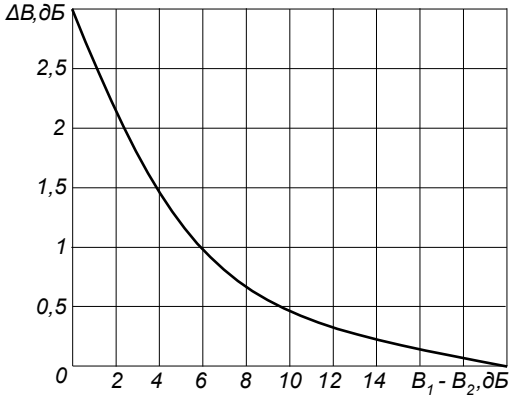


Рис. 1.13. Залежність поправки до більшого рівня від різниці рівнів у разі додавання двох рівнів за інтенсивністю

В акустиці рівні аналізують за інтенсивністю та звуковим тиском [11].

За умовне (нормоване) значення нульового рівня електричної потужності P_0 приймають 1 мВт. Абсолютний рівень електричної потужності

$$N_P = 10\lg\frac{P}{P_0} = 10\lg\frac{P_{\text{Вт}}}{10^{-3}} = 10\lg P_{\text{мВт}},$$

де $P_{\text{мВт}}$ - потужність в міліватах; $P_{\text{Вт}}$ - потужність в ватах. Цей рівень потужності вимірюють в децибелах потужності відносно мілівата (дБм, dBm – м або m позначає P_0 = 1 мВт).

Відповідно абсолютний рівень за напругою

$$N_U = 20\lg\frac{U}{U_0} = 20\lg\frac{U_{\text{В}}}{0,775} = 20\lg\frac{U_{\text{мВ}}}{775},$$

де U_0 = 775 мВ - умовне (нормоване для Європи і U_0 = 1 В - для Америки) значення нульового рівня напруги; $U_{\text{В}}$ - дієве (середньоквадратичне) значення напруги, у вольтах; $U_{\text{мВ}}$ - дієве (середньоквадратичне) значення напруги, у мілівольтах. Цей рівень напруги вимірюють в децибелах напруги (dBv) для Америки і (дБн, dBu) для Європи; (v – позначає вольт, н, u - напруга).

Рівні за потужністю збігаються з рівнями за напругою за умови вимірювання їх на опорі, що дорівнює значенню 600 Ом. Якщо опір навантаження $R_{\text{н}}$ відрізняється від 600 Ом, то рівень за потужністю відрізняється від рівня за напругою на таке значення

$$N_P - N_U = 10\lg\frac{600}{R_{\text{н}}} = 27,8 - 10\lg R_{\text{н}},$$

де $R_{\text{н}}$ - опір навантаження, в омах (Ом).

За умовне (нормоване) значення нульового рівня інтенсивності звуку прийнята інтенсивність, що відповідає порогу чутності й дорівнює I_0=10^{-12} Вт/м^2.

Абсолютний рівень інтенсивності в децибелах

$$L_I = 10\lg\frac{I}{I_0} = 10\lg\frac{I_{\text{Вт}}}{10^{-12}} = 10\lg I_{\text{Вт}} + 120,$$

де $I_{\text{Вт}}$ - рівень інтенсивності, ват на квадратний метр (Вт/м^2).

Рівень за звуковим тиском у децибелах для повітря визначають відносно звукового тиску, що відповідає порогу чутності за звуковим тиском і визначається виразом

$$L_p = 20\lg\frac{p}{p_0} = 20\lg\frac{p_{\text{Па}}}{2\cdot10^{-5}} = 20\lg p_{\text{Па}} - 20\lg 2\cdot10^{-5} = 20\lg p_{\text{Па}} + 94,$$

де p_0 - умовне дієве значення для нульового рівня за звуковим тиском, що відповідає тиску порога чутності людини (p_0 =2·10^{-5} Па); $p_{\text{Па}}$ - дієве значення звукового тиску, у паскалях.

Наприклад, якщо звуковий тиск дорівнює p = 2 Па, то рівень звукового тиску дорівнює:

$$L = 20\cdot\lg(p/p_0) = 20\lg(2\text{ Па}/(2\times10^{-5})\text{Па}) = 20\cdot\lg(1\times10^{+5}) = 20\times5 = 100\text{ дБ}.$$

Зворотний приклад: якщо заданий рівень звукового тиску L = 80 дБ, то звуковий тиск визначають таким чином:

$$L = 20\lg(p/p_0),\ \text{звідси } 80\text{ дБ} = 20\lg(p/(2\cdot10^{-5})),\ \text{тобто, } \lg(p/(2\cdot10^{-5})) = 4.$$

Отже $10^4 = p/(2\cdot10^{-5})$, звідси значення звукового тиску дорівнюватиме p = 0,2 Па.

Рівень за щільністю (густиною) звукової енергії в децибелах для повітря прийнято визначати відносно щільності, яка відповідної нульовому значенню інтенсивності для швидкості звуку, що дорівнює 333 м/с, тобто рівень визначають за виразом

$$L_\varepsilon = 10\lg(\varepsilon/\varepsilon_0) = 10\lg(\varepsilon_{\text{Дж}}/(3\cdot10^{-15})),$$

де ε_0=3·10^{-15} Дж/м^3 - умовне значення нульового рівня за щільністю енергії; $\varepsilon_{\text{Дж}}$ - щільність енергії Дж/м^3.

З урахування того, що всі рівні акустичних параметрів визначають відносно їх значення на порозі чутності, випливає, що рівні за тиском, інтенсивністю та щільністю звукової енергії практично дорівнюють один одному для ρc = 400 кг/с·м^2 та c = 333 м/с. Для таких умов можна стверджувати, що рівень звуку незалежний від параметра звукового поля. Але оскільки акустичний опір і швидкість звуку залежно від властивостей середовища і форми фронту хвилі можуть значно відрізнятись відповідно від значень 400 кг/с·м^2 й 333 м/с, то в зазвичай ці рівні неоднакові. Однак для практики їх можна вважати такими, що співпадають, тому в подальшому їх розрізняти не будемо.

Отже, акустичні рівні за всіма параметрами збігаються, тобто $L_I = L_p = L_\varepsilon$.

В табл. 1.3 зведено основні формули для розрахунку рівнів та прямих параметрів, що застосовують у звукотехніці.

Таблиця 1.3. Формули для розрахунку рівнів та прямих параметрів

Величина	Формула
Звуковий тиск, Па	Рівень, дБ - $L_p = 20\lg\frac{p_{\text{Па}}}{2\cdot10^{-5}} = 20\lg p_{\text{Па}} + 94$
Інтенсивність, Вт/м^2	Рівень, дБ - $L_I = 10\lg\frac{I_{\text{Вт}}}{10^{-12}} = 10\lg I_{\text{Вт}} + 120$
Рівень за інтенсивністю, дБ	Інтенсивність, Вт/м^2 - $I = 10^{-12}\cdot10^{0,1L_I}$
Рівень за звуковим тиском, дБ	Звуковий тиск, Па - $p = 2\cdot10^{-5}\cdot10^{0,05L_p}$
Напруга, В	Рівень, дБ - $N_U = 20\lg\frac{U_{\text{В}}}{0,775}$
Потужність, Вт	Рівень, дБ - $N_P = 10\lg\frac{P_{\text{Вт}}}{10^{-3}}$
Рівень за напругою, дБ	Напруга, В - $U = 0,775\cdot10^{0,05N_U}$
Рівень за потужністю, дБ	Потужність, Вт - $P = 0,001\cdot10^{0,1N_P}$

Контрольні запитання.

1. Які напрямки акустики найбільш пов’язані із звукотехнікою?
2. Дайте визначення звуку та звукового поля й зазначте, які характеристики визначають звукову хвилю.
3. Як змінюється швидкість звуку залежно від умов та середовища, в якому поширюється звукова хвиля?
4. Який частотний діапазон характеризує звукові сигнали, інфразвук та ультразвук?
5. Наведіть вираз, яким можна описати просте гармонійне коливання та коливання, що загасає.
6. Надайте визначення коефіцієнта загасання й добротності процесу загасання в музичній акустиці.
7. Наведіть рисунок форми коливання струни і надайте пояснення термінам фундаментальна частота, обертон, гармоніка.
8. Опишіть параметри подразнення та параметри відчуття та їх відповідність.
9. Зазначте лінійні й енергетичні параметри звукового сигналу та одиниці вимірювання цих параметрів.
10. Наведіть вираз співвідношення інтенсивності звуку та звукового тиску.
11. Які існують види звукових хвиль та джерела, що можуть їх створювати?
12. Як змінюється інтенсивність звуку за відстанню для сферичної, циліндричної та плоскої хвиль?

13. Як змінюється звуковий тиск за відстанню для сферичної, циліндричної та плоскої хвиль?
14. Надайте визначення інтерференції та дифракції звукових хвиль й наведіть приклади їх практичної реалізації.
15. Наведіть приклади та особливості таких фізичних явищ як відбиття, заломлення, загасання звукових хвиль.
16. Наведіть вирази розрахунку рівнів звукових сигналів за інтенсивністю та звуковим тиском.
17. Наведіть вирази розрахунку рівнів звукових сигналів за напругою та потужністю.
18. Зазначте в чому відмінності рівнів за електричними параметрами та акустичними й наведіть реальні чисельні значення рівнів звукового сигналу за різними параметрами.

2. ОСНОВИ ПСИХОАКУСТИКИ. ОСНОВНІ ВЛАСТИВОСТІ СЛУХУ

Ключові слова: адаптація слуху, бінауральний, больовий поріг, висота звуку, гучність, децибел, дисонанс, інтенсивність звуку, криві однакової гучності, консонанс, критична смужка слуху, локалізація, маскування, музичний інтервал, нелінійність слуху, орган слуху, психоакустика, складний звук, слухова система, сприйняття, стала часу слуху, октава, поріг розрізнення, поріг чутності, рівень гучності, суб'єктивно, тембр, фон, частотний аналізатор, широкосмуговий звук,.

Психоакустика – наука, що визначає кількісні та якісні залежності між зовнішніми стимулами (фізичними параметрами звуку) та відчуттями (психологічними параметрами), які вони викликають [4].

Основні завдання психоакустики – зрозуміти, як слухова система розшифровує звуковий образ, встановити основні відповідності між фізичними стимулами та слуховими відчуттями, та виявити, які саме параметри звукового сигналу є найбільш значущими для передавання семантичної (змістовної) та естетичної (емоційної) інформації.

Це важливо як для подальшого розвитку аудіотехніки, так і для музичного мистецтва в цілому (виконавчої творчості, вдосконалення музичних інструментів, розвитку комп'ютерного музичного синтезу тощо) і особливо для звукорежисерів, оскільки розуміння процесів формування суб'єктивного "слухового простору" є необхідною базою їхньої творчості.

Звуковий сигнал будь-якої природи може бути описаний певним набором фізичних характеристик: періодичність (частота), інтенсивність, тривалість, часова структура, спектр, розташування у просторі тощо. Разом з тим цей сигнал викликає відповідні відчуття, що можуть бути охарактеризовані суб'єктивними параметрами як: висота, гучність, тембр, маскування, локалізація, стереоефект тощо. Встановлення зв'язку і визначення кількісних співвідношень між ними і є однією із задач психоакустики

Слухові відчуття пов'язані з фізичними характеристиками неоднозначно і нелінійно, наприклад, гучність залежить від інтенсивності звуку, його частоти, від спектру тощо.

2.1. Будова вуха

Вся звукова інформація в звукотехніці, системах мовлення і зв'язку призначена для сприймання їх людиною. Тому для правильної експлуатації, а також створення будь-якої звукотехнічної апаратури необхідно знати властивості та можливості слухового органу людини, адже він є своєрідним натуральним приймачем звуку.

Вухо складено з трьох частин: зовнішнього, середнього і внутрішнього. Дві перші частини вуха є передавальним засобом для підведення звукових коливань до слухового аналізатора, що розташований у внутрішньому вусі – равлику (завитку) (рис. 2.1) [4].

Цей передавальний засіб є важелем, який перетворює повітряні коливання з

великою амплітудою швидкості коливань і невеликим тиском в механічні коливання з малою амплітудою швидкості і великим тиском. Коефіцієнт трансформації в середньому дорівнює 50 - 60. Крім того, передавальний пристрій вносить корекцію в частотну характеристику наступної ланки сприйняття - равлика.

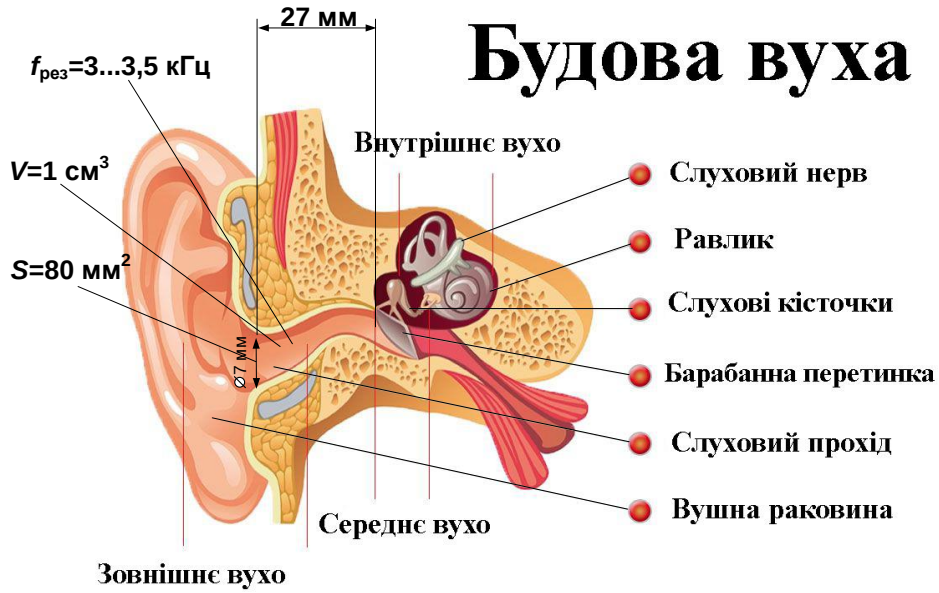


Рис. 2.1. Будова вуха людини

Равлик з’єднано з середнім вухом через дві мембрани, що закривають отвори овального і круглого вікон, які розташовано у основи равлика. До мембрани овального вікна прикріплено стременечко.

Внутрішній простір равлика заповнений рідиною - лімфою.

Звукові хвилі, що потрапили в вушну раковину, проходять через звивистий слуховий прохід і призводять до руху барабанну перетинку. Вона, в свою чергу пов'язана з системою мініатюрних кісточок: молоточком, коваделком та стременечком. Слухові кісточки утворюють важіль. Один кінець важеля збуджує в пеліфермі равлика звукові коливання. До равлика підходять нервові волокна, пов'язані зі слуховим нервом.

За всією довжиною равлика розташована основна мембрана, що складена з декількох тисяч волокон, натягнутих поперек равлика. Волокна слабо пов'язані одне з одним і тому можуть коливатися незалежно. Уздовж основної мембрани розташований орган Корті, який містить близько 22000 чутливих нервових закінчень у вигляді волоскових клітин (поперечних тонких ниток, які часто порівнюють зі струнами рояля або арфи). Клітини розташовані як уздовж основної мембрани на деякій відстані від неї, так і за глибиною органу Корті в кілька рядів. Кортів орган, в якому зосереджені нервові волокна, знаходиться в спіральному лабіринті равлика.

У напрямку від основи равлика до його вершини основна мембрана розширюється і нитки-струни стають довшими. У основи довжина ниток становить, приблизно, 100 мкм, а у вершини - 500 мкм. Тканини основної мембрани

утворені кількома типами клітин. Так, нервові волокна підходять до п'яти рядів волоскових клітин, розміщених у зовнішньому шарі.

Поздовжній розріз равлика наведено на рис. 2.2 у розгорнутому вигляді, при цьому опущені деякі деталі, яких не впливають суттєво на процес сприйняття звуку [5].

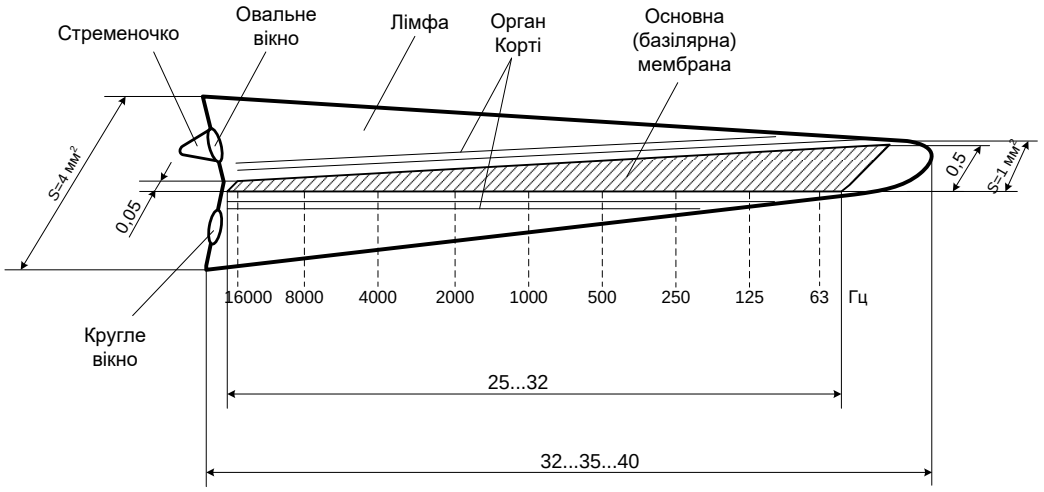


Рис. 2.2. Розгортка равлика

2.2. Сприйняття за частотою

У разі звукових коливань стременечко надає рух мембрані овального вікна. Під дією цих коливань мембрана круглого вікна коливається в такт з мембраною овального, оскільки лімфа практично не стискаєма. Лімфа коливається дотично до поверхні основної мембрани, поперек до її волокон. На коливання лімфи відгукуються (резонують) залежно від частоти коливань тільки цілком відповідні волокна. Близько вершини равлика розташовані найбільш довгі волокна, що резонують на низьких частотах, а у основи равлика (між овальним і круглим вікнами) розташовані найбільш короткі волокна, і вони резонують на високих частотах [5].

Складний звук, що утворено з декількох складових, які далеко віддалені за частотою один від одного, збуджує кілька груп волокон (відповідно до частот складових). Таким чином, основна мембрана служить частотним аналізатором.

Відповідно до теорії Флетчера резонансну частота кожного з волокон визначає не тільки параметри волокна як натягнутої струни, а й маса лімфи, співколивальної з волокном. Цю масу визначають відстанню волокна, що резонує, від овального вікна. Тому на низьких частотах в коливаннях бере участь велика маса лімфи, а на високих - менша.

Межі сприйманого слухом частотного діапазону досить широкі (20 Гц ... 20000 Гц). Вибірковість слухового аналізатора невелика, що випливає з рис. 2.3, на якому наведено кілька кривих вибірковості слуху для різних частотних діапазонів.

Смуги пропускання резонаторів слухового аналізатора обмежені і, на рівні 0,71 від максимального значення, дорівнюють на частотах 250, 1000 і 4000 Гц

близько 35, 50 і 200 Гц відповідно. Ці смуги пропускання називають критичними смугами слуху.

У внутрішньому вусі відбувається спектральний аналіз слухового сигналу, що надійшов; при цьому кожній частоті відповідає своє місце максимального зсуву базилярної мембрани, що аналогічно механізму оброблення сигналу лінійкою смугових («слухових») фільтрів, які отримали назву критичні смуги слуху (див. рис. 2.4, 2.5).

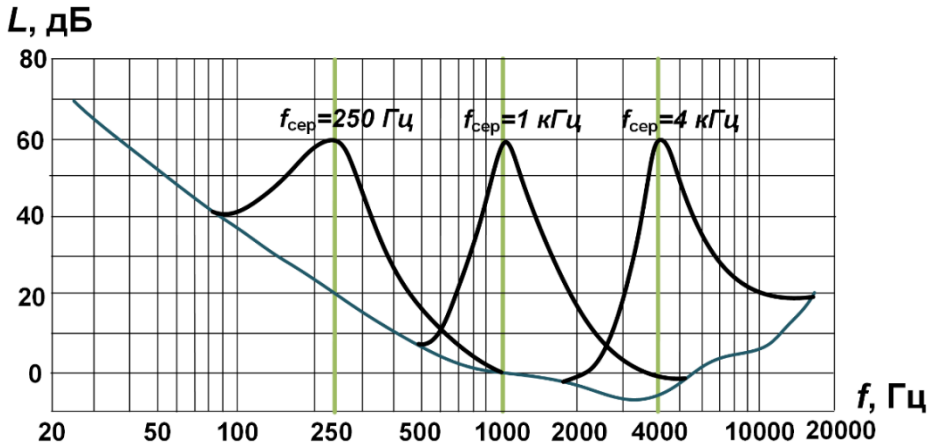


Рис. 2.3. Криві вибірковості слуху

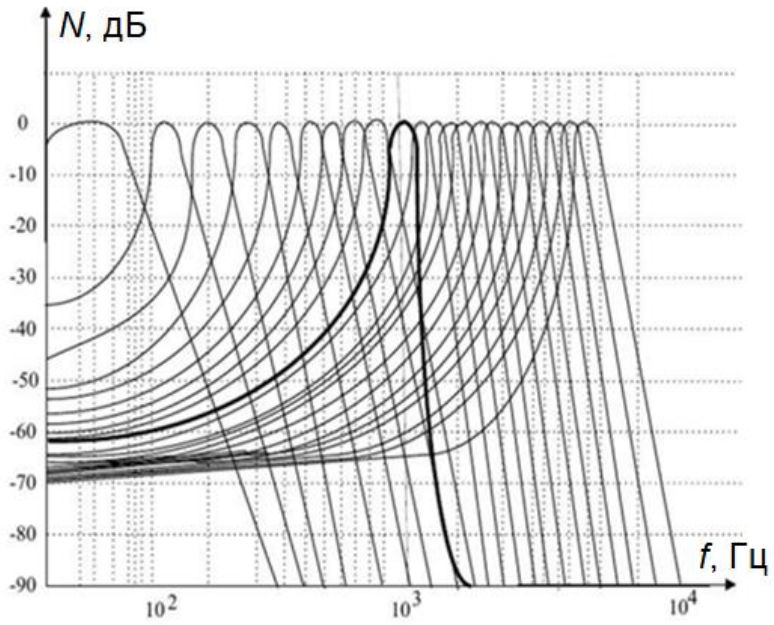


Рис.2.4. Смуги пропускання критичних смуг слуху

Ширина критичних смуг приблизно відповідає ширині смуги пропускання слухових фільтрів і змінюється залежно від частоти.

Якщо встановити критичні смуги в один ряд, то їх у чутному діапазоні вийде 25 (табл. 2.1), кожній з них відповідає відстань на базилярній мембрані приблизно 1,3 мм.

Внаслідок обмеженого числа нервових закінчень, розташованих уздовж

основної мембрани, людина запам'ятовує в усьому діапазоні частот не більше 250 градацій частоти, причому число цих градацій стрімко зменшується зі зменшенням інтенсивності звуку і у середньому становить близько 150, тобто сусідні градації у середньому відрізняються одна від одної за частотою не менше ніж на 4%, що у середньому приблизно дорівнює ширині критичних смуг слуху [5].

Таблиця 2.1. Критичні смуги слуху

Номер смуги	Критична смуга, Гц	Ширина критичної смуги, Гц	Центральна частота смуги, Гц
0	0(20)-100	100	50
1	100-200	100	150
2	200-300	100	250
3	300-400	100	350
4	400-510	110	455
5	510-630	120	570
6	630-770	140	700
7	770-920	150	845
8	920-1080	160	1000
9	1080-1270	190	1170
10	1270-1480	210	1370
11	1480-1720	240	1600
12	1720-2000	280	1850
13	2000-2320	320	2150
14	2320-2700	380	2500
15	2700-3150	450	2900
16	3150-3700	550	3400
17	3700-4400	700	4050
18	4400-5300	900	4850
19	5300-6400	1100	5850
20	5400-7700	1300	7050
21	7700-9500	1800	8600
22	9500-12000	2500	10750
23	12000-15500	3500	13750
24	15500-20500	4500	17750

(Тому кінофільми, відзняті зі швидкістю 24 кадри за секунду, можна демонструвати на

телебаченні зі швидкістю 25 кадрів за секунду і навпаки. При цьому музиканти з абсолютним слухом не помічають різниці в звучанні, оскільки розбіжність в частотах коливань не перевищує 4%. Для розбіжності на два кадри за секунду цю різницю вже можна визначити. У разі безпосереднього порівняння двох тонів слухач може виявити різницю у частотах тонів за їх биття до 0,5 Гц.)

Звуки, що мають широкосмугові суцільні спектри, наприклад, шуми, збуджують волокна всієї основної мембрани. Внаслідок слабкої вибірковості слуху відбувається інтегрування цього спектру у кожній з критичних смужок слуху, тобто слух як би перетворює суцільний спектр у дискретний, що складено з кінцевого числа складових відповідно числу критичних смуг слуху, що охоплюють частотний спектр цього шуму.

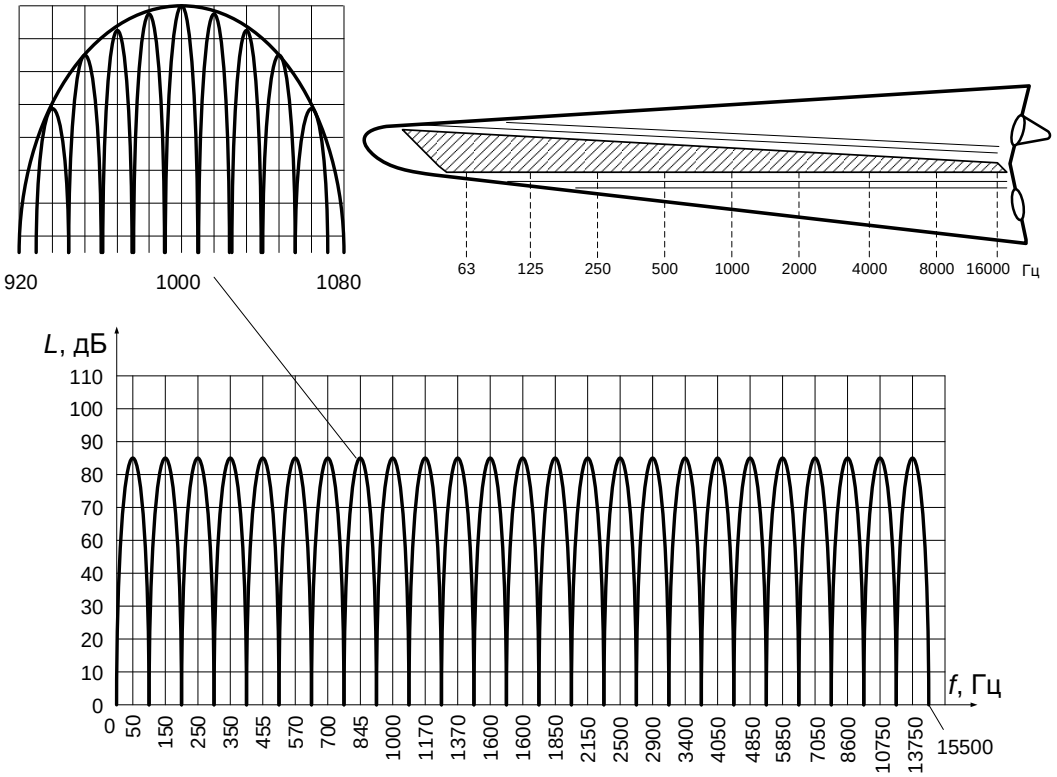


Рис. 2.5. Узагальнені смуги пропускання критичних смуг слуху

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 у основі сприйняття інтонаційного аспекту музики, тобто мелодії і гармонії.

Відповідно до міжнародного стандарту ANSI/ASA S1/1-2013 "Висота (Pitch) - це атрибут слухового відчуття в термінах, в яких звуки можна розташувати за шкалою від низьких до високих. Висота залежить головним чином від частоти звукового стимулу, але вона також залежить від звукового тиску і від форми хвилі".

Під поняттям висоти звуку розуміють суб'єктивну оцінку сприйняття звуку за частотним діапазоном. Оскільки ширина критичної смужки слуху на середніх і високих частотах приблизно пропорційна частоті, то суб'єктивний масштаб сприйняття за частотою наближений до логарифмічного закону. Тому за об'єктивну одиницю висоти звуку, яка наближено відображає суб'єктивне сприйняття,

прийнята октава: дворазове відношення частот (1; 2; 4; 8; 16 тощо). Октаву ділять на частини: напівоктави і третинооктави. Для останніх стандартизований такий ряд частот: 1; 1,25; 1,6; 2; 2,5; 3,15; 4; 5; 6,3; 8; 10, які є межами третинооктав. Якщо ці частоти розташувати на однаковій відстані за віссю частот, то вийде логарифмічний масштаб.

Виходячи з цього, для наближення до суб'єктивного масштабу всі частотні характеристики пристроїв передавання звуку наводять в логарифмічному масштабі. Для більш точної відповідності слухового сприйняття звуку за частотою для цих характеристик ухвалений спеціальний, суб'єктивний масштаб - майже лінійний до частоти 1000 Гц і логарифмічний вище цієї частоти.

Октавно людина сприймає 10 октав. В табл. 2.2 наведені октавні смуги та центральні частоти октавних смуг звукового частотного діапазону.

Таблиця 2.2. Октавні смуги та центральні частоти октавних смуг звукового частотного діапазону

Октавна смуга, Гц	20-40	40-80	80-160	160-320	320-640	640-1280	1280-2560	2560-5120	5120-10240	10240-20480
Центральна частота, Гц	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000

Центральні частоти третинооктавних смуг звукового частотного діапазону такі: 20; 25; 31,5;40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 320; 400; 500; 630; 800; 1000; 1250; 1600; 2000; 2500; 3200; 4000; 5000; 6300; 8000; 10000; 12500; 16000; 20000 Гц.

Перш за все, необхідно відзначити, що слухова система здатна розрізняти висоту звуку лише у періодичних сигналів. Якщо це просте гармонічне коливання, наприклад, синусоїдний сигнал від генератора, то період коливань T визначає частоту $f = 1/T$, тому визначальним параметром для розрізнення висоти є частота сигналу.

Якщо це складний звук, то висоту слухова система може визначити за його основним тоном, але тільки якщо він має періодичну структуру, тобто спектр його складено з гармонік (обертонів, частоти яких знаходяться в цілочисельних відношеннях). Якщо ця умова не виконується, то висоту тону визначити слухова система не може. Наприклад, звуки таких інструментів як тарілки, гонги тощо не мають певної висоти. У загальному випадку висота складного звуку не піддається точному розрахунку.

Для оцінки висоти тону звуку використовують одиницю вимірювання - мел (або барк = 100 мел), а також цент, октава [10]. Один мел дорівнює відчутній висоті звуку частотою 1000 Гц для рівня 40 дБ. Зв'язок між мелом та частотою нелінійний – у разі збільшення частоти, наприклад, в три рази (від 1 кГц до 3 кГц), висоту підвищено тільки у два рази (від 1000 до 2000 мел) (рис. 2.6). Нелінійність зв'язку особливо виражена на низьких і високих частотах. В певних межах зміна висоти тону у мелах пропорційна логарифму:

$$m = 2595\lg(1+\frac{f}{700}) = 1127\ln(1+\frac{f}{700}),$$

$$f = 700\cdot(10^{\frac{m}{2595}}-1).$$

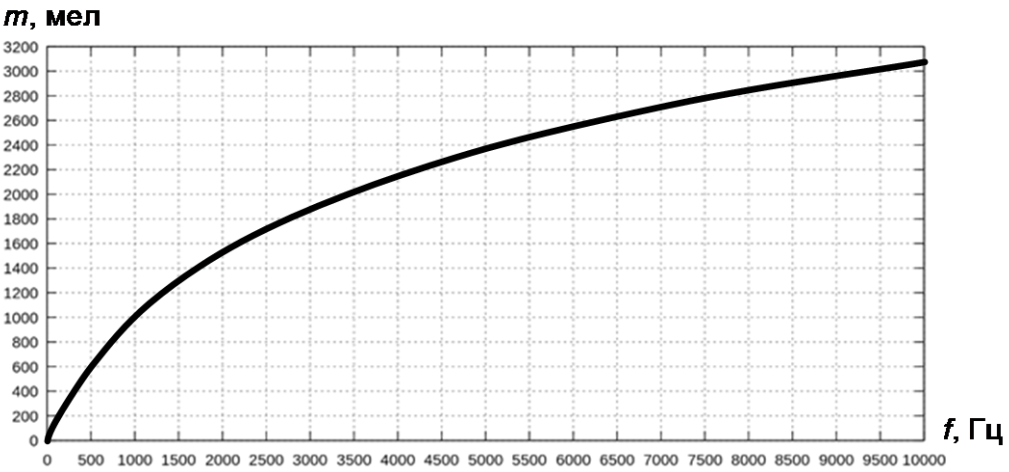


Рис. 2.6. Графік залежності висоти звуку у мелах від частоти коливань

Численні сучасні дослідження присвячено порогам розрізнення за висотою двох різних тонів, що відрізняються за частотою. Результати сучасних досліджень показують, що слухова система може розрізняти за висотою два звуки, що відрізняються за частотою всього на 0,2%. Така висока роздільна здатність слуху є підставою визначення того, що 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) [5].

Для музичних інструментів з рівномірно темперованою шкалою використовують близько 100 градацій висоти тону.

Відчуття висоти чистого тону (однієї частоти) пов'язано не тільки з частотою, але й з інтенсивністю звуку і його тривалістю. Як показали різні дослідження, в разі підвищення інтенсивності звуку гучні низькі звуки сприймаються ще нижче, а високі звуки з підвищенням гучності сприймаються трохи вище (різниця може бути в межах десятка цент), для середніх частот 1-2 кГц вплив інтенсивності не помічено. Слід зазначити, ця залежність незначна, а для складних музичних звуків майже непомітна. Це важливо для музики, тому що інакше в разі переходу від піанісимо (pp) до фортисимо (ff) звуковисотні відношення (мелодія і гармонія) були б порушені.

Відчуття висоти тону залежить і від його тривалості: короткі звуки сприймаються як сухе клацання, але при подовженні звуку клацання починає давати відчуття висоти тону. 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, для звуків мови він може становити 20-30 мс.

У музиці прості синусоїдні тони практично не використовують, кожен музичний тон має складну структуру і його складено з основного тону і гармонік.

Однак можна встановити відповідність за висотою музичного тону, наприклад ноти ля першої октави і чистого синусоїдного сигналу з частотою 440 Гц. Висоти цих двох звуків будуть однаковими, але тембри - різними. Це свідчить про те, що для складних періодичних сигналів висоту корельовано за частотою основного тону - саме він має частоту 440 Гц.

2.3. Сприйняття за амплітудою. Поріг чутності та больовий поріг

Якщо волокно основної мембрани в разі власних коливань не торкається до найближчої волоскової клітини (див. II рис. 2.7, на якому збільшено представлені волокна основної мембрани і клітини органу Корті), то людина не відчуває звук. В разі збільшення амплітуди коливань волокна, як тільки воно торкнеться найближчої клітини (див. III рис. 2.7), відбудеться подразнення нервового закінчення, яке відразу ж почне посилати електричні імпульси у слуховий центр мозку; звук буде почутий [5].

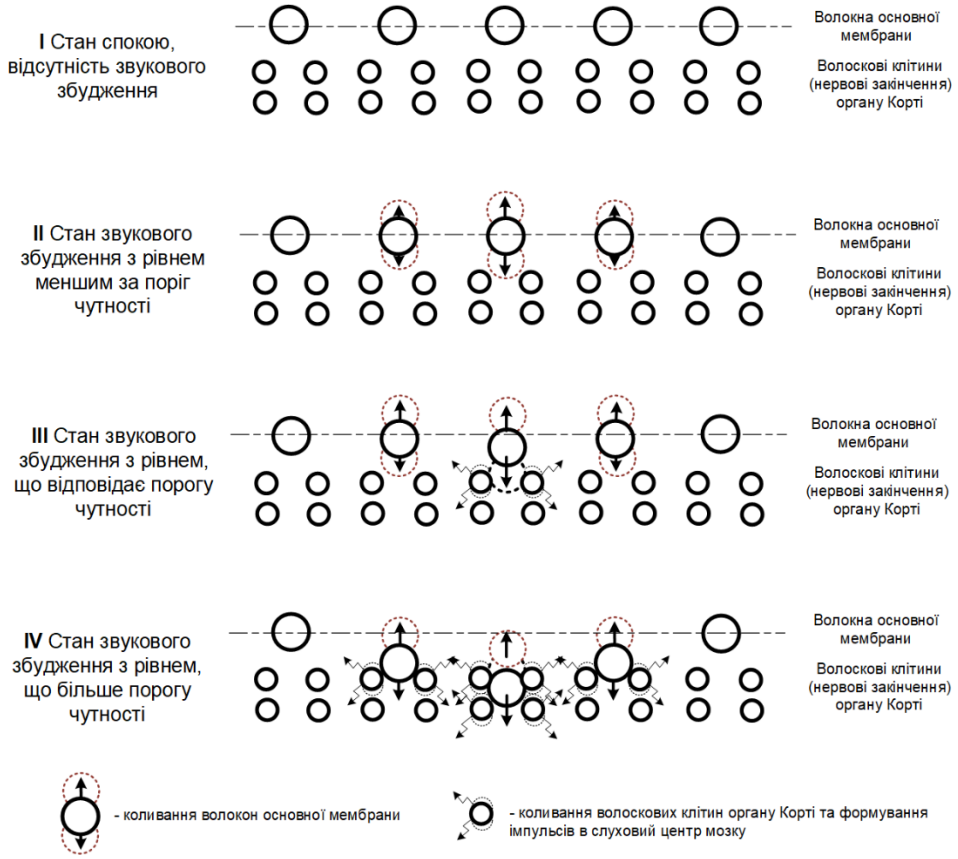


Рис. 2.7. Процес збудження нервових закінчень у разі коливань волокон:
I, II - немає збудження (стан спокою або інтенсивність звуку нижче порога чутності);
III - збудження на порозі чутності; IV - наступні ступені збудження

Мінімальне значення амплітуди коливань волокон основної мембрани, за якого відбувається нервове подразнення і, тим самим, відчуття звуку або найменше значення подразливої сили чистого тону, яке викликає відчуття звуку, називають порогом чутності. Відчуття звуку відбувається при стрибкоподібному переході з чутного стану в нечутне і навпаки. Зауважимо, що абсолютне значення слухового відчуття на порозі чутності невелика, але має кінцеве значення.

Під подразливою силою мають на увазі інтенсивність звуку або звуковий тиск. Поріг чутності залежить від частоти: для 1000 Гц він дорівнює близько 10^{-12} Вт/м^2 за інтенсивністю звуку або $2 \cdot 10^{-5}$ Па за звуковим тиском.

На рис. 2.8 наведено приблизну залежність порогу чутності від частоти,

причому за віссю ординат відкладено інтенсивність звуку в логарифмічному масштабі. В сторону низьких частот поріг чутності стрімко підвищується (починаючи з частоти 500 Гц), тобто для появи слухового відчуття на низьких частотах необхідна більш висока інтенсивність, ніж, скажімо, на частоті 1000 Гц. Так, на частоті 100 Гц поріг чутності за інтенсивністю в 10^4 разів вище, ніж на частоті 1000 Гц. В сторону високих частот поріг чутності спочатку знижується (чутливість слуху підвищується) в 8…10 разів за інтенсивністю (на частоті 2000...4000 Гц), а потім починає підвищуватися так само, як і на низьких частотах.

У ряді навчальних посібників і довідників наведено різні абсолютні значення і частотні залежності порога чутності [2,5,6,9]. Ця різниця зумовлена різними методами вимірювання порога чутності. Вимірювання можуть здійснюватися як для одно-, так і для двовухового слухання, за тиском близько вушної раковини (для слухання на телефоні) і за тиском в точці звукового поля (до введення туди голови людини, тобто для слухання через гучномовець); існують пороги, виміряні для фронтального падіння звукової хвилі (для прийому звуку спереду) і при всебічному її падінні (при прослуховуванні в приміщенні) тощо.

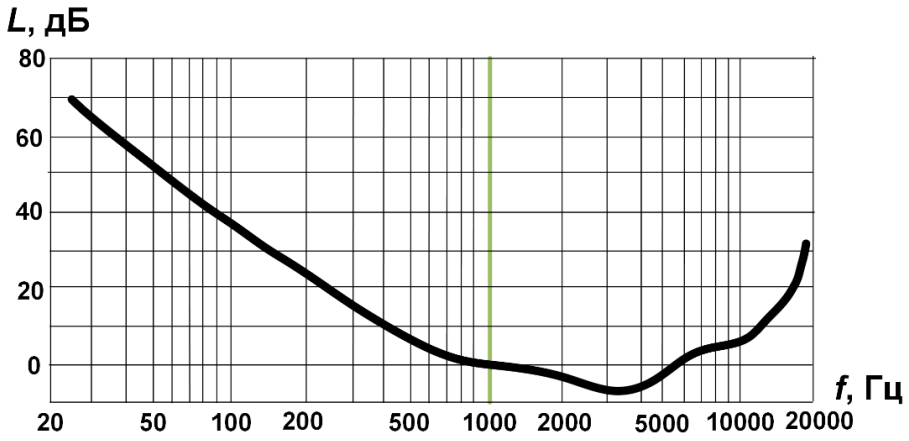


Рис. 2.8. Поріг чутності слухового сприйняття звуку

В разі збільшення інтенсивності звуку вище порогового значення, поки амплітуда коливань волокон не збільшиться настільки, щоб торкнутися ще однієї клітини, слухове відчуття залишається постійним. Як тільки одне з волокон доторкнеться до наступної клітини (див. IV рис. 2.7), слухове відчуття ще раз підвищиться стрибком, так як і ця клітина буде посилати електричні імпульси в слуховий центр.

У міру збільшення інтенсивності звуку розширюється зона збудження основної мембрани - починають коливатися і сусідні волокна, які також збуджують нервові клітини одну за одною. Кожна з них буде посилати свої імпульси в слуховий центр. Слухове відчуття при цьому буде зростати стрибками у міру збільшення числа збуджених клітин. Такі стрибки називають порогом розрізнення інтенсивності. Число цих стрибків на середніх частотах не перевищує 250, причому на низьких і високих частотах це число різко зменшується і в середньому у частотному діапазоні становить близько 150.

Нарешті, в разі подальшого збільшення інтенсивності з'являється відчуття болю - настає больовий поріг (поріг дотику). Больовий поріг відповідає дуже великій інтенсивності. Найбільшу величину больового порогу спостерігають на

частоті 800 Гц (близько 1 Вт/м^2). До низьких і високих частот він повільно знижується.

Таким чином, і за амплітудою має місце дискретне сприйняття звуку.

На рис. 2.9 наведено межі сприйняття людиною звукових сигналів та зони в частотній і рівневій області, що займають мовні та музичні звуки [5].

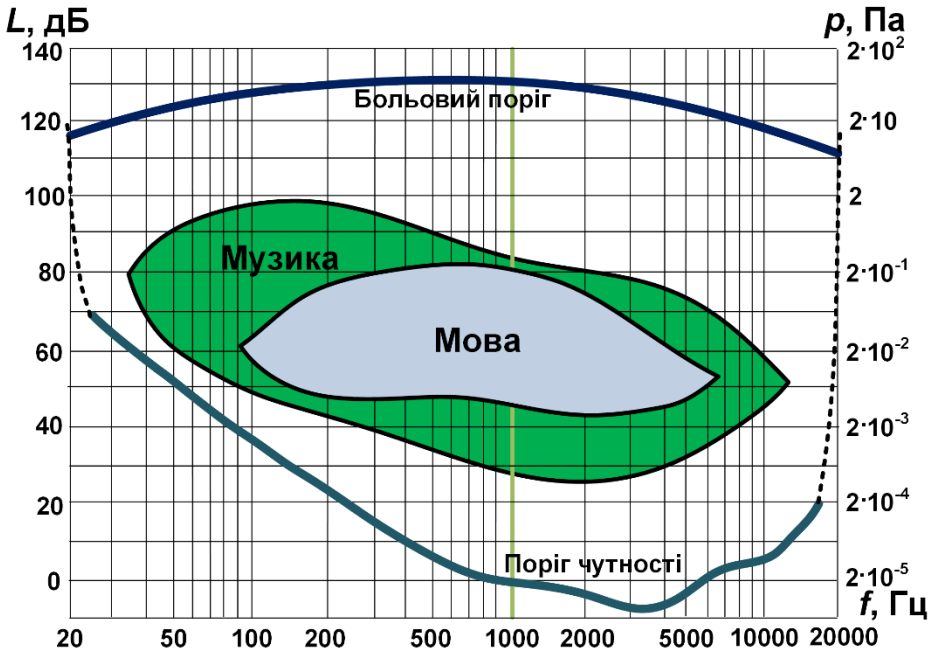


Рис. 2.9. Межі сприйняття людиною звукових сигналів

З огляду на дискретність за частотою і амплітудою, налічують у всій області слухового сприйняття близько 22000 елементарних градацій, що відповідає числу нервових закінчень.

Дуже важлива і точність орієнтування слуху у великій кількості звуків різної гучності. Людина розрізняє за останніми дослідженнями 374 ступені рівнів різної гучності. Однак це, мабуть, небагато в порівнянні з діапазоном 130 дБ. Практика показує, що значні зміни рівнів гучності не викликають великих змін в слуховому відчутті. Пояснюється це законом Вебера-Фехнера, який визначає, що відчуття пропорційно логарифму подразнення.

Встановлено, що для середніх і високих інтенсивностей звуку стрибок у зміні гучності відбувається за однакових відносних змінах інтенсивності. Вебер і Фехнер так сформулювали цей закон: однакові відносні зміни подразнювальної сили викликають однакові абсолютні зміни слухового відчуття, тобто слухове відчуття пропорційно логарифму подразнювальної сили

$$E = a \lg I + C.$$

На порозі чутності, тобто для $I = I_{\text{п.ч}}$, слухове відчуття дорівнює нулю, тому маємо

$$0 = a \lg I_{\text{п.ч}} + C \quad \text{або} \quad C = -a \lg I_{\text{п.ч}},$$

звідки отримуємо

$$E = a \lg \frac{I}{I_{\text{п.ч.}}} = a \lg \frac{I}{I_0}.$$

Для оцінювання значення слухового відчуття запропоновано одиницю під назвою «бел» (a=1). Ця одиниця відповідає десятикратному відношенню інтенсивності, тому була введена ще і десята частка цієї одиниці - децибел (дБ), що дорівнює 0,1 Б. В цьому випадку слухове відчуття у децибелах

$$E = 10 \lg \frac{I}{I_{\text{п.ч.}}} = 10 \lg \frac{I}{I_0}.$$

Оскільки діапазон зміни інтенсивності від мінімального порога чутності I_0=10^{-12} Вт/м^2 до максимального больового порогу $I_{\text{макс}}$=10 Вт/м^2 може становити 10^{13} раз, тобто слухове відчуття змінюється на 130 дБ, то величина елементарного стрибка відчуття у середньому за діапазоном амплітуд дорівнює 0,8 дБ, що відповідає зміні інтенсивності звуку в 1,2 рази. В дійсності елементарні стрибки відчуття для середніх і високих значень слухових відчуттів виходять в разі зміни інтенсивності в 1,10 рази, стрибки відчуття дорівнюють 0,4 дБ. Для низького слухового відчуття стрибки дорівнюють 2…3 дБ.

Внаслідок логарифмічного закону сприйняття і широкого діапазону інтенсивності чутних звуків для об'єктивної оцінки введені поняття рівень за інтенсивністю

$$L_I = 10 \lg(I / I_0);$$

рівень за звуковим тиском

$$L_p = 20 \lg(p / p_0);$$

рівень за щільністю звукової енергії

$$L_\varepsilon = 10 \lg(\varepsilon / \varepsilon_0).$$

За нульовий рівень домовилися приймати інтенсивність I_0, близьку до граничної інтенсивності для нормального слуху на частоті 1000 Гц - I_0=10^{-12} Вт/м^2, $p_0 \approx 2 \cdot 10^{-5}$ Па - звуковий тиск на нульовому рівні, $\varepsilon_0 \approx 3 \cdot 10^{-15}$ Дж/м^3 - щільність енергії, що відповідає нульовому рівню.

2.4. Гучність і рівень гучності звуку

Рівень інтенсивності характеризує звук лише з фізичної сторони. З попереднього випливає, що звуки різних частот за однакового рівня інтенсивності можуть виявитися і чутними і нечутними. Для оцінки суб'єктивного сприйняття звуку за рівнем введено ряд характеристик. Однією з таких характеристик є рівень слухового відчуття (або просто рівень відчуття), який визначає закон Вебера-Фехнера. Рівень відчуття [9]

$$E = 10 \lg \frac{I}{I_{\text{п.ч}}} = 10 \lg \frac{I}{I_0} - 10 \lg \frac{I_{\text{п.ч}}}{I} = L - L_{\text{п.ч}} \ ,$$

де $L_{\text{п.ч}}$ - рівень інтенсивності звуку на порозі чутності (порозі слуху).

Таким чином, рівень відчуття являє собою рівень інтенсивності звуку, що

знаходиться над рівнем порогу чутності на тій же частоті. Він враховує залежність порога чутності від частоти і, тим самим, більш точно характеризує суб'єктивне сприйняття звуку на різних частотах, ніж рівень інтенсивності.

За рівнів набагато вищих рівня порога чутності цей рівень все ж неточно характеризує сприйняття звуку. Тому були введені поняття гучності і рівня гучності, які допомагають отримати більш точну оцінку суб'єктивного сприйняття звуку.

Гучністю називають суб'єктивне відчуття, що характеризує в слуховий системі можливість розташовувати звуки за певною шкалою - від звуків низької інтенсивності (тихих) до звуків великої інтенсивності (гучних).

Гучність залежить від інтенсивності звуку, від частоти, спектрального складу, тривалості тощо.

Людина може досить точно встановити рівність гучностей двох звуків будь-якого частотного складу. Цю властивість слуху використовували для введення поняття рівня гучності.

За еталон рівня гучності приймають рівень інтенсивності чистого тону з частотою 1000 Гц. Одиницю рівня гучності називають фоном.

Отже, рівень гучності в фонах на частоті 1000 Гц дорівнює рівню його інтенсивності в децибелах. За рівень гучності (в фонах) будь-якого іншого звуку L_G приймають рівень інтенсивності у децибелах L_I рівногучного з ним тону з частотою 1000 Гц, тобто вважають

$$I_{G_x[\text{фон}]} = I_{I[1000\ \text{Гц,дБ}]} \text{ при } G_x = G_{[1000\ \text{Гц}]} ,$$

де G - гучність звуку.

Щоб визначити рівень гучності будь-якого звуку, досить взяти тон з частотою 1000 Гц і змінювати його рівень до тих пір, поки його гучність не буде однаковою з гучністю звуку іншої частоти, який визначають. Рівень інтенсивності еталонного тону при цьому чисельно дорівнюватиме рівню гучності звуку, що визначають.

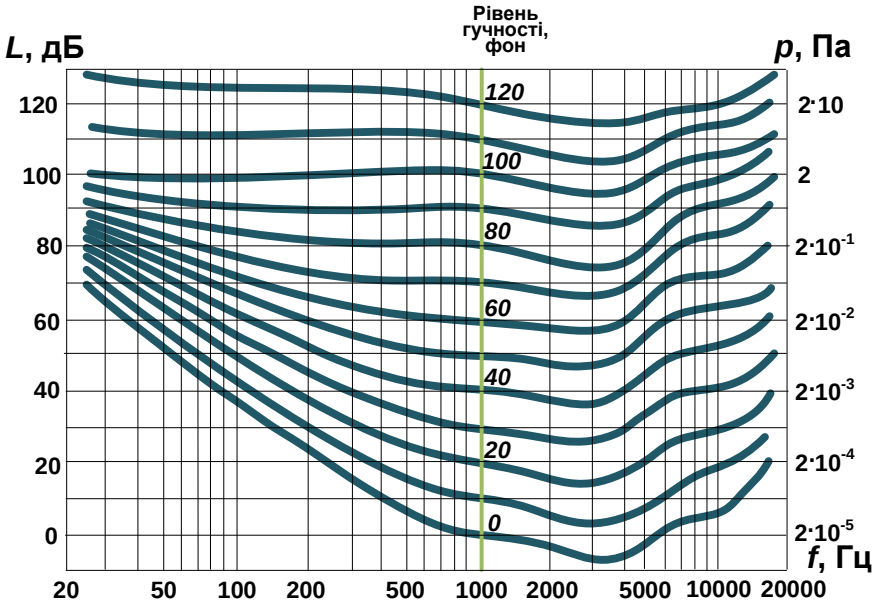
Відповідність рівня гучності в фонах і рівня сигналу в децибелах визначають криві однакової гучності.

На рис. 2.10 наведено криві однакової гучності, отримані в разі порівняння тонів різних частот з еталонним. Їх визначено для всього діапазону слухового сприйняття за частотою та рівнем.

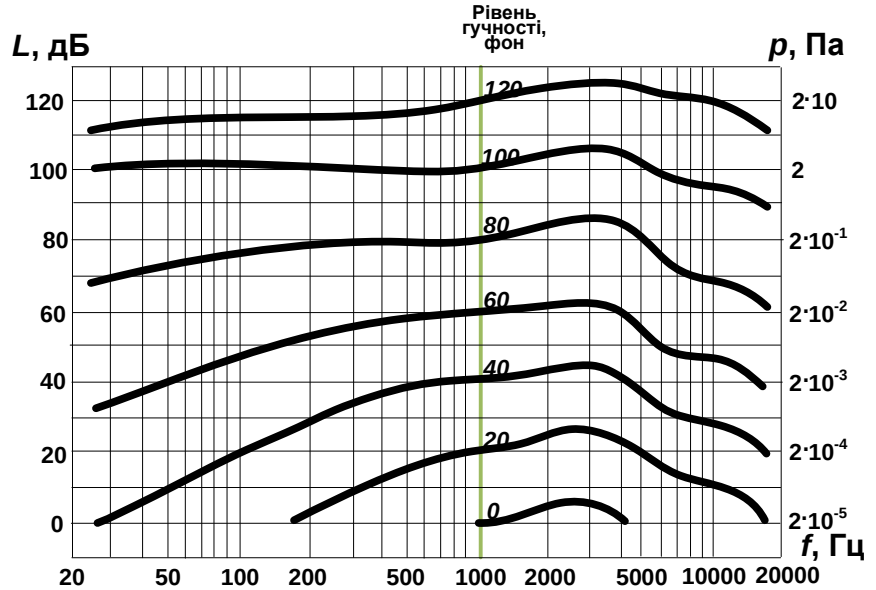
Криві однакової гучності характеризують рівень сприйняття звукового сигналу на різних частотах і за різною гучністю. Кожна крива відображає розподіл рівнів звукового поля у межах смуги звукових частот, що забезпечують рівень гучності, який дорівнює рівню еталонного тону 1000 Гц. Тобто кожна крива показує, як зі зміною частоти повинен змінюватися рівень звукового поля, що б рівень гучності гармонічних сигналів не змінювався. У підвищення рівня гучності криві однакової гучності спрямляються, тобто рівень гучності і звукове поле наближаються на всіх частотах [4].

Як бачимо, у міру підвищення рівня гучності криві однакової гучності спрямляються. Наприклад, для нульового рівня гучності (на порозі чутності) рівень інтенсивності тону з частотою 100 Гц дорівнює 38 дБ (див. рис. 2.10), а тону з

частотою 500 Гц - 7 дБ.



а



б

Рис. 2.10. Криві однакової гучності (*а*) та криві слухового сприйняття (*б*),
Де цифри над кривими означають рівень гучності в фонах

Для отримання рівня гучності у 80 фон (див. рис. 2.10,*а*, крива 80), рівень інтенсивності тих же тонів (100 і 500 Гц) повинен бути взятий, відповідно, 83 і 80 дБ, тобто обидва тони будуть практично однаково гучні, якщо вони будуть мати однакові рівні інтенсивності. Таким чином, на високих рівнях гучності слух має частотну характеристику чутливості, близьку до рівномірної, тому фізична і суб'єктивна характеристики будуть близькі одна до одної. Ця обставина є підґрунтям для формулювання таких практичних рекомендацій:

1. Припустимо, що прослуховування звукових програм здійснюють на рівні 80 фон, при цьому всі частотні складові передавання за їх однакової інтенсивності звучать майже однаково гучно. Тепер зменшимо підсилення на 30 дБ, тим самим

рівень інтенсивності звучання знизиться на 30 дБ. Внаслідок цього частотні складові, що знаходяться близько частоти 1000 Гц, матимуть рівень гучності 50 фон, а складові, що знаходяться близько частоти 100 Гц, знизяться за рівнем гучності до значення, яке дорівнює 22 фон; вони будуть звучати менш гучно, ніж середні частоти.

2. Щоб звучання за гучністю низьких частот залишилося таким же, як і звучання середніх, необхідно скорегувати частотну характеристику підсилювача шляхом підйому його чутливості на низьких частотах (на 17…20 дБ на частоті 100 Гц). У якісних підсилювачів у разі зменшення коефіцієнта підсилення автоматично коригується величина підсилення на низьких частотах (відбувається збільшення коефіцієнта підсилення) - тонкомпенсація.

В разі вимірювання високих рівнів гучності шумів чутливість вимірювачів (шумомірів) повинна майже не залежати від частоти, що відповідає суб'єктивним сприйняттям звуку за гучністю. В разі вимірювання низьких рівнів гучності показання шумоміра будуть близькими до суб'єктивних за умови, що при цьому буде враховано ту обставину, що слух слабкіше сприймає низькі частоти, ніж середні на низьких рівнях гучності. Тому в шумомірах при вимірюванні низьких рівнів гучності вводять корекцію зі зниженням коефіцієнта підсилення на низьких частотах. Так, якщо вимірюють рівні гучності близько 30 фон, то на частоті 100 Гц в порівнянні з частотою 1000 Гц повинно бути зниження на 58 - 30 = 28 дБ (див. рис. 2.10, *а*, крива 80). Внаслідок цього в шумомірах зазвичай є три корекції низьких частот: А, В, С для рівнів гучності 40, 70 і вище 85 фон відповідно. При цьому виміряні рівні гучності більш точно відповідають суб'єктивній оцінці гучності.

Рівні гучності характеризують суб'єктивне сприйняття звуку, але їх масштаб не відповідає масштабу суб'єктивного відчуття гучності. Так, збільшення рівня гучності на 10 фон для широкого діапазону рівнів відповідає суб'єктивному збільшенню гучності вдвічі (людина досить точно може визначити подвоєння гучності. Цю властивість слуху було використано для визначення залежності гучності від її рівня). Для середніх і високих рівнів L_G гучність G може бути наближено визначено з формули (для $L_G > 40$ фон)

$$G = 2^{0.1(L_G - 40)}.$$

Для кількісної оцінки абсолютної гучності була прийнята спеціальна одиниця сон. При цьому гучність у сонах визначають за умови, що 1 сон відповідає гучності звуку з рівнем гучності 40 фон на частоті 1000 Гц синусоїдного звуку.

Між абсолютним значенням гучності в сонах S і значенням рівня гучності в фонах L (аналогічно співвідношенню між значенням звукового тиску в паскалях і його рівнем в децибелах) існує наступний зв'язок

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

Для ілюстрації в табл. 2.3 наведено рівні гучності у фонах і гучності в сонах для ряду типових звучань [11].

Для слуху також характерні криві однакової дратівливості, які монотонно спадають з частотою. Тобто чим вище частота звуку, тим менший звуковий рівень потрібно для створення однакової за силою подразнювальної дії на людину.

Людина не чує інфразвукові частоти слуховим органом, але сприймає їх усім тілом, що певним чином впливає на здоров'я, особливо на психіку людини. Інфразвук проникає в усі тканини тіла. Небезпечними для черевної порожнини є частоти 4...8 Гц. Для мозку частоти менше 15 Гц надають такий же вплив, як і алкоголь. Інфразвукові частоти у межах 6...9 Гц підвищують нижню межу тиску людини, змінюється ритм серцевих скорочень і дихання, послаблюється функція зору і слуху, підвищується стомлюваність і інші порушення.

Таблиця 2.3. Рівні гучності у фонах і гучності у сонах для ряду типових звучань

Джерело (місце) шуму або звуку	Гучність, сон	Рівень гучності, фон
Кабіна літака	600-800	125-130
Фортисимо оркестру	50-100	90-100
Поїзд метро	30-45	85-90
Зал при масових сценах	22-45	80-90
Оратор на відстані 1 м	10-22	70-80
Форсована мова	30	85
Гучні збори	7-10	65-70
Звичайна розмова на відстані 1 м	3-5	55-60
Шепіт на відстані 1 метра	1	40
Театральний зал	1-2	40-50
Піанісимо оркестру	0,6-1	35- 40
Бібліотека	0,2-0,4	25-30
Гучний автомобільний гудок на відстані 8 м	100	100
Легковий автомобіль на відстані 5 метрів	5	60
Тиха кімната	0,4	30
Коридор тихий	2	50
Апаратна звукорежисера		95

2.5. Ефект маскування

Відомо, що у тиші можна відмінно чути писк комара і дзижчання мухи, цокання годинника тощо, а у шумі і в разі завад можна не почути навіть гучний дзвінок, тобто у шумі та завадах поріг чутності для слабкого звуку збільшується [9]. Це підвищення порога чутності називають маскуванням. Величину маскування визначають за формулою

$$M = L_{\text{п.ч.ш.}} - L_{\text{п.ч.т.}},$$

де $L_{\text{п.ч.ш}}$ і $L_{\text{п.ч.т}}$ - рівні порогів чутності у шумах і у тиші.

В разі збільшення порога чутності відповідно змінюється і рівень відчуття E. Для інтенсивності I в умовах сприйняття в шумах для рівня відчуття звуку маємо

$$E_{\text{ш}} = 10\lg\frac{I}{I_{\text{п.ч.ш}}} = L - L_{\text{п.ч.т}} - M = E_{\text{т}} - M,$$

де $I_{\text{п.ч.ш}}$ - інтенсивність на порозі чутності за наявності завад і шумів; $E_{\text{т}}$ - рівень відчуття того ж звуку у тиші.

Таким чином, в разі зміни рівня завад навіть на незмінному рівні інтенсивності звуку рівень відчуття змінюється.

Це явище пояснюють тим, що під час дії завади, що має частотні складові в тій же області, що і звук, який сприймається, а за рівнем інтенсивності значно перевищує рівень прийнятого звуку, нервові закінчення вже збуджені і посилають імпульси у слуховий центр, які відповідні заваді. Внаслідок дискретності сприйняття слабкий звук, що сприймається, нічого не може додати до цього сприйняття, і тому його не чутно. Якби заваду прибрати, то він зміг би збудити нервові закінчення відповідно своєму рівню і частотним складовим.

Неясне відчуття звукового сигналу, що сприймається, виходить тоді, коли інтенсивність слабкого звуку, додаючи до інтенсивності завади в цій же критичній смужці слуху, створює сумарну інтенсивність, достатню для стрибка на наступну градацію рівня (тобто в разі збільшення інтенсивності в середньому на 20 %). Чітке ж відчуття звукового сигналу, що сприймається, буде тільки тоді, коли рівень звукового сигналу, що сприймається, перевищуватиме рівень складових завади, що знаходяться в тій же критичній смужці слуху, що і звук, який надходить.

Низькочастотні тони сильніше маскують високочастотні. Пояснюють це тим, що волокна равлика, що резонують на низьких частотах, розташовано подалі від овального вікна (див. рис. 2.2), тому лімфа, що коливається в каналах равлика в тій чи іншій мірі, збуджує всі волокна, що розташовано ближче них до овального вікна, тобто високочастотні волокна. На високих частотах волокна, що резонують, знаходяться близько від овального вікна і коливання лімфи замикаються, не доходячи до більш віддалених низькочастотних волокон.

Якщо завада широкосмугова, то навіть на значному перевищенні загального її рівня над рівнем тону, що сприймається, останній може бути почутий, оскільки рівень завад, що знаходяться в межах критичної смужки (в якій знаходиться і тон,

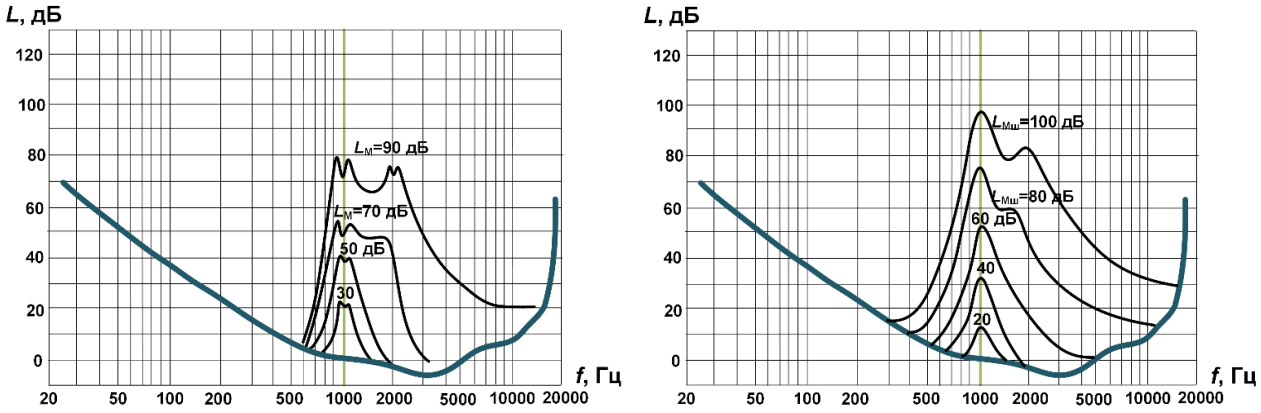
що сприймається), може бути досить малим. Для рівномірної завади в діапазоні частот (100…5000) Гц це перевищення досягає 15 дБ.

Для низьких рівнів частотний діапазон маскування малий, для високих - він простягається на широку область частот, що лежать вище частоти маскуючого тону. При цьому можна відзначити підвищення маскування на частотах, кратних частоті маскуючого тону (див. рис. 2.11,*а*, на частотах 2000 Гц). Зниження маскування (провали) в разі невеликої різниці частот маскуючого і замаскованого тонів (див. рис. 2.11,*а*, на частотах 1000 Гц і 2000 Гц) пояснюють потраплянням їх в одну і ту ж критичну смугу слуху (з'являються чутні биття частот) [9].

Шумове маскування має плавний спад до високих частот і стрімкий до низьких (рис. 2.11,*б*).

На рис. 2.11,*а* і *б* наведено криві маскування, що ілюструють це пояснення.

Крім маскування, шуми і завади в разі їх значного рівня та тривалого впливу викликають незворотні явища в слуховому органі: найбільш чутливі клітини органу Корті зношуються, і поріг чутності підвищується (людина глохне). Це спостерігають у клепальників, друкарок і людей інших професій, пов'язаних з перебуванням в шумах. З тієї ж причини міські жителі мають пороги чутності вище, ніж сільські. Поріг чутності підвищується і у дітей, яких регулярно «заколисує» гучна радіопередача. Зазначимо, що у молоді за останні роки стрімко зросли пороги чутності. Причиною цього стало захоплення поп-музикою, якій притаманні високі рівні гучності звучання.



а б

Рис. 2.11. Криві порога чутності у разі маскування тоном 1000 Гц для різних рівнів інтенсивності маскуючого тону – $L_М$ (*а*) та смужкою шуму близько 1000 Гц для різних рівнів гучності маскуючого шуму $L_{Мш}$ (*б*)

2.6. Гучність складних звуків

Два тони або вузькосмугових шуми з невеликим рівнем гучності, віддалені за частотою не менше ніж на дві октави, не маскують один одного (рис. 2.12,*а*). У цьому випадку сумарна гучність буде дорівнювати сумі гучностей обох звуків.

Якщо їх гучності однакові, то сумарна гучність подвоїться, що відповідає збільшенню рівня гучності на 10 фон.

З іншого боку, якщо обидва звуки потрапляють в одну критичну смужку

слуху, то додаються їх інтенсивності (рис. 2.12,*б*). Якщо обидва звуки мають високий рівень інтенсивності, або їх частоти знаходяться в діапазоні 600...4000 Гц, рівень сумарної інтенсивності (за умови однакового рівня) збільшиться на 3 дБ, на стільки ж збільшиться і рівень гучності (у фонах). Це два крайніх випадки підсумовування гучностей.

Якщо обидва звуки (тони або вузькосмугові шуми) рознесені один від одного за частотою на інтервал менше двох октав або низькочастотний звук має більший рівень, то виникає маскування одного звуку іншим, внаслідок чого сумарна гучність буде менше суми гучностей обох звуків (рис. 2.12,*в*). І чим ближче звуки за частотою, то сильніше це зменшення. Обчислити гучність дискретних спектрів дуже складно.

Сприйняття за гучністю широкосмугових звуків, до яких відносять і музику, і мову, досить складно визначити.

Широкосмугові сигнали відчуваються гучнішими, ніж вузькосмугові з таким же рівнем звукового тиску.

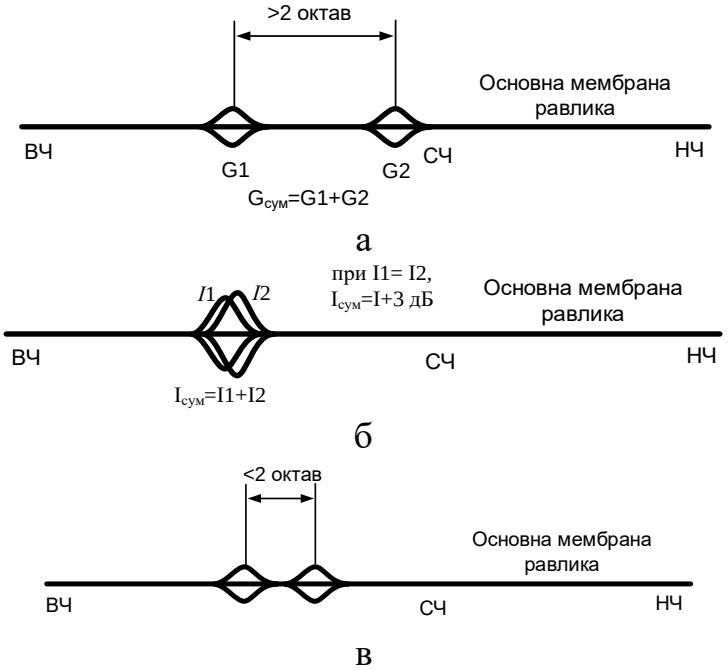


Рис. 2.12. Відображення процесу збудження основної мембрани слухового органу людини під дією тональних звуків рознесених за частотою більше двох октав (*а*), розташованих у одній критичній смузі (*б*) та рознесених на відстань менше двох октав (*в*)

Слухова система виконує інтегрування площі під кривою збудження на базилярній мембрані з урахуванням розподілу нервової активності.

Таким чином, усередині кожної критичної частоти відбувається інтегрування енергії незалежно від виду звукового сигналу. Відрізок шуму або тональні сигнали, якщо вони розташовані всередині критичної смуги і мають однаковий рівень інтенсивності (звукового тиску), створюють однаковий рівень гучності.

Тому коли звуковий сигнал має складний спектральний склад або одночасно звучать кілька сигналів, визначення їх сумарної гучності відбувається трьома різними способами залежно від співвідношення їх частот [10]:

- сигнали близькі за частотою (тобто перебувають всередині критичної смуги), для визначення створюваної ними сумарної гучності необхідно додати їх інтенсивності $I = I_1 + I_2 + I_3$ ... і для сумарного значення рівня звукового тиску, що відповідає цій сумарній інтенсивності, визначити з кривих однакової гучності рівень гучності (в фонах), а потім перерахувати в значення гучності в сонах.

При збільшенні загального рівня звукового тиску сигналів з близькими частотами на 10 дБ гучність, що сприймається, подвоюється;

- сигнали мають різницю частот ширше критичної смуги (їх взаємним маскуванням можна знехтувати), тоді діє правило: сумарна гучність дорівнює сумі гучностей кожної із складових;

- частоти різних сигналів рознесені за частотою один від одного досить далеко, тоді визначення сумарної гучності значно ускладняється: слухач зазвичай фокусує свою увагу на якомусь одному компоненті - або найгучнішому, або одному з найвищих - призначаючи загальну гучність сумарного сигналу, що приблизно дорівнює цьому компоненту.

Таким чином, гучність складного звуку, що сприймається, залежить не тільки від його рівня інтенсивності (рівня звукового тиску), але і від його спектрального складу, що дуже важливо враховувати для створення музичних композицій: наприклад, звучання інструменту можна зробити гучнішим у разі збереження того ж рівня звукового тиску зміною його спектру (при цьому, правда, відбудеться і зміна тембру, так що все потрібно робити у розумних межах).

В музичній практиці прийняті такі градації гучності [10]:

fff - форте фортисимо 100 фон (88 сон)

ff - фортисимо 90 фон (38 сон)

f - форте 80 фон (17.1 сон)

p - піано 50 фон (2.2 сон)

pp - піанісимо - 40 фон (0.98 сон)

ppp - піано піанісимо 30 фон (0.36 сон)

2.7. Часові характеристики слухового сприйняття

За даними теорії Флетчера і Гельмгольца слух не реагує на фазу коливань синусоїдної звукової хвилі, реєструючи тільки її амплітуду і частоту [5]. У разі складних коливань, що складено з декількох частотних складових, слух безпосередньо не реагує на фазові зсуви між ними, сприймаючи тільки амплітуди і частоти коливань кожної зі складових, якщо вони не потрапляють в одну і ту ж критичну смужку слуху. Це пояснюють тим, що кожна з частотних складових звуку сприймається своєю ділянкою основної мембрани, а для сприйняття фази у неї немає апарату. Зсув за фазою може бути помічений, коли він перетворюється у запізнювання в часі. Малі фазові зсуви у ряді ситуацій можуть виявлятися слухом через його нелінійності.

Як будь-яка механічна і електрична система, слуховий апарат інерційний: в разі зникнення звуку слухове відчуття зникає не відразу, а поступово зменшуючись до нуля.

Час, протягом якого відчуття за рівнем гучності зменшується на 8…10 фон,

називають сталою часу слуху (рис. 2.13,*а*). Ця стала залежить від ряду обставин, а також від параметрів сприйманого звуку. В середньому вона дорівнює 150…200 мс.

Експериментально встановлено, що якщо до слухача приходять два коротких звукових імпульси, однакові за складом і рівнем, але один з них запізнюється, то вони будуть сприйняті без паузи, коли запізнення не перевищує 50 мс (рис. 2.13,*б*). Проте, для затримки більше 30 мс буде прослуховуватися деяка якісна зміна звучання. Час у 50 мс вважають часом розрізнення двох однакових сигналів, що надходять один за одним.

Ця злитість звучання виникає тому, що відчуття від першого імпульсу за 50 мс після його закінчення зменшується приблизно на 3 дБ, навіть якби він припинився миттєво. Насправді це зменшення буде ще меншим, і саме тому такі звуки сприймають без паузи [5].

В разі великих інтервалів запізнювання відчуття від першого імпульсу вже стає малим і не маскує другий, тому обидва імпульси сприймаються окремо. Це явище називають луною. Якщо встати перед стіною на відстані більше 9 м і поплескати в долоні, то почуємо відлуння в повторенні ударів, оскільки різниця ходу прямого і відбитого звуків буде більше 18 м. На меншій відстані цього не спостерігають, оскільки відстань, що дорівнює 17 м, відповідає запізнюванню у 50 мс.

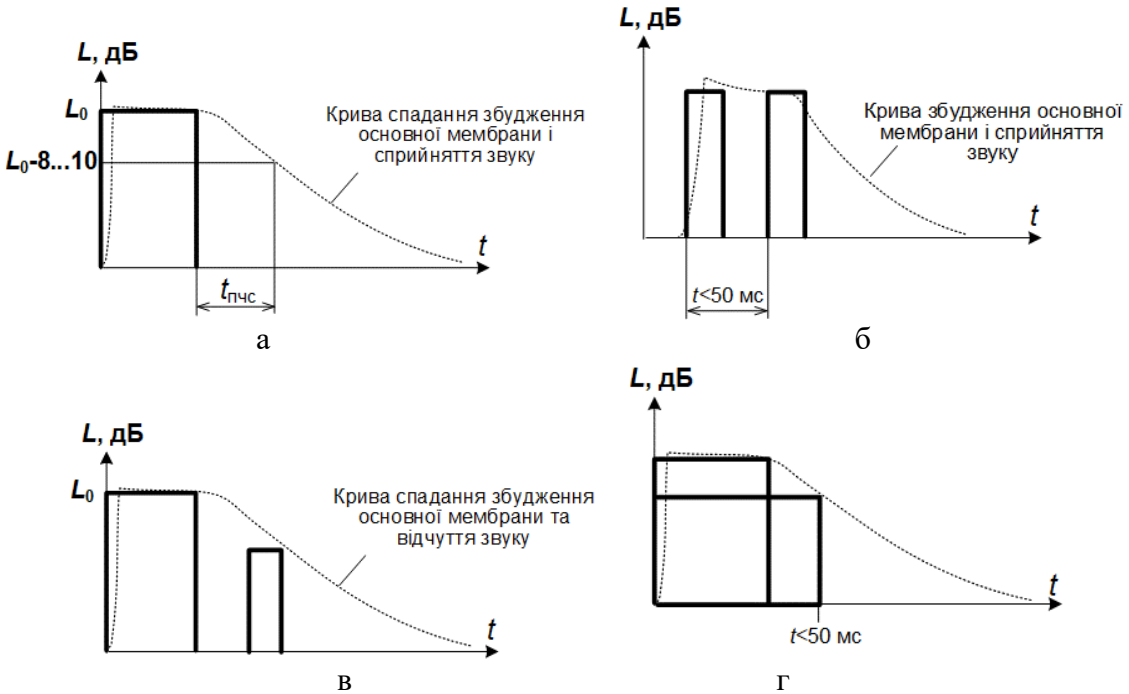


Рис. 2.13. Часові параметри слухового сприйняття при визначенні сталої часу слуху (*а*), у разі сприйняття послідовних імпульсів на інтервалі часу 50 мс для однакових імпульсів (*б*), різних за гучністю (*в*), з урахуванням інтегрувальної здатності слуху (*г*)

Якщо рівень запізнілого звуку набагато менше рівня першого, то він не буде прийнятий окремо навіть в разі запізнення понад 50 мс, оскільки залишкове відчуття від першого звуку може маскувати звук, що запізнюється.

До однієї з часових характеристик слуху відносять явище післямаскування: слабкі звуки, що йдуть відразу після гучних, виявляються повністю або частково

замаскованими внаслідок післядії попереднього звуку (рис. 2.13,*в*).

Слід ще згадати інтегрувальну здатність слуху у разі сприйняття короткого імпульсу. В межах 50 мс інтегрується інтенсивність імпульсу, через це більш тривалий імпульс (в межах до 50 мс), але з меншою амплітудою сприймають так само голосно, як і короткий імпульс з більшою амплітудою, якщо добуток інтенсивності імпульсів на їх тривалість буде однаковим (рис. 2.13,*г*).

До часових параметрів слуху відносять і час встановлення тональності звуку, точніше, його висоти. За деякими даними необхідно два-три періоди коливання, щоб слух міг визначити висоту звуку, тобто приблизно частоту коливань. На низьких частотах цей час становить близько 30 мс, на високих - трохи менше.

Оскільки слухове відчуття зникає не відразу, то в разі порівняння двох тонів, що надходять відразу один за одним і мають невелику різницю у частоті, прослуховується биття цих тонів, що допомагає виявити дуже малі різниці частот і повільні зміни частоти у невеликих межах.

Відчуття гучності залежить від тривалості сигналу: якщо на слуховий канал надходять два сигнали однакової інтенсивності, то більш короткий сигнал сприймається як менш гучний. В разі збільшення тривалості сигналу відчуття гучності поступово зростає поки його тривалість не досягне величини 200 мс.

Слухова система має властивість адаптації, тобто під впливом тривалих гучних, постійних за величиною звуків гучність звуку, що сприймається, поступово зменшується (слух адаптується) [10].

Під час дії звуку з рівнем 94 дБ протягом двох хвилин рівень гучності поступово зменшується на значення у 9 фон, до кінця періоду падіння сповільнюється; якщо при цьому рівень сигналу стрімко збільшити, наприклад з 94 дБ до 100 дБ, то рівень гучності збільшується (проте менше, ніж це мало б відповідати значенням рівня сигналу в 100 дБ) і починає знову знижуватися навіть з більшою швидкістю, тобто ступінь адаптації тим більше, чим гучніший звуковий сигнал. Зміна рівня гучності проявляється і на раптовому зменшенні рівня діючого сигналу.

Таким чином, слухова система намагається захиститися від гучних звуків: в разі їх тривалого впливу відбувається поступове зниження гучності, звуки здаються більш тихими. Ступінь адаптації залежить від гучності діючого сигналу - чим він гучніше, тим більше зниження відчутного рівня гучності. Однак процес має тенденцію до насичення.

Відчуття гучності не зникає відразу після припинення звуку, а триває певний час. Період, протягом якого рівень гучності, що відчувається зменшується на 9…10 фон, називають часовою сталою слуху, і становить зазвичай 35 мс.

Відчуття гучності тонального сигналу складним нелінійним чином залежить від інтенсивності діючого сигналу, його частоти і тривалості.

2.8. Нелінійні властивості слуху

Експериментально встановлено, що під час дії звуку з однією частотною складовою (чистий тон) і рівнем інтенсивності 100 дБ людина чує другу гармоніку з рівнем інтенсивності 88 дБ, третю - з рівнем 74 дБ тощо.

Наявність цих гармонік в слуховому відчутті легко простежити із застосуванням «шукаючого» тону: до вуха додатково підводять інший тон - «шукаючий», частоту якого плавно змінюють у діапазоні частоти досліджуваного тону і вище. На кожній кратній йому частоті прослуховується биття, як ніби у звуці, що надходить, були ці складові [10].

Ці гармонічні складові називають суб'єктивними (рис. 2.14). Саме тому спостерігають маскування звуку на частотах, кратних частоті маскуючого тону.

В разі впливу на слух двох чистих тонів з частотами, що не потрапляють в одну і ту ж критичну смужку слуху, людина часто чує тон різницевої частоти з досить високим рівнем гучності і тон сумарною частоти і інших комбінаційних частот з меншими рівнями.

Експерименти довели, що якщо рівень кожного з чистих тонів складає 60 дБ, то рівень гучності різницевого тону не перевищує 40 фон. На рівнях інтенсивності складових 80 дБ, рівень гучності різницевого тону досягає 80 фон.

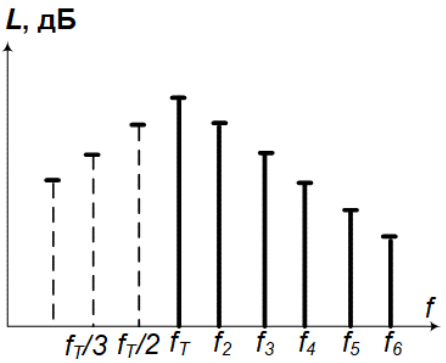


Рис. 2.14. Суб’єктивні гармоніки сприйняття чистого тону

Під час дії на слух складних звуків, що мають складові з кратними частотами, виникає відчуття такого ж звуку за частотним складом, але тільки з трохи зміненим співвідношенням амплітуд складових, оскільки комбінаційні частоти співпадають за частотою з вихідними частотами звуку.

Під час дії складного звуку, що складено з тонів з некратними частотами, виникає відчуття сильних спотворень: прослуховується багато різницевих і інших комбінаційних тонів.

Доцільно зауважити, що в разі обмеження частотного діапазону нижче 1000 Гц на високій гучності передавання людина все ж таки чує низькі частоти внаслідок нелінійності слуху. Тому в разі обмеженого передавання низьких частот слухачі прагнуть прослуховувати передачі на високих рівнях гучності, так як при цьому створюється враження більш гучного звучання низьких частот. І хоча при цьому спотворюється звучання на високих частотах, це не дуже помітно в разі передаванні сучасної поп-музики. Причини нелінійності слуху можна, мабуть, пояснити нелінійністю характеристик середнього вуха і, що більш істотно, вихровими

явищами у равлику.

Через нелінійності слуху у деяких ситуаціях виявляється зсув фаз. Якщо зсуви фаз між складовими такі, що амплітуди гармонік арифметично додають і створюють пилкоподібну форму кривої звукової хвилі, то через нелінійність слуху з'являться більш значні амплітуди суб'єктивних гармонік, ніж в разі зсуву фаз тих же складових, що дають , наприклад, прямокутну форму хвилі. Тому буде виявлена різниця в їх звучанні.

2.9. Бінауральний ефект. Локалізація звуку

Одне з основних властивостей вуха - можливість визначення напрямку надходження звуку в горизонтальній і вертикальній площинах і оцінки відстані до джерела звуку. Найбільш точно людина визначає напрямок в горизонтальній площині.

Досягають цього завдяки бінауральному ефекту, або, іншими словами, слухання обома вухами [5].

Бінауральним ефектом називають ефект двовухового слухання. За аналогією із зоровим відчуттям для двох очей його називають стереоакустичним ефектом. Локалізація звуку полягає в тому, що внаслідок двовухового слухання людина може визначити напрямок приходу звукових хвиль з великою точністю; людина «відчуває» поперечні розміри джерела звуку, а також глибину його, тобто створюється акустична перспектива.

Справа в тому, що звуки від одного і того ж джерела до правого і лівого вуха приходять зазвичай неоднаковими. Вони можуть відрізнятися за інтенсивністю, за часом приходу і фазою коливань. Ці відмінності призводять до виникнення в центральній нервовій системі психофізіологічного судження про напрямок звуку.

Слухова локалізація джерела звуку залежить від відстані між вухами. У звичайних умовах людина визначає напрямок приходу звукових хвиль в горизонтальній площині з точністю 3…4°, у вертикальній – 15…20°. Якщо до вух приставити розтруби з великою відстанню між їх отворами, то точність визначення напрямку приходу звукових хвиль може бути значно підвищена (такими звукоуловлювачами користувались до війни для визначення місцезнаходження літака). Ця відстань впливає як на різницю у часі приходу звукових хвиль до вух, так і на відношення між амплітудами цих хвиль біля вушних раковин.

Слід зазначити, що точність локалізації напрямку в горизонтальній площині залежить і від частоти коливань джерела звуку. Наприклад, для звуку з частотою нижче 300 Гц визначити напрямок приходу звуку важко. У цьому випадку довжина звукових хвиль велика, і вони, вільно огинаючи голову, створюють майже однаковий звуковий тиск біля правого і лівого вуха. Зсув за фазою дуже малий. Саме тому головну роль у процесі локалізації відіграють частоти від 1000 Гц до 3200 Гц.

Як зазначалось, людина одним вухом злито сприймає два звуки, якщо їх час приходу відрізняється менше, ніж на 50 мс. Але якщо звук надходить в одне вухо зі зсувом у часі відносно другого вуха, то слух сприймає ці звуки окремо, оскільки електричні імпульси, які збуджено звуковими коливаннями, надходять в слуховий

центр незалежними шляхами. Саме тому сумарна гучність таких звуків дуже залежить від зсуву за часом. Цим пояснюють локалізацію звуку на низьких частотах. На високих частотах пояснюють різницею рівнів звуків, що надходять в кожне з вух, у результаті того, що розміри голови на цих частотах стають сумірними з розмірами довжин звукових хвиль.

Якщо людина слухає одну і ту ж передачу від двох джерел звуку, які знаходяться на різних відстанях від слухача, то за однакових рівнях гучності на місці найближчого джерела відчувають удаване (віртуальне) джерело звуку (УДЗ). Можна створити відчуття роздільного звучання обох джерел, якщо рівень найближчого зробити менше, ніж рівень віддаленого. Це і визначає відчуття глибини джерела звуку. Все це покладено в основу стереофонії.

Зауважимо, що людина слабо розрізняє переміщення джерела звуку у вертикальній площині, що проходить перпендикулярно до лінії вух. Це пояснюють тим, що в цьому випадку звукові хвилі надходять в обидва вуха з однаковими фазою і амплітудою.

Локалізація на частотах нижче 150 Гц неможлива, на частотах 150…3000 Гц слабка.

Бінауральний ефект на ВЧ слабко виявлений, адже довжина хвилі сигналу у цьому випадку менше діаметра голови й з’являється акустична тінь, завдяки якій рівень сигналу знижується.

Локалізація з фронтальної сторони - 3°, під кутом 90° ліворуч і праворуч відносно голови складає 12°, з тильної сторони слухача, близько 6°.

Відчуття глибини джерела звуку на відстані 3…15 м явно помітно. В разі збільшення відстані у два рази рівень зменшується на 6 дБ.

2.10. Слуховий аналіз консонансів і дисонансів

Здатність слухової системи до спектрального аналізу та визначення частотних інтервалів між гармоніками, яка є базою для визначення висоти, лежить в основі відчуття «консонансності» або «дисонансності» звучання різних музичних інтервалів і акордів [10].

Консонанс (від французького слова consonance) означає згоду (узгоджене звучання), дисонанс - неузгодженість, безладне звучання.

З музично-психологічної ознаки, консонанс відчувають як м'яке звучання, що видається відчуттям спокою, опори, а дисонанс як дратівливе, неспокійне, що є носієм напруженості і руху. Чергування консонансів і дисонансів створює гармонійне дихання музики.

За часів Піфагора до консонансів відносили тільки октаву, квінту і кварту, трохи пізніше і терцію. Зараз вже і малу секунду вважають консонансом.

Щодо психоакустичної особливості, то консонанс й дисонанс відображають сприйняття частотних співвідношень між гармонійними складовими складних музичних звуків, що залежить від внутрішніх властивостей слухового апарату.

Кожна нота, відтворена будь-яким музичним інструментом, містить основний тон і обертони (серед яких гармоніки, частота яких кратна основного тону на ціле число). Якщо на слух сприймають чітке відчуття висоти тону, то у цьому звуковому

сигналі аналізують тільки гармоніки.

Відношення гармонік називають інтервальним коефіцієнтом - 2:1 - октава, 3:2 - квінта, 4:3 - кварта, 5:4 - мажорна терція тощо.

Для більшості інструментів верхню межу гармонік визначено частотою 16 кГц внаслідок механічної природи звучного тіла.

На висоту тону впливають перші 7-8 гармонік, ще 8-9 дають тембральне забарвлення. Тобто найбільш значуще число гармонік – це 15-16.

Ефект биття для сигналів з різницею в частотах менше 15 Гц сприймають як вкрай неприємне звучання.

Відчуття дисонансу або консонансу співзвучностей також пов'язано з наявністю критичних смуг, тобто, з кінцевою роздільною здатністю слухової системи.

Максимальна приємність звучання відповідає значенню консонансу, що дорівнює 1, дисонансу - відповідно 0 і навпаки. Якщо різниця частот дорівнює нулю, тобто, два тони звучать в унісон, то це «досконалий» консонанс. Якщо різниця частот більше, ніж критична смуга, то це співзвуччя також звучить як консонанс. Для частот, різниця між якими становить від 5% до 50% ширини критичної смуги, співзвуччя сприймається як дисонанс.

Максимальний дисонанс прослуховують, якщо різниця становить одну чверть від ширини критичної смуги (ширина ця залежить від частоти). Тому два тони можуть звучати як консонансний інтервал в одній октаві і як значно менш консонансний (або навіть дисонансний) в інший. Ці результати корисно мати на увазі для складання різних електронних музичних композицій та комп'ютерної оброблення параметрів звуку.

Методика оцінки ступеня консонансу (дисонансу) інтервалу заснована на порівнянні різниці частот двох сусідніх гармонік з шириною критичної смуги, відповідний середній частоті між ними:

- якщо дві гармоніки мають однакові частоти (або відмінність між ними менше 5% від ширини критичної смуги), то їх позначають як «досконалий консонанс» - C;
- якщо різниця між двома гармоніками за частотою більше ширини критичної смуги (стовпець 3 і 5), то це теж консонанс – c;
- якщо різниця між частотами найближчих гармонік менше ширини критичної смуги, то це дисонанс - d;
- якщо ця різниця менше половини ширини критичної смуги, то це «досконалий дисонанс» - D.

Якщо частотна різниця між більшістю гармонік двох тонів більше ширини критичної смуги (або її половини), то таке співзвуччя буде сприйматися як консонанс, тому, наприклад, квінту відносять до консонансного інтервалу.

Відповідно до практики, що підтверджується вищенаведеною методикою, інтервали між високими гармоніками, що дедалі зменшуються (7:8, 8:9 тощо) звучать більш дисонансно, ніж інтервали між першими гармоніками (1:2, 2:3, 3:4 і ін.). Вирішальну роль в слуховому відчутті ступеня консонансності (дисонансності) інтервалу відіграють розгорнуті перші 6-7 гармонік, як і для визначення висоти тону.

Таким чином, здатність слухової системи сприймати певні поєднання звуків

як милозвучні (консонансні) або дратівливі (дисонансні) пов'язана з кінцевою роздільною здатністю слухової системи і є її фундаментальною властивістю.

Для квінти A_3-E_4 (співвідношення частот 3:2) окремі гармоніки звучать консонансно, окремі дисонансно (див. табл. 2.4)

Таблиця 2.4. Ступені консонансності й дисонансності для двох нот з інтервалом у квінту A_3-E_4

Перші сім гармонік нижнього тону A_3	Перші сім гармонік верхнього тону E_4	Різниця між частотами двох сусідніх гармонік	Середня частота між гармоні-ками	Ширина критичної смуги для середньої частоти між гармоніками	Половина ширини критичної смуги	Ступінь консо-нансності й дисо-нансності
220						
440	330	110	385	65	32,5	c
660	660	0	унісон			C
880						
1100	990	110	1045	133	66,5	d
1320	1320	0	унісон			C
1540	1650	110	1595	193,5	96,7	d

Контрольні запитання.

1. Які проблеми досліджує психоакустика?
2. Поясніть будову органу слуху людини та назвіть основні елементи, що визначають механізм сприйняття звукового сигналу.
3. Опишіть будову равлика органу слуху людини та принцип формування сигналів відчуття звуку за рівнем і частотою.
4. Опишіть сприйняття звукових сигналів людиною за частотою.
5. Надайте визначення тембру звукового сигналу.
6. Що таке критичні смужки слуху, яка їх кількість та особливість за шириною?
7. Що таке висота звуку, октава і яку кількість октав сприймає людина?
8. Наведіть значення октавних смуг звукового частотного діапазону та зазначте центральні частоти цих смуг.
9. Яка кількість градацій сприйняття звуків за частотою притаманна людському слуху?
10. Опишіть сприйняття звукових сигналів людиною за амплітудою.
11. Зазначте значення звукового тиску та інтенсивності звуку, що визначають поріг чутності. Який рівень акустичного сигналу відповідає порогу чутності.
12. Зазначте значення звукового тиску та інтенсивності звуку, що визначають больовий поріг. Який рівень акустичного сигналу відповідає больовому порогу?
13. Наведіть криву порогу чутності слухового сприйняття за частотою та зазначте особливості.
14. Наведіть рисунок та значення за рівнем і частотами музичних та мовних звукових сигналів.
15. Поясніть необхідність застосування одиниці вимірювання слухового відчуття бел та децибел.
16. Яка кількість градацій сприйняття звуків за амплітудою притаманна людському слуху?
17. Зазначте розрізнювальну здатність слуху за основними параметрами сприйняття.
18. Які значення звукового тиску та інтенсивності звуку характеризують больовий поріг слуху?
19. Надайте визначення гучності та рівня гучності слухового сприйняття.
20. Наведіть криві однакової гучності та поясніть їх зміст.
21. Яка одиниця вимірювання гучності та як вона пов’язана з рівнем звукового сигналу?

22. Що таке маскування та як воно виявляється при слуховому сприйнятті?
23. Як відбувається сприйняття за гучністю складних звуків?
24. Які особливості слухового сприйняття за часовими характеристиками?
25. Для яких затримок звукових сигналів, що надходять один за одним вони не сприймаються як різні, для яких затримок виявляється відлуння, для яких – повторення?
26. Що таке стала часу слуху та яке її значення?
27. Що таке інерційність слуху, інтегрувальна здатність слуху та ефект післямаскування?
28. В чому виявляються нелінійні властивості слуху?
29. Що таке бінауральний ефект та як він пов’язаний з локалізацією звуку?
30. Дайте визначення консонансних і дисонансних звуків та приклади їх наявності.

3. АКУСТИЧНІ СИГНАЛИ

Ключові слова: акустичний сигнал, амплітудна модуляція, амплітудна характеристика, амплітудно-частотна характеристика, аналіз Фур'є, вібрато, вторинний, динамічний діапазон, , кореляція, кореляційний аналіз, модуляція, об'єм інформації, октава, первинний, пік-фактор, рівнеграма, середній рівень, сигналограма, спектральний аналіз, спектр, спектральна щільність, спотворення, статистичний аналіз, тембр, тремоло, частотна модуляція, частотний діапазон.

Розрізняють первинні і вторинні акустичні сигнали [9].

До первинних належать: сигнали, створювані натуральними музичними інструментами, співом, мовою; шумові сигнали, створювані для супроводу різноманітних музичних і мовних художніх передач (шум поїзда, шум дощу тощо).

До вторинних акустичних сигналів відносять сигнали, відтворювані електроакустичними пристроями, тобто первинні сигнали, що пройшли електроакустичними трактами зв'язку і мовлення та відповідно видозмінені за своїми параметрами.

В разі оцінювання трактів мовлення і зв'язку вважають, що кожен акустичний сигнал майже завжди є випадковим в імовірнісному сенсі і містить інформацію, відповідну його об'єму

$$V = FDt.$$

де: F - частотний діапазон; D - динамічний діапазон, визначає рівень; t - час дії сигналу.

Винятком з цього є сигнали, подібні виттю сирени або гудка тощо. Хоча в музичних сигналах дуже великі ділянки можуть мати періодичний характер, зазвичай для великих інтервалів часу їх також можна вважати випадковими.

Тому акустичні сигнали характеризують розподілами за рівнем, за частотним діапазоном і у часі, а також середніми значеннями за інтенсивністю або рівнем, динамічним діапазоном, частотним діапазоном і часом кореляції окремих ділянок.

Якщо проаналізувати характер зміни рівня звукового тиску (або напруги) в залежності від часу у звукових сигналах, то можна їх класифікувати в такий спосіб:

- детерміновані - значення сигналу у даний момент часу дає змогу передбачити його значення в наступні моменти часу, наприклад, синусоїдна звукова хвиля. Такі сигнали зазвичай створюють штучним шляхом;

- випадкові - значення сигналу у даний момент часу не дозволяє передбачити його значення в наступні моменти часу, оскільки вони змінюються за випадковим законом - наприклад, білий шум;

- квазівипадкові - значення яких передбачувані на обмежених відрізках часу, але в цілому зміну сигналу передбачити неможливо, - до таких сигналів відносяться музика і мова.

Крім того, акустичні сигнали можна розподілити на стаціонарні, для яких середньостатистичні властивості не змінюються у часі (на деякому інтервалі усереднення $T>T_0$, де T_0 - інтервал стаціонарності) і нестаціонарні, середні значення яких різні у різні моменти часу. До числа останніх відносять мовні та музичні сигнали. На великих інтервалах усереднення T>1…3 хв для мови і T>15…20 хв для

музики їх можна вважати стаціонарними.

Таким чином, оскільки музичні та мовні сигнали є сигналами квазівипадковими, тобто, передбачити їх значення можна лише з певною ймовірністю, то для аналізу їх акустичних характеристик застосовують методи статистичного, спектрального і кореляційного аналізу.

Статистичний аналіз різних акустичних сигналів (музики, мовлення, шуму тощо) дає змогу встановити розподіл миттєвих значень та їх рівнів у часі; розподіл тривалостей пауз; розподіл максимальних рівнів сигналу та тривалостей їх безперервного існування у часі; розподіл поточної та середньої потужності; динамічний діапазон тощо.

До найбільш важливих параметрів, що можна отримати зі статистичного аналізу рівнеграм, які є необхідними щодо механізмів звукоутворення в музичних інструментах, голосовому апараті, акустичних системах тощо, відносять динамічний діапазон і пік-фактор.

Спектральний аналіз застосовують для розкладання будь-якого складного акустичного сигналу, що створено різними джерелами звуку, на простіші складові (аналогічно тому, як біле світло можна розкласти на його складові - прикладом може бути веселка).

До найбільш важливих параметрів, що можна отримати зі спектрального аналізу звукових сигналів це, безпосередньо, енергетичний спектр сигналу, частотний діапазон, спектри модульованих сигналів, характеристика спрямованості на окремих частотах.

Кореляційний аналіз дає можливість визначити в процесі роботи з музичними та мовними сигналами дуже корисну часову характеристику - функцію кореляції (коли порівнюють два різні сигнали) або функцію автокореляції (коли порівнюють значення одного й того самого сигналу в різні моменти часу).

3.1. Статистичний аналіз. Динамічний діапазон і середній рівень сигналу

У процесі будь-якого передавання рівень акустичного сигналу безперервно змінюється за випадковим законом, причому діапазон його змін може бути досить широким (рис. 3.1) [10].

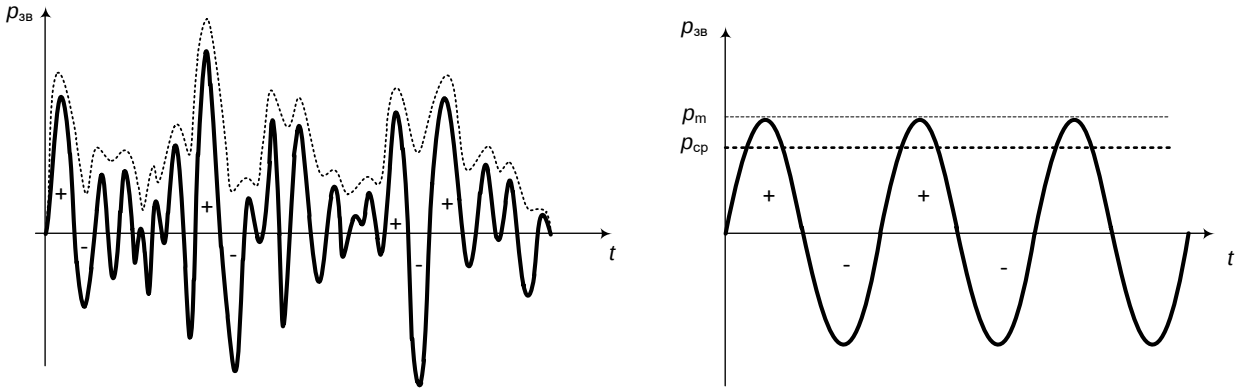
Характеристикою, що відображає зміну рівня сигналу у часі, є рівнеграма. Рівнеграма, як залежність рівня сигналу від часу, може бути визначена для рівня, обчисленого з сталою часу вимірювача, що дорівнює (150...200) мс (суб'єктивна рівнеграма, пов'язана з оцінкою сприйняття сигналу), або (20...30) мс (об'єктивна рівнеграма, пов'язана з параметрами звукотехнічної апаратури).

На рис. 3.2,*а* наведено рівнеграму і її інтегральний розподіл (*б*).

З рівнеграми визначають інтегральний розподіл інтенсивності, для цього встановлюють умовний рівень L_k (в нашому випадку $L_k = L_0$) і для нього визначають час, за який рівень сигналу буде перевищувати L_k.

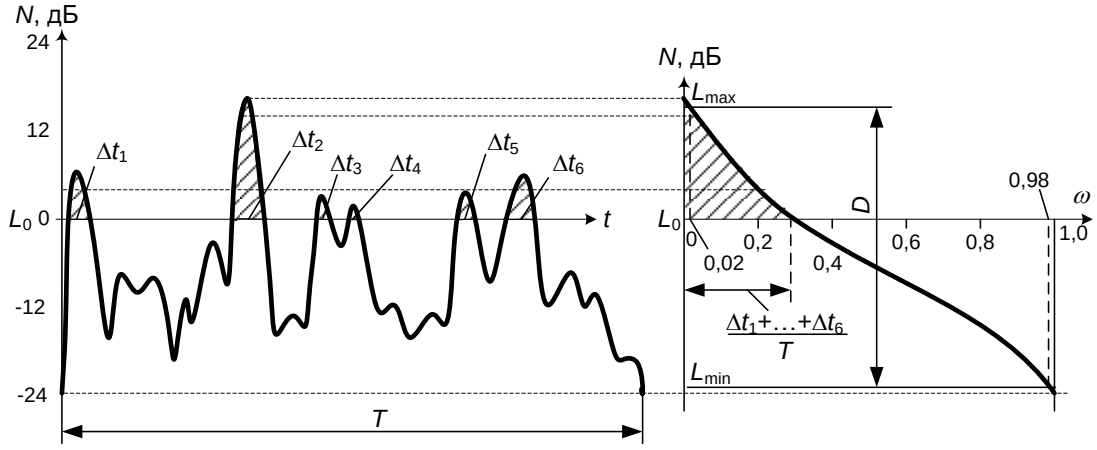
На рис. 3.2,*а* час, за який рівень перевищує певне значення (в нашому випадку L_0) $\tau = \Delta\tau_1 + \Delta\tau_2 + \Delta\tau_3 + ... + \Delta\tau_{n=6}$. Δt - часовий інтервал дії сигналу. Відносний час перебування рівня вище L_0 - $\omega_k = \frac{\tau_k}{T}$, де T - період часу, що дорівнює 15 с для

мовних сигналів і 1 хв для музичних. За цей період часу визначають і рівнеграму.



а б

Рис.3.1. Форма звукового (*а*) і синусоїдного (*б*) сигналу
(штриховий лінією наведено умовно зміну рівня сигналу)



а б

Рис. 3.2. До визначення динамічного діапазону:
рівнеграма (*а*); та побудова інтегрального розподілу згідно неї (*б*)

Встановлено, що середні розподіли, які отримані для первинних музичних і мовних сигналів, за формою близькі до нормального розподілу. Введено поняття квазімаксимального і квазімінімального рівнів сигналу $L_{макс}$ і $L_{мін}$ (L_{max} і L_{min}). Їх визначають за відносним часом перебування рівня сигналу над відповідним рівнем. Для квазімаксимального рівня цей час домовилися обрати таким, що дорівнює двом процентам для музичного сигналу і одного процента - для мовного, а для квазімінімального - відповідно 98% та 99% (див. рис. 3.2) [11].

$$\tau_{L_{max}} = 0.01 - \textit{мовний} \qquad \tau_{L_{min}} = 0.99 - \textit{мовний}$$
$$\tau_{L_{max}} = 0.02 - \textit{музичний} \qquad \tau_{L_{min}} = 0.98 - \textit{музичний}.$$

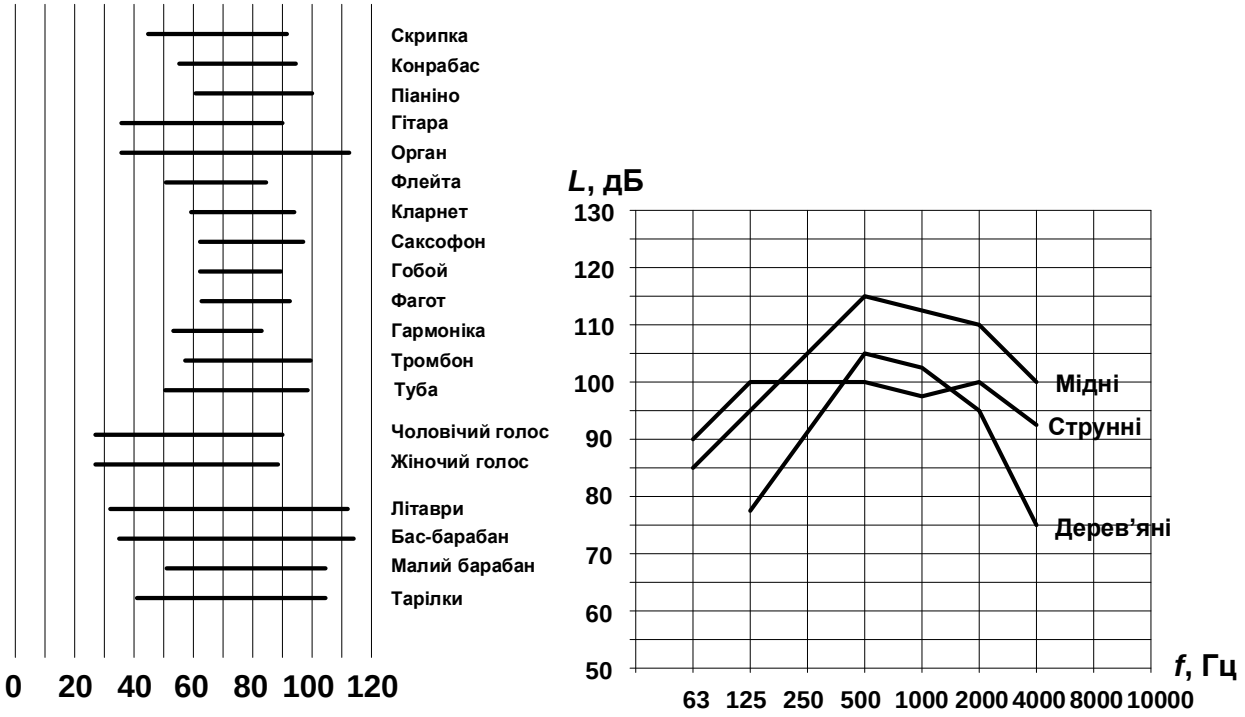
Вибір саме таких значень для максимуму і мінімуму заснований на тому, що більш короткі піки і стрімкі мінімуми сигналу практично не сприймаються слухом (для мовного сигналу відсоток взятий менше, ніж для музичного, оскільки дуже короткі звуки в мові все ж несуть деяку інформацію).

Різницю між квазімаксимальним і квазімінімальним рівнями називають

динамічним діапазоном

$$D = L_{макс} - L_{мін}.$$

Значення динамічного діапазону є однією з найважливіших характеристик будь-якого джерела звуку (музичного інструменту, голосу, акустичної системи і ін.) і має принципово важливе значення для практики роботи звукорежисера, оскільки одним з його завдань є забезпечення динамічного діапазону звукового сигналу згідно технічним можливостям тракту передавання або звукозапису. Динамічні діапазони музичних інструментів знаходяться в межах 20…80 дБ, симфонічного оркестру (натуральні музичні інструменти) – 65…75 дБ і до 90 дБ, мови – 25…45 дБ; телефонні розмови – 35…45 дБ; невеликі ансамблі (натуральні музичні інструменти) – 45…55 дБ; естрадний ансамбль (електронний музичні інструменти) до 90 дБ (рис. 3.3,*а*) [10].



а б

Рис. 3.3. Динамічні діапазони музичних інструментів й мови (*а*) та розподіл рівнів акустичної потужності різних груп музичних інструментів (*б*)

Середній рівень інтенсивності акустичного сигналу можна визначати або за слуховим відчуттям (суб'єктивне середнє), або як середній статистичний за інтенсивністю для тривалих інтервалів часу (середнє тривале), або як середній, вимірюваний приладом, що має невелику сталу часу (об'єктивне середнє).

Для вторинних сигналів досить визначати тільки середній рівень за відчуттям, для первинних - необхідно знати всі середні рівні, оскільки ці сигнали проходять до людини через апаратуру систем зв'язку і мовлення.

Ці середні рівні сигналу можна виміряти, якщо змінити сталу часу приладу. З огляду на те, що миттєва потужність сигналу змінюється від нуля до амплітудного значення, мінімальна стала часу приладу для вимірювання об'єктивного середнього

рівня не повинна бути менше максимального напівперіоду коливань (для f = 30 Гц, $T_{макс}/2$ = 17 мс). Оскільки стала часу слуху у середньому дорівнює 150 мс, то для вимірювання середнього рівня за слуховим відчуттям стала часу має бути близько 150 мс.

Для отримання тривалого середнього (усередненого) рівня сталу часу приладу обирають 15 с для мови і 1 хв. - для музики.

Середній акустичний рівень сигналу

$$L_{I_{сер}} = 10\lg\frac{I_{сер}}{I_0},$$

де

$$I_{сер} = \frac{1}{\tau}\int_{-\infty}^{t_0} I(t)e^{-\frac{t_0-t}{\tau}}dt,$$

τ - стала часу, $I(t)$ - часова залежність інтенсивності сигналу, $e^{-\frac{t_0-t}{\tau}}$ - додатковий експоненційний множник, що враховує процес реєстрації сигналу з урахуванням «пам'яті» приладу внаслідок наявності у нього сталої часу.

Зазвичай акустичний сигнал перетворюють у електричний. У цих ситуаціях на виході електроакустичного пристрою електричний рівень

$$N_{сер} = 10\lg(P_e/P_0),$$

де P_e - потужність сигналу (електрична); P_0 = 1 мВт - потужність, відповідна нульовому рівню стгналу.

Різницю між квазімаксимальним і усередненим рівнем (за тривалий проміжок часу, наприклад, 15 с для мови і 1 хв. для музики) називають пік-фактором:

$$П = L_{макс} - L_{сер} = N_{е.макс} - N_{е.сер}.$$

Пік-фактор визначає, наскільки нижче треба взяти усереднений рівень сигналу, наприклад, для запису звуку в порівнянні з максимально припустимим рівнем обмеження в каналі, щоб не перевантажити канал на пікових рівнях. Для музичних сигналів пік-фактор доходить до 20…25 дБ і більше, для мовного сигналу - не перевищує 12 дБ. Ці дані пік-фактору відносять до сигналів, що не пройшли будь-яке оброблення, у тому числі внаслідок впливу акустичних властивостей приміщення. (Пік фактор - визначали практично. Середній рівень сигналу для запису вокалу беруть, як мінімум, на 12 дБ нижче). Значення пік-фактору, наприклад, для рояля 9,8 дБ, для труби 12 дБ, для симфонічного оркестру до 28 дБ.

Деякі значення середнього звукового тиску натуральних музичних інструментів [11]:

· великого барабана на відстані приблизно 1 м - 6 Па;

· труба на відстані приблизно 1 м – 0,87 Па;

· рояль на відстані приблизно 3 м – 0,3 Па;

· невеличкий оркестр на відстані приблизно 4 метри – 0,66 Па;

· розмова на відстані 1 метр – 0,5 Па, а пік фактор при цьому близько 10 дБ;

· оратор на відстані приблизно 1 м – 0,5 Па, а пік фактор близько 12 дБ;

· гучна телефонна розмова до 4 Па, а пік фактор 18 дБ.

Рівневі параметри трактів звукопередавання визначає амплітудна характеристика (АХ). АХ – це залежність рівня вихідного сигналу від рівня вхідного сигналу (рис. 3.4). За АХ визнають такі параметри, як: N_{max}, N_{min}, $K_{підс}$ тощо залежно від вхідного параметра.

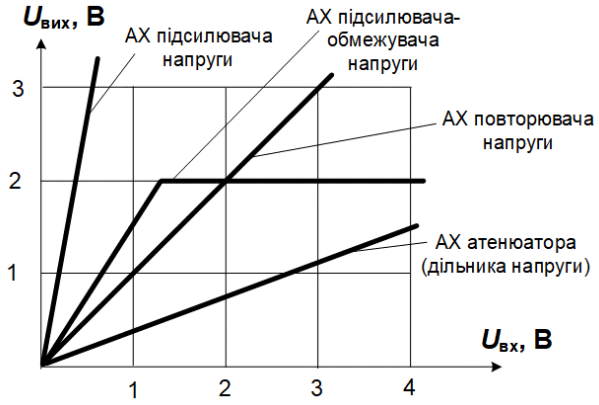


Рис. 3.4. Амплітудні характеристики

3.2. Спектральний аналіз. Частотний діапазон і спектри

В основі спектрального аналізу музичних і мовних сигналів лежить дуже важлива теорема, сформульована французьким математиком Жозефом Фур'є (1768-1830 рр.): «Будь-яке періодичне коливання, якою б складності воно не було, може бути представлено у вигляді суми простих коливань, чиї частоти є гармоніками основного тони (фундаментальної частоти), а амплітуди і фази розраховують за певним законом» [9].

Процес розкладання складного періодичного сигналу на прості гармонійні складові називають аналізом Фур'є або спектральним аналізом, зворотний процес - конструювання складного звуку по його гармонійним складовим - називають синтезом Фур'є.

Залежно від типу сигналу використовують різні види спектрального аналізу:

· ряд Фур'є (для періодичних сигналів),

· інтеграл Фур'є (для неперіодичних сигналів),

· дискретне перетворення Фур'є (ДПФ),

· швидке перетворення Фур'є (ШПФ) для цифрових сигналів.

Періодичний сигнал $U(t)$ має задовольняти умові

$$U(t)=U(t+nT),$$

де T - період коливань, n - ціле число. Основну (фундаментальну) частоту визначають як $f_0 = 1/T$.

Такий сигнал може бути представлено у вигляді ряду Фур'є, тобто у вигляді суми гармонік

$$U(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega_0 t + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\omega_0 t.$$

Частоти цих гармонійних складових дорівнюють: ω_0, $2\omega_0$, $3\omega_0$, де $\omega_0 = 2\pi f_0$.

Амплітуди цих складових визначають за такими формулами:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} U(t)\, dt,$$

$$a_n = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} U(t) \cos n\omega_0 dt,$$

$$b_n = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} U(t) \sin n\omega_0 dt.$$

Ряд Фур'є може бути записано також в іншій формі:

$$U(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} A_n e^{-i(n\omega_0 t - \varphi_n)},$$

де $A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$, $tg\varphi = b_n / a_n$.

Таким чином будь-якої складності періодичний сигнал може бути представлено у вигляді суми простих гармонійних сигналів з амплітудами *A* і фазами φ. Сукупність усіх амплітуд називають амплітудним спектром, сукупність всіх фаз - фазовим спектром.

Подання сигналу у вигляді ряду Фур'є можливо тільки для періодичних сигналів. В такому випадку сигнал має дискретний спектр.

Для звукових сигналів - неперіодичних (шум, імпульс тощо) - застовують інтеграл Фур'є. При цьому пряме і зворотне перетворення сигналу (аналіз і синтез) може бути записано у вигляді:

$$U(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) \cdot e^{i\omega t} d\omega,$$

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} U(t) \cdot e^{-i\omega t} dt,$$

де *U*(*t*) - неперіодичний сигнал, *S*(ω) - спектральна щільність сигналу.

Акустичний сигнал від кожного з первинних джерел звуку, використовуваних в системах мовлення та зв’язку, як правило, має безперервно змінювану форму і склад спектру.

Спектри неперіодичних сигналів називають безперервними, в них спектральні складові сигналу розташовані так щільно за шкалою частот, що зазвичай для їх опису використовують спектральну густину (щільність) сигналу, що відображає внесок всіх спектральних компонент, що розташовано всередині інтервалу частот - $d\omega$.

Спектри можуть бути високо- і низькочастотними, дискретними і суцільними. У кожного джерела звуку, навіть того ж самого типу (наприклад, скрипка в оркестрі), спектри мають індивідуальні особливості, що надає звучанню характерне забарвлення. Це забарвлення називають тембром. Існують поняття тембру скрипки, тромбона, органу тощо, а також тембру голосу: дзвінкий, коли підкреслені високочастотні складові; глухий, коли вони притлумлені. Структура спектрів різних музичних і мовних сигналів має вирішальне значення для сприйняття їх тембрів, причому істотне значення мають не тільки амплітудні (які використовують найчастіше), але і фазові спектри [10].

Спектри також можуть бути стаціонарними (склад їх не змінюється з часом) і нестаціонарними (відбувається зміна структури спектра у часі).

У реальних музичних і мовних сигналах відбувається постійна зміна їх часової структури; отже, спектри реальних сигналів є нестаціонарними і їх склад весь час змінюється в часі. Тому для опису спектрів реальних музичних і мовних сигналів використовують поняття «довготривалого усередненого спектра», коли виділяють тривалий відрізок сигналу і розраховують його спектр, що характеризує стійкі властивості даного сигналу. Крім того, вводять поняття «миттєвого спектра», який являє собою спектр короткого відрізка сигналу, що безпосередньо передує даному моменту часу, виділеного за допомогою фільтра (наприклад, «прямокутного вікна»). Це дає можливість простежити за зміною спектру сигналу в різні моменти часу. Таку техніку побудови тривимірних спектрів - 3D (або кумулятивних спектрів) - використовують практично у всіх музичних комп'ютерних програмах (Spectro-Lab, Wave-Lab тощо).

Структура спектрів різних музичних і мовних сигналів має вирішальне значення для сприйняття їх тембрів.

В першу чергу, важливим є середній спектр для джерел звуку кожного типу, а для оцінки спотворень сигналу - спектр, усереднений за тривалий інтервал часу (15 с для інформаційних сигналів і 1 хв. для художніх). Усереднений спектр може бути, зазвичай, суцільним і достатньо згладженим за формою.

Для характеристики роботи різних звукових джерел дуже важливу інформацію дають енергетичні спектри, що визначають розподіл енергії сигналу в різних частотних областях. Оскільки енергія (інтенсивність) сигналу пропорційна квадрату звукового тиску, то спектральна щільність енергії (інтенсивності), або його енергетичний спектр, визначають як квадрат модуля спектральної щільності сигналу

$$I(\omega) = |S(\omega)|^2 .$$

Якщо сигнал періодичний і його спектр дискретний, то енергетичний спектр визначають обчисленням квадратів амплітуд гармонійних складових сигналу

$I(\omega) \approx A_n^2(\omega)$ [10].

Отже, суцільні спектри характеризують залежністю спектральної щільності від частоти (цю залежність називають енергетичним спектром). Спектральною щільністю (густиною) називають інтенсивність звуку в смузі частот шириною, що дорівнює одиниці частоти. Для акустики цю смугу беруть у 1 Гц. Спектральна щільність

$$J = I_{\Delta F}/\Delta f,$$

де $I_{\Delta F}$ - інтенсивність, виміряна у вузькій смузі частот Δf з вузькосмуговими фільтрами.

Для зручності оцінки введено логарифмічну міру щільності спектра аналогічно рівню інтенсивності. Цю міру називають рівнем спектральної щільності (густини) або спектральним рівнем. Спектральний рівень

$$B=10\lg(J/I_0),$$

де $I_0=10^{-12}$ Вт/м^2 - інтенсивність, відповідна нульовому рівню, як і для оцінки рівня інтенсивності.

Дуже часто для характеристики спектру замість спектральної щільності використовують інтенсивності і рівні інтенсивності, виміряні в октавній, напівоктавній або третиноктавній смузі частот. Неважко встановити зв'язок між спектральним рівнем і рівнем в октавній (напівоктавній або третиноктавній) смузі. Спектральний рівень

$$B=10\lg(I_{\Delta f\,\text{окт}}/\Delta f_{\text{окт}} I_0),$$

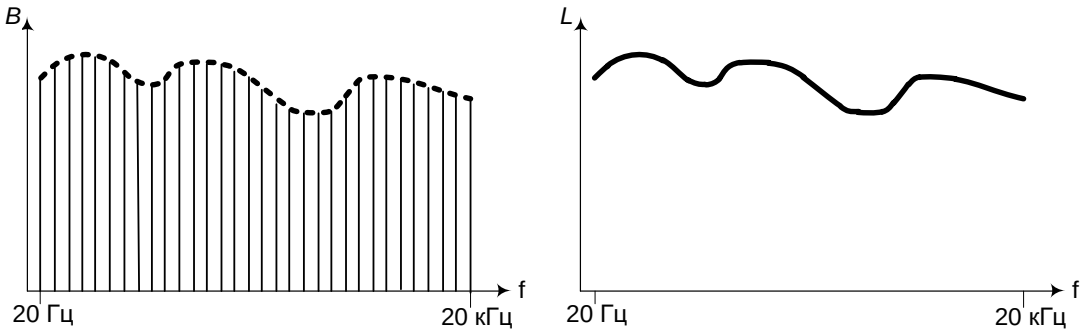
а рівень в октавній смузі $L_{\text{окт}}=10\lg(I_{\Delta f\,\text{окт}} / I_0)$,
де $\Delta f_{\text{окт}}$ - ширина відповідної октавної смуги.

Віднімаючи друге з першого, знаходимо

$$L_{\text{окт}}-B = 10\lg\Delta f_{\text{окт}} .$$

На рис. 3.5,*а* наведено узагальнений спектр складного звукового сигналу, а на рис. 3.6 наведено тривимірний спектр музичного сигналу, створюваного флейтою [810.

Частотний діапазон джерел сигналів встановлюють за кривими розподілу рівнів спектральної щільності звукових сигналів на основі слухових оцінок. Частотний діапазон акустичного сигналу визначають з частотної залежності спектральних рівнів (обвідна частотних рівнів визначає частотну характеристику або амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) (рис. 3.5,*б*)). Це визначення можна зробити або за спадом спектральних рівнів або приблизно, на слух. Суб'єктивними межами вважають помітність обмеження діапазону для 75% слухачів.



а б

Рис. 3.5. Спектр (*а*) і частотна характеристика сигналу (*б*)

Частотні діапазони основних музичних інструментів і голосу, враховуючи тільки тональні звуки, наведено на рис. 3.7. Частотні діапазони для ряду первинних джерел акустичного сигналу з урахуванням гармонік основних тонів становлять: для мови від 70 Гц до 7 кГц, для скрипки від 250 Гц до 15 кГц, бас-труби від 50 Гц до 6 кГц, органу (20…15000) Гц, симфонічного оркестру від 30 Гц до 15 кГц.

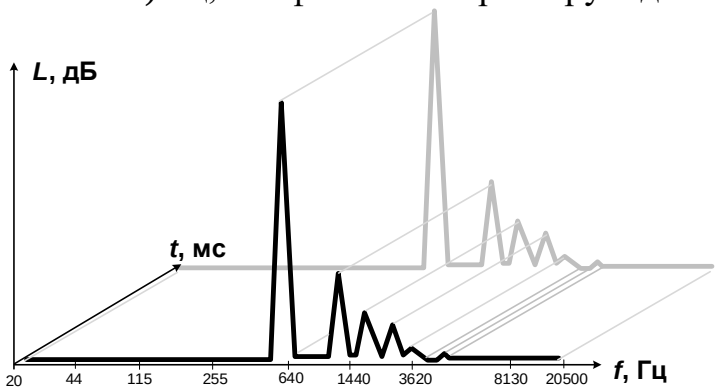


Рис. 3.6. Тривимірний спектр музичного сигналу (флейта)

На рис. 3.8 наведено рівні спектральної щільності середньої потужності для різних джерел звукових сигналів – мови (за рівнем акустичного сигналу), музики (за рівнем електричного сигналу) [11].

Октавно людина сприймає 10 октав. В таблиці 3.1 наведено октавні смуги та центральні частоти октавних смуг звукового частотного діапазону.

Таблиця 3.1 Октавні смуги та центральні частоти октавних смуг звукового частотного діапазону

Октавна смуга, Гц	20-40	40-80	80-160	160-320	320-640	640-1280	1280-2560	2560-5120	5120-10240	10240-20480
Центральна частота, Гц	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000

Центральні частоти третиноктавних смуг звукового частотного діапазону такі: 20; 25; 31,5;40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 320; 400; 500; 630; 800; 1000; 1250; 1600; 2000; 2500; 3200; 4000; 5000; 6300; 8000; 10000; 12500; 16000; 20000 Гц.

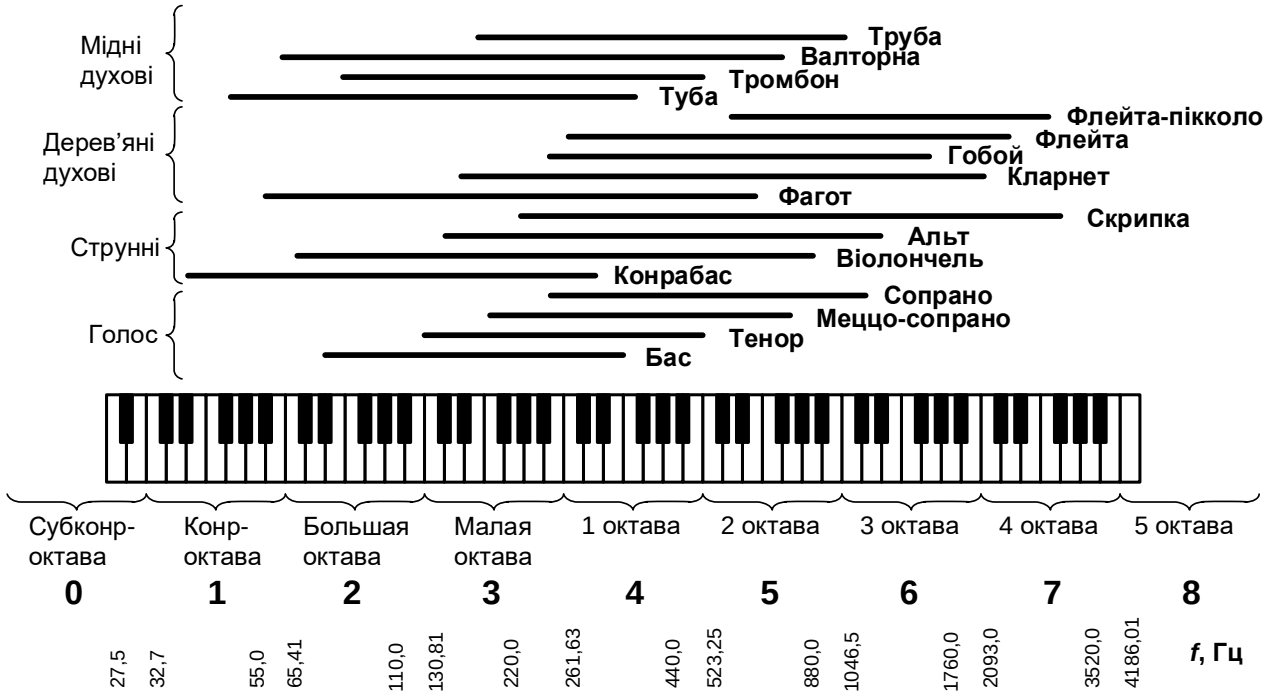


Рис. 3.7. Частотні діапазони основних музичних інструментів і голосу

До акустичних сигналів відносять в ряді випадків і акустичні шуми, частотні характеристики яких наведено на рис. 3.9.

Термін «білий» відносять до шумів, що мають однакову спектральну щільність у всьому частотному діапазоні, «рожеві» - до шумів з тенденцією спаду щільності на 3 дБ/окт в бік високих частот. Мовні шуми - шуми, створювані одночасною розмовою кількох людей.

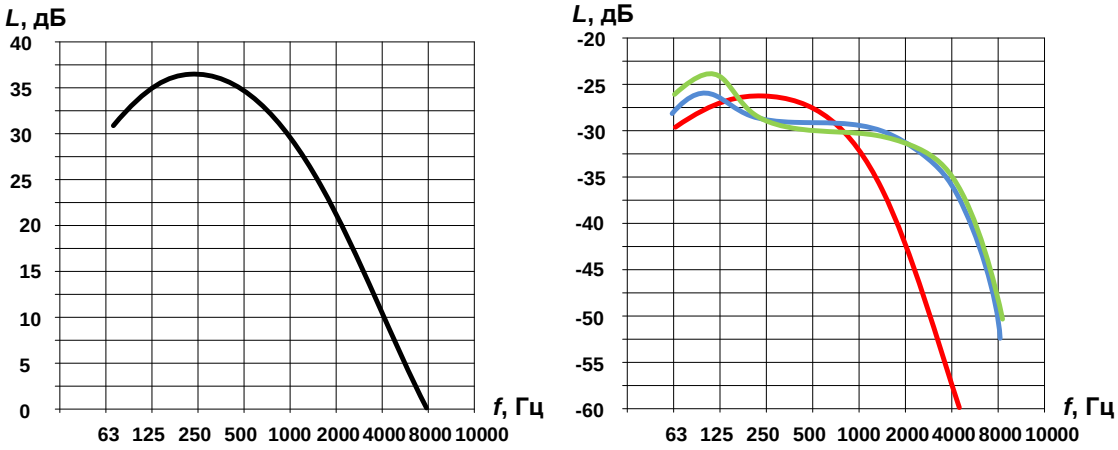


Рис. 3.8. Рівні спектральної щільності середньої потужності мови (*а*) та (*б*) - вокальної та камерної музики (червоний колір), легкої та естрадної музики (зелений колір), симфонічної музики (блакитний колір)

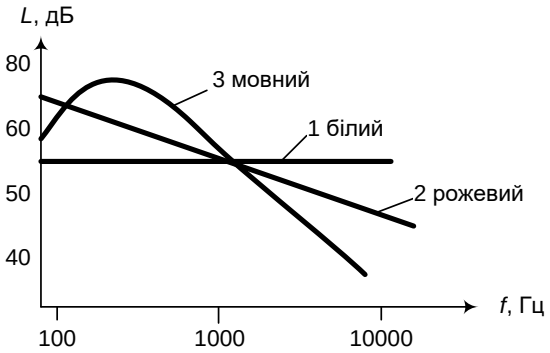


Рис. 3.9. Спектральні рівні шумів:
1 - білого; 2 - рожевого; 3 - мовного

Частотний діапазон звукового сигналу визначає в якій частині звукових частот зосереджена основна енергія акустичного сигналу, що створено джерелом звуку.

Для визначення кількості акустичної енергії, зосередженої всередині відповідного кута випромінювання застосовують характеристику спрямованості джерела звуку. Ширина кута випромінювання залежить від частоти сигналу – як правило, із збільшенням частоти характеристика спрямованості загострюється.

Особливою сферою застосування спектрального аналізу у практиці звукозапису, радіомовлення тощо є дослідження спектрів модульованих коливань, до числа яких відносять практично всі музичні і мовні сигнали, створювані музичними інструментами та голосом.

Спектри модульованих сигналів: модульовані коливання виходять в тому випадку, якщо параметри сигналу (амплітуда, частота, фаза) починають змінюватися за якимсь заданим законом. Процес керування параметрами звукового сигналу називають модуляцією.

Просте гармонійне коливання повністю описують трьома параметрами - амплітудою, частотою і фазою

$$x(t) = A_0 sin(\omega_0 t + \varphi_0).$$

Змінюючи за певним законом кожен з цих параметрів, можна отримати різні види модуляції сигналів. Якщо за певним законом змінюють амплітуду сигналу, то цей процес називають амплітудною модуляцією, якщо частоту - частотної модуляцією, фазу - фазовою модуляцією.

Амплітудна модуляція (АМ): в разі зміни амплітуди коефіцієнт A_0 буде вже не постійним, він почне змінюватися у часі: $A(t)$. Ця зміна може відбуватися, наприклад, за гармонійним (синусоїдним) законом [9]:

$$A(t) = A_0 sin(\Omega t + \phi),$$

де Ω - частота зміни амплітуди (частота модуляції), ϕ - фаза.

Функцію $A(t)$ називають модулювальним коливанням, на практиці його частота зазвичай набагато нижче частоти основного коливання (модульованого): ($\Omega << \omega$). У цьому випадку загальне модульоване коливання може бути записано в такому вигляді:

$$x(t) = A_0[1 + M\sin(\Omega t + \phi)\sin(\omega_0 t + \varphi_0),$$

де M - коефіцієнт модуляції, який дорівнює відношенню $M = A_1/A_0$ (A_1 - амплітуда сигналу модуляції, A_0 - амплітуда вихідного модульованого сигналу). Значення M характеризує глибину амплітудної модуляції, тобто, показує, наскільки амплітуда основного коливання змінюється з часом, що сприймається на слух як зміна гучності.

Вид амплітудно-модульованого коливання та його спектр наведено на рис. 3.10. У музичному мистецтві використовують тільки сигнали з дуже малим коефіцієнтом M і низькою частотою модуляції, близько 5-7 Гц. Такий вид зміни сигналу називають тремоло.

Частотна модуляція: якщо в простому гармонійному коливанні змінювати за певним законом частоту або фазу коливань, то можна отримати частотно і фазомодульовані сигнали (ЧМ і ФМ). Якщо зміна частоти відбувається також за синусоїдним законом, сумарне частотно-модульоване коливання матиме вигляд, показаний на рис. 3,10,*в*, і може бути записано у вигляді (якщо $\varphi_0 = 0$):

$$x(t) = A_0\sin(\omega_0 t + M_1\sin\Omega t),$$

де $M_1 = \Delta\omega/\Omega$ - індекс однотональної частотної модуляції, $\Delta\omega$ - девіація (зміна) частоти вихідного сигналу. В спектрі такого сигналу також з'являються бічні складові. Зі збільшенням M збільшується число спектральних складових і відбувається перерозподіл енергії між ними, зростає ширина спектра. ЧМ-сигнал вимагає більш широкої смуги пропускання в M +1 раз більше, ніж АМ-сигнал [10].

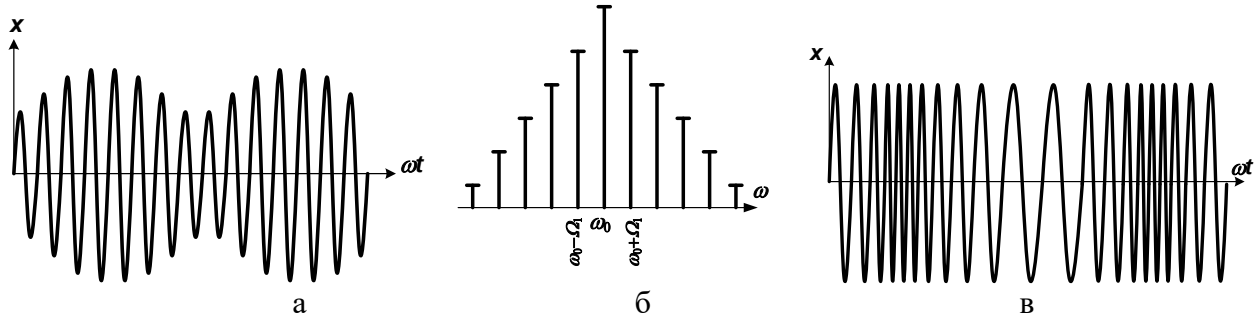


Рис. 3.10. Вид АМ сигналу (*а*) та його спектр (*б*), вид ЧМ сигналу (*в*)

Частотномодульовані сигнали застосовують у вокальній та музичній творчості і називають вібрато з частотою модуляції (5…10) Гц і їх сприймають як незначну зміну висоти тону.

Фазомодульовані сигнали мають схожі спектри, проте, ФМ і ЧМ сигнали по різному поводяться в разі зміні частоти модуляції і амплітуди модулюючого сигналу: для ЧМ девіація (зміна) частоти $\Delta\omega$ пропорційна амплітуді низькочастотного (модулюючого) сигналу і не залежить від його частоти Ω. Для фазової модуляції вона лінійно збільшується зі зростанням частоти модулюючого сигналу Ω.

Фазову модуляцію застосовують у сучасних комп'ютерних програмах для оброблення музичних сигналів у різних спецефектах.

3.3. Кореляційний аналіз. Часові характеристики акустичного сигналу

До часових характеристик сигналу відносять рівнеграму і час кореляції. Рівнеграма сигналу дає можливість визначити стрімкі переходи інтенсивності і, отже, з на цій підставі можна ставити вимогу до сталих часу трактів передавання сигналу [11].

Такі часові характеристики сигналу, як час кореляції, використовують рідко, хоча досліди показують, що цей параметр відіграє значну роль для визначення якості звучання.

Кореляційний аналіз дає можливість визначити в процесі роботи з музичними і мовними сигналами дуже корисну часову характеристику - функцію кореляції (коли порівнюють два різних сигнали) або функцію автокореляції (коли порівнюють значення одного і того ж сигналу у різні моменти часу).

Функції кореляції (або автокореляції) дають змогу оцінити ступінь «подібності» сигналів один одному (або сигналу самому собі в різні моменти часу), а також виявити періодичність сигналів (іноді приховану шумами). Необхідність в такій оцінці виникає у разі аналізу прямих сигналів і їх відбиттів, наприклад, для оцінювання реверберацийних процесів у приміщенні, для виділення сигналів на тлі шумів тощо.

Відповідно до сучасних поглядів на роботу слухового аналізатора в разі суб'єктивної оцінки «просторовості» в концертних залах, студіях тощо істотне значення має кореляційна функція між бінауральними сигналами, що потрапляють на два слухових канали. Крім того, виявлення періодичності в складних звукових сигналах за значенням функції автокореляції використовує слуховий апарат для визначення висоти тону.

Якщо в разі збільшення інтервалу усереднення значення потужності кожного з сигналів прямує до деякого граничного значення, що не залежить від часу, то такі сигнали називаються стаціонарними і однорідними. При цьому функція автокореляції також прямує до деякого граничного значення. Якщо в разі збільшення інтервалу часу середні потужності і функція кореляції безперервно змінюються з часом, то такі сигнали називають неоднорідними.

Реальний музичний сигнал має кінцевий інтервал кореляції, на якому функція кореляції відмінна від нуля. Причому якщо в сигналі є періодичність (навіть прихована шумами), то функція автокореляції має максимуми для часу затримки, що дорівнює періоду сигналу, це дозволяє виявити періодичність.

3.4. Вторинний сигнал

В ідеальному випадку вторинний сигнал має точно відтворювати первинний, але це не завжди потрібно, оскільки слух людини може і не помітити їх невідповідність. До того ж на практиці точна відповідність вторинного та первинного сигналів часто неможлива або дуже важко це здійснити.

В разі художнього мовлення, для телебачення і звукозапису треба прагнути до цієї відповідності в межах, за яких слухове відчуття, що створюється у слухача, було б близько до того відчуття, яке він отримує, перебуваючи в місці виконання даної програми за умови досить хороших акустичних умов в цьому місці. Для інформаційних програм мовлення та телефонного зв'язку цієї відповідності домагаються в першу чергу для отримання повної розбірливості мови, а потім для досить високої якості звучання. Тільки у цьому випадку необхідно прагнути до більш точної відповідності вторинного сигналу первинному. В обох випадках важливими є економічні міркування [12].

Порушення точності передавання, що розпізнають на слух, можуть бути найрізноманітнішого виду. Основні з них:

1. Втрата акустичної перспективи;
2. Зсування (зміщення) рівнів;
3. Обмеження динамічного діапазону;
4. Обмеження частотного діапазону;
5. Наявність шумів і завад;
6. Спотворення сигналу.

Втрата акустичної перспективи. У разі передавання звукового сигналу одноканальною системою відбувається відчуття слухання одним вухом, навіть за наявності декількох мікрофонів в приміщенні, звідки ведеться передавання, і для рознесених вторинних джерел звуку. Джерело звуку для слуху буде завжди здаватися таким, що знаходиться в деякому середньому положенні відносно до фактичних вторинних джерел, оскільки часовий зсув і різниця рівнів для обох вух слухача не залежать від місцезнаходження первинного джерела звуку. Цей дефект може бути до певної міри виправлений стереофонічною системою передавання, заснованої на багатоканальній системі передавання сигналу.

Зсування (зміщення) рівнів. Оскільки трактом передавання сигналів не передають інформація щодо абсолютних рівнів звучання первинного сигналу, то слухач (а у разі масовому прослуховуванні - оператор на приймальному кінці) на свій розсуд встановлює рівень вторинного сигналу. При цьому не завжди можна відновити потрібний рівень первинного сигналу через недостатню потужність апаратури на приймальній стороні, а також з-за умов слухання (наприклад, в квартирах з недостатньою звукоізоляцією).

Зсовування рівнів призводить до зміни співвідношення між гучністю низькочастотних і середньочастотних складових первинного і вторинного сигналів, оскільки зміщення середнього рівня вторинного сигналу вгору відносно середнього рівня первинного призводить до суб'єктивного підвищення гучності низькочастотних складових, зміщення вниз - до їх ослаблення.

Обмеження динамічного діапазону. Оскільки динамічний діапазон каналу

передавання обмежено знизу шумами, а зверху - перевантаженням і нелінійністю окремих ланок каналу передавання, то для зменшення спотворень його стискають на початку тракту (у всякому випадку, до ланки, в якій, швидше за все, можливе обмеження або спотворення сигналу). Цей дефект може бути частково виправлено розширенням динамічного діапазону сигналу на кінці тракту, що не завжди доцільно, тому що на приймальній стороні може бути невідомо, наскільки був стиснутий цей діапазон. Крім того, спроба розширити діапазон (застосуванням експандерів) ускладнює апаратуру.

Обмеження частотного діапазону. Оскільки тракт передавання акустичних сигналів не пропускає весь їх частотний діапазон, говорять про обмеження частотного діапазону.

Шуми та завади. Під час передавання на сигнал впливають різного роду завади, в тому числі шуми електричного і акустичного походження. Останні існують як в місці знаходження первинного джерела звуку, так і в місці знаходження слухача.

Вплив шумів і завад зводять до маскування вторинного акустичного сигналу незалежно від їх походження (акустичного або електричного). Шуми зсувають поріг чутності, який не залежить від часу, якщо шуми відносять до «гладких», тобто мають пік-фактор, що не перевищує 6 дБ. До цих шумів відносять різні флуктуаційні шуми, наприклад шуми дробового ефекту, мовні шуми від декількох голосів, що звучать одночасно.

Імпульсні шуми створюють поріг чутності, що змінюється в часі залежно від пік-фактору шуму і тривалості імпульсів. Внаслідок наявності сталої часу у слуху відчуття короткочасних імпульсів виходить згладженим: відбувається вирівнювання часової залежності порога чутності. Імпульсні шуми не тільки маскують корисний сигнал, але і спотворюють його, утворюючи комбінаційні частоти шуму і сигналу. Виходить щось схоже на взаємну модуляцію сигналу і шуму.

Спектр шумів електричного походження, як правило, близький до рівномірного, а акустичного походження - ближче до мовного. Тому частотна залежність порога чутності для перших має тенденцію зростання до високих частот, так як ширина критичних смуг зростає із збільшенням частоти. Для мовних шумів поріг чутності майже не залежить від частоти.

Індустрійні, атмосферні і станційні завади, крім тональних, можуть бути віднесені і до імпульсних, і до гладких з рівномірним або низькочастотним спектром.

Крім цих завад, доводиться іноді враховувати завади від самомаскування мови, тобто з маскуванням слабких звуків, що надходять за гучними.

Боротьбу з акустичними шумами ведуть усуненням (або ослабленням) дії джерел шуму, а також підвищенням звукоізоляції приміщень. Урахування їх дії на приймання мовного сигналу проводять під час розрахунку і вимірювання розбірливості мови.

Спотворення сигналу. Загалом всі зазначені невідповідності первинного і вторинного сигналів є спотвореннями в широкому сенсі цього поняття. Але зазвичай під цим терміном розуміють більш вужчий тип спотворень. До них

відносять лінійні, нелінійні, параметричні і перехідні (часові) спотворення [11].

У загальному випадку коефіцієнт передавання тракту

$$K = p_2 / p_1,$$

де p_2 і p_1 - звуковий тиск в кінці і на початку тракту відповідно.

Коефіцієнт передавання, як правило, залежить від частоти. Оскільки слух не реагує безпосередньо на зсув фаз між складовими сигналу, в подальшому його не враховано і під терміном «коефіцієнт передавання» будемо мати на увазі його модуль. Частотна залежність коефіцієнта передавання, що називають частотною характеристикою тракту передавання, призводить до зміни співвідношень між амплітудами частотних складових, що входять в первинний сигнал.

Суб'єктивно ці спотворення відчувають як зміну тембру первинного сигналу. Наприклад, якщо ослаблені низькочастотні складові, то звучання буде дзвінке. В разі ослаблення високочастотних складових звук глухий. В разі різкого підкреслення низькочастотних складових звучання виходить бубнявим, а для різкого підкреслення високочастотних - свистячим. Ці спотворення (звані частотними) оцінюють за визначенням нерівномірності частотної характеристики

$$H_{\text{ЧХ}} = K_{\text{макс}} / K_{\text{мін}},$$

де $K_{\text{макс}}$ і $K_{\text{мін}}$ - максимальний і мінімальний коефіцієнти передавання в заданому діапазоні частот.

Нерівномірність часто вимірюють в логарифмічних одиницях, в такому випадку

$$\Delta L = 20\lg H_{\text{ЧХ}} = L_{\text{макс}} - L_{\text{мін}},$$

де $L_{\text{макс}}$ і $L_{\text{мін}}$ - максимальний і мінімальний рівні вторинного сигналу за усталеності рівня первинного.

На рис. 3.11 наведено одна з характеристик тракту передавання сигналу. Для визначення нерівномірності частотної характеристики слід виключати з розгляду піки і провали в частотній характеристиці, якщо вони вужче 1/8 октави. Таку умову введено внаслідок наявності широких критичних смуг слуху, а також через те, що у разі швидкої зміни первинного сигналу його спектр розпливається і ці піки і провали згладжуються.

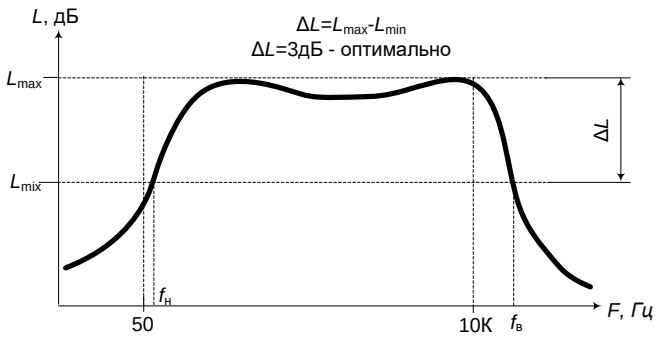


Рис. 3.11. Визначення нерівномірності частотної характеристики і частотного діапазону

Як правило, частотна характеристика найбільш нерівномірна в областях низьких (найнижчих) і високих (найвищих) частот діапазону, тобто поблизу його границь, тому для широкосмугових трактів передавання сигналу, наприклад, мовних, нерівномірність частотної характеристики часто задають в двох діапазонах: номінальному і в основному (200...5000) Гц.

У тих випадках, коли апаратуру не може бути виготовлено із заданою нерівномірністю, в необхідному частотному діапазоні обумовлюють частотний діапазон, в якому нерівномірність не перевищує задану норму.

Частотно-амплітудні спотворення зазвичай усувають частотною корекцією в ланках тракту, в яких сигнал найбільше спотворено.

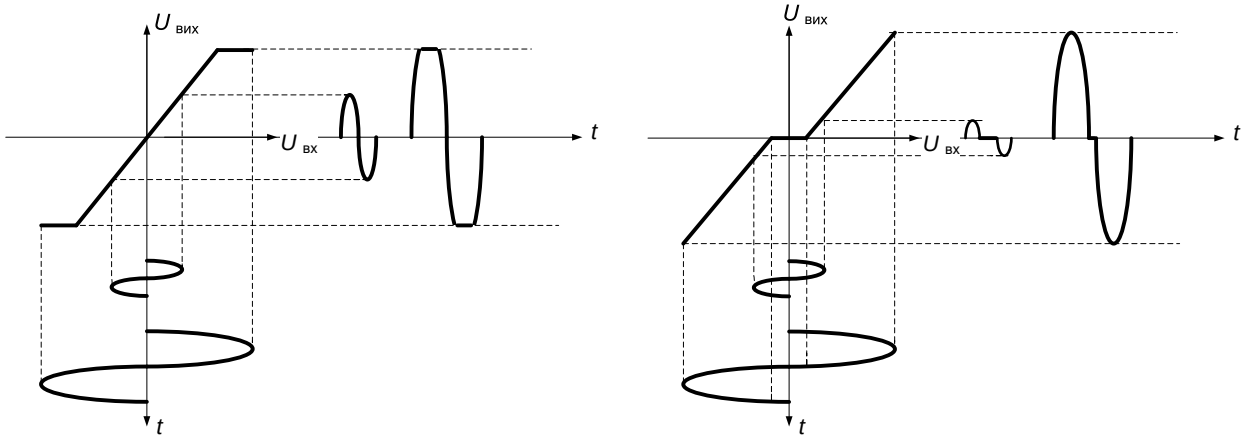
Норми на допустимі частотні спотворення було визначено експериментально. Встановлено, що на низьких частотах спотворення більш помітні, ніж на високих.

Щодо нелінійних спотворень розрізняють два види нелінійності: нелінійність степеневого типу (зміни пропорційності сигналу) і нелінійність через амплітудного обмеження.

Амплітудне обмеження буває зверху і знизу (центральне). У разі обмеження зверху (рис. 3.12,*а*) характеристика тракту до деякого значення $U_{вх0}$ може бути лінійною. Сигнали з амплітудами більше $U_{вх0}$ обмежують. В разі центрального обмеження (рис. 3.12,*б*) слабкі сигнали (до $U_{вх0}$) зрізують, а інші спотворюються.

Дослідження показало, що спотворення, спричинені амплітудним обмеженням зверху, заважають сприйняттю сигналів менше, а для центрального обмеження - більше, ніж спотворення степеневого типу.

Нелінійні спотворення степеневого типу у вигляді гармонічних складових викликають відчуття деренчання (а на високих частотах - хрипи), а нелінійні спотворення у вигляді різницевих тонів викликають відчуття модуляції гучності звуку (зазвичай це помітно на низьких частотах).



а б

Рис. 3.12. Амплітудне обмеження для сигналів з великою і невеликою амплітудами: обмеження зверху (*а*) та знизу (центральне) (*б*)

Результати досліджень довели, що слухач менше відчуває несиметричні спотворення, коли найбільшою за амплітудою виявляється друга гармоніка, оскільки вона знаходиться в октаві з основною частотою. Симетричні спотворення

більш помітні, оскільки третя гармоніка виходить дуже великою і опиняється у квінті з основною. У разі звуження смуги частот помітність спотворення зменшується. Це пояснюють тим, що ряд гармонік і комбінаційних складових опиняються за межами діапазону частот, що передають.

Як правило, нелінійні спотворення найбільш значні на низьких частотах, тому норми на них дають, для декількох діапазонів частот. Із збільшенням рівня сигналу нелінійні спотворення зростають, тому норми на них дають окремо для середніх і пікових рівнів.

Нелінійні спотворення найчастіше оцінюють коефіцієнтом нелінійних спотворень ($K_{\text{НС}}$) [11]:

$$K_{\text{НС}} = \frac{\sqrt{x_{m2}^2 + x_{m3}^2 \ldots}}{x_{m1}},$$

де x_{mk} - амплітуди гармонік сигналу, починаючи з другої; x_{m1} - амплітуда основної складової.

Для стиснення динамічного діапазону застосовують різноманітні автоматичні регулятори рівня. Ці регулятори мають велику сталу часу відновлення і викликають спотворення, що називають перехідними. Перехідні спотворення створено власними коливаннями, що відбуваються в різних ланках тракту. За своїм звучанням вони схожі з нелінійними спотвореннями, тому що в сигналі з'являються комбінаційні частоти.

Контрольні запитання.

1. В чому різниця між первинними та вторинними акустичними сигналами?
2. Якими параметрами визначають об’єм звукового сигналу в звукотехніці?
3. Які характеристики визначає статистичний аналіз звукового сигналу?
4. Наведіть приклад вигляду форми сигналограми та рівнеграми й зазначте такі поняття як миттєве, амплітудне, пікове, діюче, середнє, ефективне значення сигналу.
5. Зазначте визначення динамічного діапазону звукового сигналу та наведіть приклади значень динамічного діапазону для різних джерел звуку.
6. В чому особливість і як визначають середній рівень інтенсивності для складних музичних звуків та гармонійного коливання?
7. Зазначте визначення пік-фактору звукового сигналу та наведіть приклади значень пік-фактору для мовних і музичних програм.
8. Що таке амплітудна характеристика?
9. Які характеристики визначає спектральний аналіз звукового сигналу?
10. Поясніть принцип спектрального аналізу Фур’є.
11. Надайте визначення енергетичного спектру звукового сигналу та вираз спектральної щільності.
12. Надайте визначення та графічне представлення частотного діапазону та амплітудно-частотної характеристики.
13. Зазначте приклади частотних діапазонів різних джерел звуку.
14. Наведіть графічно вигляд спектральної щільності мовних і музичних звуків, а також різних шумів.
15. Надайте визначення амплітудної модуляції та наведіть вираз, що описує амплітудно-модульований сигнал.

16. Надайте визначення частотної модуляції та наведіть вираз, що описує частотно-модульований сигнал.
17. Які характеристики визначає кореляційний аналіз звукового сигналу?
18. Які порушення відповідності вторинного сигналу первинному можуть бути присутні під час звукопередавання?.
19. В чому виявляється втрата акустичної перспективи у вторинному сигналі?
20. В чому виявляється зміщення рівнів і обмеження динамічного діапазону у вторинному сигналі?
21. В чому виявляється обмеження частотного діапазону та лінійні спотворення у вторинному сигналі?
22. Які шуми можна виявляти у вторинному сигналі і як вони погіршують його сприйняття?
23. В чому виявляються нелінійні спотворення вторинного сигналу та як їх сприймає слухач?

4. ДЖЕРЕЛА ЗВУКОВИХ СИГНАЛІВ

Ключові слова: аерофон, амбушур, артикуляція, атака, барабан, вокал, вібрато, вібратор, генератор, гештальт-психологія, гітара, голос, голосові зв’язки, духовий, інтервальний коефіцієнт, інтонація, лабіум, мова, мовний сигнал, мовотворення, музика, музична акустика, музична шкала, музичний інтервал, напівтон, оркестр, перехідний процес, регістр, резонатор, рівномірно темперована шкала, стандартна висота тону, спів, співочий, струнний, струна, саксофон, тарілка, тембр, тон, тремоло, тростина, труба, фонація, фонема, форманта, фортепіано, хордофон, щипок.

4.1 Основи музичної акустики

Музична акустика є одним з напрямків акустики і вивчає увесь комплекс проблем, пов'язаних зі створенням звуків, які використовують в музиці і співі; передаванням їх до слухача і їх слуховим сприйняттям.

Сучасна музична акустика являє собою в широкому сенсі слова синтез різних напрямків науки і техніки: акустики мови і співу, акустики музичних інструментів (в тому числі електронних); електроакустики (також систем звукозапису, звукопередавання і звуковідтворення); архітектурної акустики (в тому числі акустики концертних залів, театрів, студій тощо, а також техніки звукопідсилення й озвучення в них); психоакустики тощо [6].

З огляду на те, що сучасні комп'ютерні технології відкрили принципово нові можливості в розвитку музичної акустики, вона все більше заглиблюється в рішення таких проблем як: розшифровування «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, інструментознавства.

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 послуговує 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.

Музична акустика є основою базової природничо-наукової освіти звукорежисерів.

4.1.1. Музичні шкали і інтервали. Стандартна висота тону

Як наведено в попередніх розділах, слуховий апарат сприймає звук в широкому діапазоні частот від 20 Гц до 20000 Гц. Диференційні пороги слуху (дискретність слуху) складають $\Delta f/f$ = 0,3%. В межах чутного діапазону слухова система розрізняє за висотою приблизно 620 градацій, однак різні культури використовують для створення музики тільки обмежений дискретний набір звуків, званий музичними шкалами [9].

Музична шкала (звукоряд) - сукупність звуків будь-якої системи, розташованих в певному порядку (зазвичай в поступово висхідному).

Процес оброблення звуків в слуховий системі має певну інерційність (для розпізнавання висоти потрібно приблизно (15…60) мс, тембру 200 мс).

Мозку легше обробляти, ідентифікувати і зберігати в пам'яті мелодію, що складена з часової послідовності дискретних висот, які знаходяться в певних співвідношеннях одна з одною [9].

Оброблення, ідентифікація і збереження ковзної послідовності тонів вимагали б більше інформаційних ресурсів, ніж дискретна послідовність.

Наступна принципова причина використання обмеженого числа тонів полягає в фізичних можливостях музичних інструментів, де як вібратор використовують тіла, що мають дискретний набір резонансних частот, - струни, труби духових інструментів тощо.

Відбір звуків для побудова музичних шкал (тобто конкретна сітка частот використовувана в кожній музичній культурі) унікальний, він залежить, від традицій, досвіду тощо, але психоакустична основа відчуття консонансу (узгодження) і дисонансу (неузгодження) приблизно однакова, і саме вона становить базову основу відбору тонів для побудови музичних шкал.

Тональна музика вимагає для побудови мелодії і гармонії звуків з чітко-ідентифікованої висотою. Для цього звук повинен мати виражену періодичну структуру, інакше слухова система не зможе ідентифікувати його висоту. Саме з цієї причини в більшості музичні інструментів використовують вібратори (струни, стовпи повітря, бруски тощо), резонансні частоти яких знаходяться в цілочисельних співвідношеннях, тобто в їх спектрі всі обертони є гармоніками.

Кожен музичний тон являє собою одночасно звучний акорд, який містить основну частоту і всі вищі гармоніки. Число збуджуваних гармонік нескінченно велике, але, по-перше, амплітуди їх швидко зменшуються, по-друге, тільки обмежене число гармонік потрапляє в чутний діапазон до 16…20 кГц; по-третє, особливості оброблення звуку на базилярній мембрани показують, що реальне значення для сприйняття тембру мають тільки перші п'ятнадцять-сімнадцять гармонік. Фізична будова багатьох музичних інструментів дозволяє відтворювати тільки кілька перших гармонік зі значними амплітудами, а решта швидко згасають - наприклад, у флейти, туби тощо.

Відношення частоти другої гармоніки до першої дорівнює 2:1, цей інтервал дорівнює октаві, до другої 3:2 (квінта), 4:3 кварта, 5:4 - велика терція, 6:5 -мала терція, 7:6 - вузька мала терція, 8:7 - широка велика секунда, 9:8 - велика цілий тон, 10:9 - малий (мінорний) цілий тон.

Відношення частот для інтервалів між несуміжними гармоніками в цьому ряду також наведено на рис. 4.1 [9]: наприклад, музичний інтервал між четвертою гармонікою і першою становить 4:1 - дві октави, між дев'ятою і шостою 9:6 – квінта тощо. Музичні інтервали з таким відношенням частот називають «чистими».

Відношення частот, що відповідає кожному інтервалу називають його інтервальним коефіцієнтом.

За інтервальними коефіцієнтами можна знайти будь-які музичні інтервали, що являють собою комбінації вищевказаних.

При цьому слід виконувати таке правило: щоб скласти два інтервали, треба помножити їх інтервальні коефіцієнти, а щоб відняти один з іншого, треба розділити їх інтервальні коефіцієнти.

Наприклад, два музичних інтервали - квінта і кварта - в сумі дають октаву; значить, їх інтервальні коефіцієнти знаходяться в таких пропорціях $(4:3)\cdot(3:2) = 2:1$.

Для того, щоб знайти інтервальний коефіцієнт великої сексти, треба врахувати, що вона виходить відніманням з октави малої терції - значить, її інтервальний коефіцієнт дорівнює $(2:1)\cdot(6:5) = 5:3$.

Використання логарифмічного представлення частоти дає можливість надати рівну відстань тим інтервалам на частотній шкалі, які слухом сприймають як однакові. Наприклад, октави в нижній частині діапазону з відношенням частот (100:200) Гц у верхній частині діапазону з відношенням частот (1000:2000) Гц на лінійній шкалі відрізняють відносно частот в десять разів, а за логарифмічною шкалою інтервал у одну октаву відповідає однаковій відстані в будь-якій частині діапазону. Множення (ділення) відстані за логарифмічною шкалою у 2:1 рази відповідає збільшенню (зменшенню) музичного інтервалу на октаву, множення на 3:2

еквівалентного збільшення інтервалу на квінту тощо.

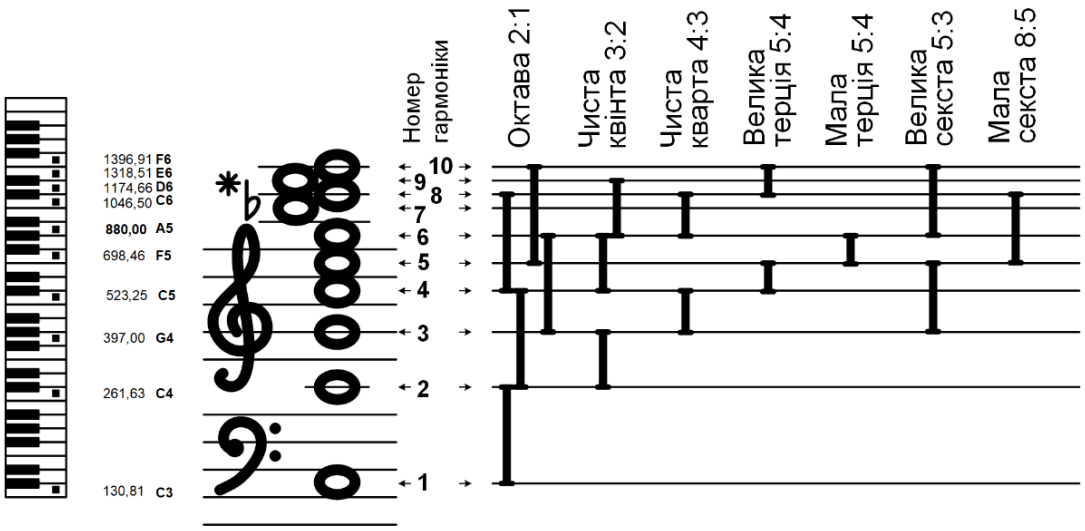


Рис. 4.1. Інтервальні коефіцієнти і музичні інтервали між першими десятьма гармоніками для ноти С3 (130,8 Гц)

Оскільки висоту тону сприймають пропорційно логарифму частоти (закон Вебера Фехнера), то і музичні інтервали сприймають відповідно їх відстаням за логарифмічною шкалою частот.

Таким чином, логарифмічне представлення інтервалів на шкалі частот відповідає слуховому механізму в разі аналізу висоти музичного тону.

Користуючись цими закономірностями, завжди можна визначити, скільки октав (так само як і інших інтервалів) містить діапазон з будь-яким співвідношенням частот. Якщо інтервальний коефіцієнт заданого діапазону

$$S = f_в / f_н,$$

то щоб визначити, скільки n октав він охоплює, треба помножити інтервальні коефіцієнти октав (n) раз (2:1)(2:1)(2:1) ... = S або $2^n = S$; звідси, якщо взяти логарифм від обох частин цієї рівності, вийде

$$\lg S = n \lg 2 \quad \text{або} \quad n = 3{,}322 \lg f_в / f_н.$$

Музичні інтервали між гармоніками зменшуються в міру збільшення їх номера в таких пропорціях: 2:1>3:2>4:3>5:4>6:5 тощо. У міру розвитку гармонії в європейській музиці відбувалося введення інтервалів, які подалі зменшуються між зростаючими за номером гармоніками [5].

Однією з поширених шкал виявилася пентатоніка, що має дуже широке поширення в музиці Японії, Китаю і в європейській народній музиці, її також широко використовували в Греції і ранніх григоріанських піснеспівах. Шкалу складено з п'яти тонів, наприклад, C-D-E-G-A (хоча є й інші її варіанти).

У європейській культурі застосовували діатонічну шкалу, побудовану на п'яти цілих тонах і двох напівтонах. Її варіанти (мажорний і мінорний) використовують у європейській музиці більше трьохсот років. Композитори XIX-XX століть почали більш активно вводити принципи композиції, засновані на більш складній хроматичній шкалі, що складено з дванадцяти півтонів в октаві.

Нарешті, в XX столітті, особливо в зв'язку з можливостями комп'ютерних технологій, використовують мікротонові шкали з інтервалами менше напівтону (наприклад, чвертьтонова шкала). Таким чином, пошуки нових варіантів шкал для музичних композицій весь час тривають.

Рівномірно темперована шкала. Рівномірно темперовану шкалу називають темперованою тому, що вона містить послідовність тонів з математично строго визначеними

частотними співвідношеннями (temperare - впорядковувати, приводити в порядок). Різновиди цієї шкали, що відрізняються послідовністю розташування цілих тонів і півтонів, називають ладами [9].

Для того щоб можна було транспонувати мелодію зі збереженням звуковисотних співвідношень (наприклад, на октаву або інший інтервал вгору або униз), потрібно створити шкалу, в якій всі інтервальні коефіцієнти були б однакові, незалежно від того, де інтервали розташовано на шкалі. Для цього було запропоновано Піфагорову шкалу поділити на 12 рівних частин і на кожну з цих частин зменшити всі дванадцять квінт, при цьому кожну квінту скорочено на 1/108 тону. Такі дванадцять квінт дадуть у сумі точно сім октав, при цьому співпадуть енгармонічно однакові звуки (дієз і бемоль). Оскільки цілий тон виходить внаслідок двох квінтових переходів, то, зменшивши кожен цілий тон на 1/54, в октаві вдається отримати точно шість цілих тонів. Напівтони хроматичні і діатонічні при цьому збігаються, і в октаві міститься точно дванадцять напівтонів.

Таким чином, щоб отримати інтервал, рівний октаві, треба скласти дванадцять інтервалів, рівних напівтону. Як вже було сказано вище, в раз додавання інтервалів їх інтервальні коефіцієнти перемножують. Якщо позначити інтервальний коефіцієнт (тобто, відношення частот) напівтону як *S*, то для отримання октави треба помножити їх один на одного дванадцять разів: $S \times S \times S \times ... = S^{12}$. Оскільки інтервальний коефіцієнт октави дорівнює 2:1, то $S^{12}=2$ і звідси

$$S = \sqrt[12]{2} = 1{,}0595.$$

Значить, інтервальний коефіцієнт напівтону в темперованій шкалі завжди дорівнює 1,0595.

Наприклад, якщо нота ля (А4) має частоту 440 Гц, то нота ля-дієз має частоту 440×1,0595 = 466,18 Гц. Щоб в рівномірно темперованій шкалі отримати значення частоти для будь-якої ноти, треба, взявши за основу значення частоти будь-якої ноти, наприклад, до (С4) = 261,6 Гц, помножити його на *S* стільки раз, на скільки напівтонів відрізняється дана нота від С4. Значення частот для всіх нот рівномірно темперованої шкали наведено на рис. 1.7.

Для більш дрібного поділу інтервалів в темперованій шкалі використовують поняття цент; при цьому кожен напівтон ділять на 100 центів. В цьому випадку інтервальний коефіцієнт цента *C* визначають таким чином: $C \times C \times C \times ... = C^{100} = S$, тобто $C = \sqrt[100]{1.0595} = 1{,}000578$.

Отже, інтервальний коефіцієнт цента в рівномірно темперованій шкалі дорівнює 1,000578.

Аналогічно тому, як це вище було зроблено для визначення кількості октав в будь-якому інтервалі частот, можна визначити, скільки центів міститься в інтервалі з заданим інтервальним коефіцієнтом $r = f_в(\text{Гц}) / f_н(\text{Гц})$. Для цього треба помножити інтервальні коефіцієнти всіх центів, з яких його складено, тобто, $C \times C \times C \times ... = C^n$, і прирівняти їх до заданого інтервального коефіцієнту $r = C^n$.

У рівномірно темперованій шкалі октаву складено з 12 напівтонів і, отже, 1200 центів, квінта - з 7 напівтонів і 700 центів, кварта з 5 напівтонів і 500 центів тощо. Якщо обчислити звідси інтервальні коефіцієнти для цих інтервалів за вищевказаною формулою, то вийде, що інтервальний коефіцієнт квінти дорівнює 1,498, кварти - 1,335 тощо.

Інтервальні коефіцієнти і кількість центів для основних музичних інтервалів у всіх трьох наведених вище музичних шкалах зведено у таблицю 4.1, за якою зроблено висновок, що темперована шкала не забезпечує жодного (крім октави) чистого інтервалу - ні квінти (3/2), ні кварти (4/3), ні терції (5/4) тощо.

Порівняння їх з таблиці 4.1 доводить, що в рівномірно темперованій шкалі відхилення квінти від точного настроювання - 2 цента, кварти - 2 цента, мажорної терції - 4 центи тощо. Слід зазначити, що хоча відхилення ці невеликі, все ж інтервали стають трохи більш дисонансні.

Однак ця шкала має «настроювання (лад) замкнуте і енгармонічне, дозволяє транспонувати мелодію, складається з інтервалів, цілком прийнятних для слуху як при мелодійному, так і при гармонійному відтворенні, має в кожній октаві тільки дванадцять звуків, і тому вимагає достатньо простої конструкції інструментів».

Стандартна висота тону. Для настроювання інструментів в ансамблі вже давно була

очевидна необхідність мати універсальний стандарт висоти тону. Ще у 1619 р. Преторіус (Praitorius) запропонував використовувати як еталонну висоту тону звук з частотою 422,5 Гц.

У 1812 р. в Паризькій консерваторії була запропонована як еталонна частота 440 Гц, протягом XIX століття цю частоту стали досить широко використовувати для налаштування інструментів, хоча були спроби використовувати і більш високі частоти: наприклад, для роялів «Стейнвей» - 454 Гц, в оперному театрі Ковент Гарден - 450 Гц тощо.

У наступні періоди спостерігалося прагнення підвищити стандартну частоту настроювання - мабуть, у зв'язку з розширенням використання в оркестрі мідних інструментів, які яскравіше звучать за більш високого налаштування. У 1939 р. міжнародна конференція в Лондоні прийняла стандарт частоти для тону А4 рівним 440 Гц. Цей стандарт є міжнародним еталоном до теперішнього часу (хоча слід зазначити, що спроби підвищити стандартну частоту весь час тривають як для налаштування роялів до 444 Гц, так і під час налаштування оркестрів, особливо духових до 454 Гц) [6].

Таблиця 4.1. Інтервальні коефіцієнти і кількість центів для основних музичних інтервалів

Інтервал	Рівномірно темперована шкала		Чиста шкала		Шкала Піфагора	
	Відношення частот	Центи	Відношення частот	Центи	Відношення частот	Центи
Октава	2,000	1200	2/1 = 2,000	1200	2,000	1200
Квінта	1,498	700	3/2 = 1,500	702	1,500	702
Кварта	1,335	500	4/3 = 1,333	498	1,333	498
Велика терція	1,260	400	5/4 =1,250	386	1,265	408
Мала терція	1,189	300	6/5 = 1,200	316	1,184	294
Велика секста	1,682	900	5/3 = 1,667	884	1,687	906
Мала секста	1,587	800	8/5 = 1,600	814	1,580	792

4.1.2. Деякі закономірності сприйняття музичних і мовних сигналів

Як вже зазначено вище, у психоакустиці намагаються дослідити і пояснити, як слухова система з фізичних параметрів (зміни інтенсивності у часі), що надійшли на два приймача слуху звукових сигналів, отримує інформацію щодо таких слухових ознак як висота, гучність, тембр тощо, і за ними будує тривимірний звуковий образ, здійснює локалізацію звукового джерела, розпізнає тембр окремих інструментів і голосу.

Людина має унікальну властивість сприйняття і декодування абсолютно особливої і дуже складної форми звукової інформації - музики й мови. Хоча музика є деяка упорядкована у часі і просторі послідовність тональних звуків, охарактеризувати сприйняття музики як послідовності звуків, що мають певні фізичні параметри і відповідні їм слухові характеристики, мабуть, не можна. В разі сприйняття музики і мови мозок сприймає щось більше, ніж просту послідовність звуків. Швидше їх сприймають як послідовності психологічно взаємопов'язаних тонів, організованих у вигляді особливих груп (патернів), що мають ритмічну і мелодійну структуру. Закономірності створення і сприйняття таких мелодійних (і мовних) структур вивчає когнітивна психологія, музична психологія та психолінгвістика.

В основу сприйняття цілісних мелодійних чи мовних структур (мелодій, слів, фраз) покладено деякі загальні принципи розпізнавання слухових образів. Сучасна психологія використовує різні підходи до їх поясненню. Найбільш поширеними в разі сприйняття музики і мови є принципи гештальт-психології (нім. Gestallt - образ), яка дає змогу вважати, що для сприйняття, поділу та розпізнавання звукової інформації, яка приходить до слухової системи від різних джерел у один і той же час (гра оркестру, розмова багатьох співрозмовників та ін.), слухова система (як і зорова) використовує деякі загальні принципи [10]:

- сегрегація (угруповання) - поділ на звукові потоки, тобто, суб'єктивне виділення певної групи звукових джерел (наприклад, при музичній поліфонії слух може відслідковувати розвиток мелодії у окремих інструментів);

- подібність (схожість) - звуки, схожі за тембром, групуються разом і приписуються одному джерелу (наприклад, звуки мови з близькою висотою основного тону і схожим тембром визначаються як такі, що належать одному співрозмовнику);

- близькість - звуки, близько розташовані за часом і в просторі, об'єднуються (наприклад, в музиці звуки, що надходять швидко один за іншим сприймаються як частина однієї музичної фрази);

- безперервність (замкнутість) - слухова система може інтерполювати звук з єдиного потоку через маскер (наприклад, якщо в мовний (або музичний) потік вставити короткий відрізок шуму, слухова система може «не помітити» його, звуковий потік буде продовжувати сприйматися як безперервний);

- загальна доля - звуки, які стартують і зупиняються, а також змінюються за амплітудою або частотою синхронно (в певних межах), приписуються одному джерелу;

- поєднання «фігура-фон» - так само, як і для зорового сприйняття, в разі сприйняття звукової інформації проявляється тенденція групувати найбільш помітні або важливі звуки як «фігуру», відмінну від решти «фону» (наприклад, в музиці, де мелодія сприймається як «фігура», а акомпанемент як «фон»).

Таким чином, вищі відділи слухової системи виконують угрупування звукової інформації, що надійшла - як послідовну (визначаючи розподіл за часом звукових компонент в рамках одного звукового потоку), так і паралельну (виділяючи частотні компоненти, що присутні і які змінюються одночасно). Крім того, мозок весь час проводить порівняння звукової інформації, що надійшла з записаними у процесі навчання у нього в пам'яті «звуковими образами» (гештальт-фактор). Порівнюючи поєднання звукових потоків, що надійшли з наявними образами, він або легко ідентифікує їх, якщо вони збігаються з цими образами, або приписує їм якісь особливі властивості в разі неповного збігу (наприклад, призначає віртуальну висоту тону в звучанні дзвонів).

Зрозуміло, роботи по з'ясуванню цих функцій тривають, однак можна вважати чітко встановленим, що висота і тональність у музиці визначає права півкуля, в той час як розуміння і створення мови, так само як аналіз ритму, концентрується в лівій півкулі.

Спеціалізація півкуль має у своїй основі принципову відмінність - зовсім різні способи оброблення ними інформації: послідовний аналіз інформації, як це потрібно для оброблення мови (ліва півкуля), і паралельне оброблення інформації для цілісного аналізу вхідних звукових сигналів (права півкуля). Обидві форми співіснують і кооперуються для оброблення інформації та програмування реакції людини на навколишнє звукове середовище.

Музику розпізнає наш мозок як інтегральний цілісний слуховий образ, тому права кора спеціалізується на обробленні музичних вхідних сигналів, а ліва кора в основному на обробленні вербальних (мовних) повідомлень. Досліди з аналізом електричної активності мозку довели, що коли недосвідчений слухач сприймає мелодію, активність реєструють в основному в правій півкулі, а коли досвідчений музикант концентрується на аналізі короткої тонкої структури тональної послідовності в мелодії, аналітичний процес передається лівій півкулі.

Необхідно підкреслити, що хоча є чітко виражений розподіл функцій між півкулями, мозок будує єдиний звуковий образ навколишнього світу, користуючись інформацією від обох півкуль, які пов'язані між собою десятками мільйонів нервових волокон.

Експерименти довели, що подавання через стереотелефони двох високочастотних звуків з різними частотами призведе до сприймання їх як окремі звукові сигнали; однак якщо ці сигнали промодулювати будь-яким низькочастотним звуком з частотою до 1500 Гц, то обидва сигнали зливаються в єдиний слуховий образ. Отриманий результат свідчить про те, що для бінаурального злиття слухова система використовує низькочастотну обвідну комплексного звуку (його макроструктуру), незважаючи на те, що деталі складових комплексного звуку (його мікроструктура) різні. Бінауральне злиття мови, наприклад, виявляється, коли в одне вухо надходять тільки високочастотні компоненти мовного звуку, а в інше - тільки низькочастотні. Незважаючи на те, що жодне вухо не отримує достатньої інформації для розпізнавання мовного сигналу, що отримується в результаті бінаурального злиття, слуховий образ дозволяє зрозуміти

мову.

4.1.3. Тембр

Тембр (timbre) означає «якість тону», «забарвлення тону» («tone quality»). В американському стандарті ANSI-S3.20 наведено таке визначення: «Тембр - атрибут слухового сприйняття, що дозволяє слухачеві визначити, що два звуки, що мають однакову висоту і гучність, відрізняються один від одного».

У працях Гельмгольца (1877 р.) зроблено такий висновок: «різниця в музичній якості тону (тембрі) залежить тільки від присутності і сили парціальних тонів (обертонів) і не залежить від різниці фаз, з якої ці парціальні тони вступають в композицію». Це формулювання на багато років (майже на сто років) визначило напрямок досліджень в області сприйняття тембру і зазнала суттєвих змін і уточнення тільки в останні десятиліття.

У 1960-і роки встановлено, що тембр є багаторозмірним об'єктом сприйняття і залежить від загальної динамічної обертонової структури звуку, яка видозмінюється зі зміною гучності і висоти тону. У 1973 р. до визначення тембру, яке зазначено у стандарті ANSI, було зроблено наступне додавання: «Тембр залежить від спектра сигналу, але він також залежить від форми хвилі звукового тиску, розташування частот в спектрі і часових характеристик звуку» [10].

Тільки у 1976 р. в роботах Р. Пломпа доведено, що вухо не страждає «фазовою глухотою» і сприйняття тембру залежить як від амплітудного спектра (в першу чергу від форми спектральної обвідної), так і від фазового спектра. У 1990-тих роках визначено, що тембр є суб'єктивним атрибутом того чи іншого джерела (наприклад, голосу, музичного інструменту), який дозволяє виділити його з різних звукових потоків.

Тембр залежить, перш за все, від спектра музичного або мовного сигналу. Для побудови зазначених спектрів в стаціонарній частині рівнеграми виділяють певний відрізок за часом і проводять розрахунок усередненого спектра на даному відрізку. Такі стаціонарні спектри мають індивідуальні риси, характерні для кожного музичного інструменту, і залежать від механізму звукоутворення в ньому.

У флейти використовують як резонатор відкриту з двох кінців циліндричну трубу і тому в її спектрі містяться всі парні і непарні гармоніки, при цьому амплітуда гармонік швидко зменшується з частотою. У кларнета використовують циліндричний резонатор, закритий з одного кінця, тому в його спектрі присутні в основному непарні гармоніки. У мідних інструментів, наприклад у труби, в спектрі багато високочастотних гармонік. Відповідно тембр звучання у всіх цих інструментів зовсім різний: у флейти - м'який, ніжний; у кларнета - глухуватий; у труби - яскравий, різкий.

Аналіз загальної структури спектрів різних інструментів дозволяє зробити деякі висновки:

- за відсутності або нестачі обертонів (особливо у нижньому регістрі) тембр звуку стає нудний, порожній, прикладом є синусоїдний сигнал від генератора);
- присутність у спектрі перших п'яти-семи гармонік з досить великою амплітудою надає тембру повноту і соковитість;
- ослаблення перших гармонік і підсилення (за амплітудою) вищих гармонік

(від 6-7 і вище) надає тембру різкість та скрипучість.

Аналіз обвідної амплітудного спектра для різних музичних інструментів дозволив встановити: плавний підйом обвідної (тобто, збільшення амплітуд певної групи обертонів) у смузі (200-700) Гц дає можливість отримати відтінки соковитості, глибини; підйом у смузі (2500-3000) Гц надає тембру польотність, дзвінкість; підйом у смузі (3000-4000) Гц надає різкість, пронизливість тощо [10].

Наявність формантних частотних діапазонів (тобто, підкреслених обертонів) істотно впливає на сприйняття тембру музичних інструментів і співочого голосу.

Тембр звучання музики й мови змінюється залежно від зміни гучності і від транспонування мелодії за висотою: в разі зміни гучності звуку сприйняття тембру змінюється - по-перше, тому, що при збільшенні амплітуди коливань вібраторів різних музичних інструментів (струн, мембран, дек тощо) починають проявлятися нелінійні ефекти і це призводить до збагачення спектру додатковими обертонами, по-друге, тому, що зі збільшенням рівня гучності змінюється чутливість слухової системи до сприйняття низьких і високих частот (криві однакової гучності). Тому у разі підвищення гучності (до 90-92 дБ) тембр стає повніше, багатше, ніж при тихих звуках (при подальшому збільшенні гучності починають позначатися сильні спотворення у джерелах звуку і слуховій системі, що призводить до погіршення тембру).

Транспонування мелодії за висотою також змінює тембр, що відчувають: по-перше, тому, що збіднюється склад спектра, частина обертонів потрапляє в високочастотний діапазон вище 15-20 кГц; по-друге, тому, що в області високих частот пороги слуху значно підвищено і високочастотні обертони стають нечутними.

4.1.4. Перехідні процеси

Кожен музичний інструмент (включно з голосом) має особливу систему звукоутворення, яка диктує свою часову структуру сигналу і його динаміку зміни. Порівняння часової структури звуку у різних інструментів показує їх принципові відмінності; зокрема, як було сказано вище, тривалість всіх трьох частин звучання (атаки, стаціонарної частини і спаду) у всіх інструментів різниться за тривалістю і за формою. Крім того у кожного інструменту принципово відрізняється форма часової обвідної.

Тривалість усіх трьох частин звучання (атаки, стаціонарної частини і спаду) для кожного інструменту різна.

Перехідні процеси, що визначають часові параметри інструментів, зокрема, процеси атаки і спаду звуку, дуже відрізняються у кожної групи інструментів залежно від їх конструктивних особливостей і системи звукодобування. Загальну структуру перехідних процесів для різних типів інструментів наведено на рис. 4.2.

Для струнних щипкових і ударних інструментів (гітара, арфа, рояль тощо) характерно короткий час атаки (10-50) мс, майже повна відсутність стаціонарної частини і тривалий час загасання коливань; в разі застосування демпферів, наприклад, в роялі він може бути істотно зменшений (рис. 4.2,*б*). У струнних смичкових (скрипка, альт, віолончель і ін.) час атаки також короткий (50 мс), але значно більш тривала стаціонарна частина звучання (рис. 4.2,*в*). Органні труби

мають тривалий час атаки до (100-300) мс, тривалу стаціонарний ділянку і досить тривалий спад до (5-6) с. Всі духові інструменти мають дуже короткий час атаки (10-30) мс і дуже короткий спад; нарешті, для ударних інструментів (рис. 4.2,*є*,*ж*) характерні коротка атака (3…10) мс, довгий спад (наприклад, у дзвонів до 50 с) і майже повна відсутність стаціонарної частини; у голосового апарату характер перехідних процесів аналогічний духовим інструментам [6].

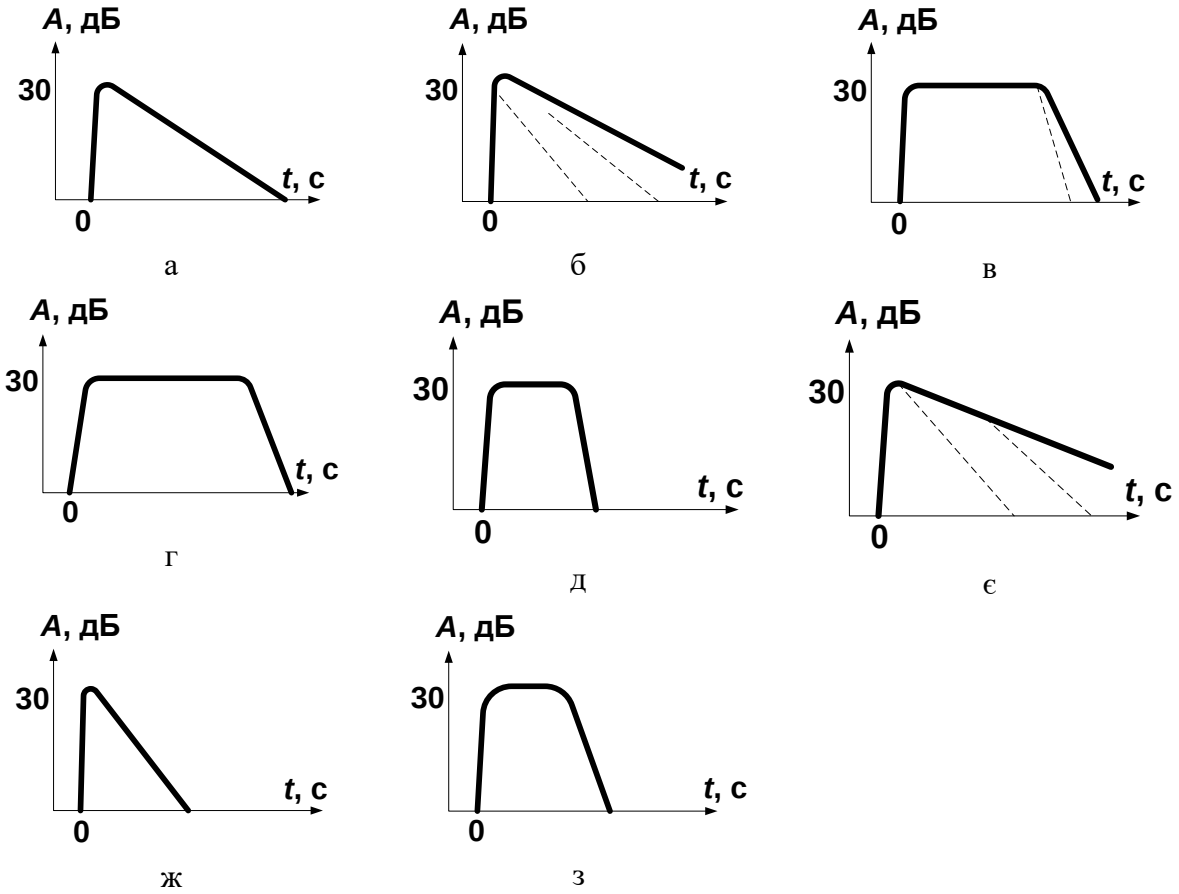


Рис. 4.2. Структура перехідних процесів для різних груп музичних інструментів: щипкові струнні (*а*), ударні струнні (б), смичкові струнні (*в*), органні лабіальні труби (*г*), духові (*д*), ударні (*є*), барабани (*ж*), голосні звуки мови (*з*)

Експерименти довели, що у разі видалення частини часової структури, відповідній атаці звуку, або зміни місцями атаки і спаду (програти в зворотному напрямку), або атаку від одного інструмента замінити на атаку від іншого, то тембр даного інструменту впізнати стає практично неможливим. Отже, для розпізнавання тембру принципово важливими елементами є не тільки стаціонарна частина (усереднений спектр якої є основою класичної теорії тембру), але і період формування часової структури звуку (атака) і період його загасання (спад).

Під час прослуховування музики і мови у будь-якому приміщенні перші відбиття надходять до слухової системи після того, як атака і початкова частина стаціонарної частини вже була почута; у той же час на стаціонарну частину і спад звуку від інструменту накладається реверберaційний процес даного приміщення, що значно маскує звук і природно призводить до модифікації сприйняття його тембру. Хоча слух має певну інерційність, проте час між початком приходу

прямого звуку і моментами надходження перших відбиттів виявляється достатнім, щоб розпізнати тембр звучання окремого інструменту. Мабуть, цією обставиною і визначено інваріантність (стабільність) розпізнання тембру інструментів за різних умов прослуховування.

Процес атаки у більшості музичних інструментів і голосу триває кілька десятків мілісекунд; за цей період часу (іноді з переходом на стаціонарну частину) слух сприймає поступове розширення спектра в часі, оскільки надходять все нові обертони з різною швидкістю і амплітудою. Оскільки цей процес «розгортання» обертонів є характерним для кожного інструменту, настільки він, очевидно, і є одним з головних ознак розпізнавання тембру. На цей процес розпізнавання впливають також багато інших ознак: початковий скрип смичка, початок ноти на мідному інструменті, шум дихання, початкове поплескування язичка та ударний глухий звук молоточка на піаніно, невелика негармонійність обертонів тощо - все це створює живі акустичні ознаки ідентифікації інструменту.

Наприклад, порівняння атаки тону С4 у різних інструментів показує, що процес встановлення коливань у кожного інструменту має свій особливий характер [6]:

- у кларнета домінують непарні гармоніки 1:3:5, причому третя гармоніка з'являється в спектрі на 30 мс пізніше першої, потім поступово «шикуються» вищі гармоніки;
- у гобоя встановлення коливань починається з другої і третьої гармоніки, потім з'являється четверта, і тільки через 8 мс починає з'являтися перша (фундаментальна) гармоніка;
- у флейти спочатку з'являється перша гармоніка, потім тільки через 80 мс поступово вступають всі інші;
- у труби - компактна поява групи вищих гармонік;
- у тромбона першою з'являється друга гармоніка, потім перша і через 10 мс друга і третя;
- у туби і валторни видно концентрація енергії у перших трьох гармоніках, вищі гармоніки практично відсутні.

Аналіз отриманих результатів показує, що процес атаки звуку істотно залежить від фізичної природи звукодобування на цьому інструменті (використання крайових тонів або коливань тростин, одинарних або подвійних тростин, різних форм труб тощо), що визначає кількість гармонік, час їх «вступу», швидкість утворення їх амплітуди, а відповідно, і форму обвідної часової структури звуку.

Таким чином, процес розгортання спектра в період атаки звуку є найважливішим фактором розпізнавання тембру інструменту та його ідентифікації.

Найважливішу роль для розпізнавання інструментів грає динаміка зміни спектральної обвідної в часі на всіх етапах звучання: атаки, стаціонарної частини, спаду.

Питання про те, динаміка зміни яких саме обертонів несе інформацію щодо тембру, пов'язане з існуванням критичних смуг слуху. Основний внесок під час розпізнавання висоти тону надають перші п'ятнадцять - вісімнадцять гармонік, причому більший внесок припадає на перші шість - сім «розгорнутих» гармонік.

Експерименти доводять, що процес надходження саме цих гармонік надає також найбільш істотний вплив на зміну тембру.

Тому в ряді досліджень пропонувалося розмірність тембру вважати рівною п'ятнадцяти - вісімнадцяти і оцінювати його зміну за цією кількістю шкал (це одна з принципових відмінностей тембру від таких характеристик слухового сприйняття як висота або гучність, які можуть бути визначено за шкалами з двох-трьох параметрів).

Відповідно до сучасних поглядів найважливіше значення для сприйняття тембру має зміна розподілу звукової енергії між критичними смугами, тобто, спектральна потужність звукового сигналу. Для оцінки цього параметра введено поняття центроїда спектра, яке визначають як середню точку розподілу спектральної енергії звуку. Зсув центроїда до високих частот відчувають як підвищення «яскравості» тембру звучання.

Істотний вплив розподілу спектральної енергії за частотним діапазоном і динаміки її зміни в часі на суб'єктивне сприйняття тембру пов'язано, ймовірно, з досвідом розпізнавання звуків мови за формантними ознаками, які і несуть інформацію щодо концентрації енергії в різних областях спектру. Зміна тембру в разі зміни гучності виконання і транспонуванні за висотою також супроводжується зсувом центроїда внаслідок зміни кількості обертонів. Нарешті, різниця у сприйнятті тембрів реальних звуків і звуків з «віртуальною висотою» можна пояснити з позицій положення центроїда спектра: оскільки у цих звуків значення частоти основного тону, тобто, висоти, може бути однаковим, а положення центроїда різне через різний склад обертонів, то, відповідно, тембр буде сприйматися по-різному.

Оцінка тембрів різних інструментів завжди носить суб'єктивний (і навіть індивідуальний) характер.

Під час оцінювання висоти тону за вищими («нерозгорнутими») гармоніками з номерами вище 6-7 визначення висоти тону відбувається за їх обвідною, частота якої дорівнює фундаментальній частоті. Якщо всі обертони музичного тону знаходяться в фазі, то періодичність обвідної стає чітко вираженою і зростає точність визначення висоти тону («сила висоти тону»). Якщо фазові співвідношення між гармоніками є випадковими, то хвильова структура сумарного звуку зазнає суттєвих змін і висота тону стає менш визначеною (зменшується сила висоти звуку). Таким чином, якщо фазові співвідношення надають чутний вплив на визначення висоти тону, то можна очікувати, що вони вплинуть і на розпізнавання тембру.

Таким чином, основними фізичними ознаками (встановленими на цей час), за якими визначають тембр звуку і його зміну у часі, є [10]:

- зміна форми спектральної обвідної у часі в усі періоди утворення звуку - протягом атаки, стаціонарної частини і спаду;
- вибудовування амплітуд обертонів в період атаки;
- зміна фазових співвідношень між обертонами від детермінованих до випадкових (зокрема, внаслідок негармонійності обертонів реальних інструментів);
- наявність нерегулярностей спектральної обвідної і положення спектрального

центроїда (тобто, максимуму спектральної енергії), що пов'язано зі сприйняттям формант і їх зміною у часі;

- наявність амплітудної (тремоло) і спектральної (вібрато) модуляції;
- зміна форми спектральної обвідної зі змінами інтенсивності (гучності) звучання;
- наявність додаткових ознак ідентифікації інструменту, наприклад характерний шум смичка, поплескування тростин, скрип гвинтів роялю тощо.

Тембр - один з первинних ознак для сприйняття звуку, основа для його категоризації (розпізнавання), що дає змогу виділити джерело звуку і визначити його фізичну природу.

4.2. Акустика музичних інструментів

Акустика музичних інструментів має дуже довгу історію. Разом з тим, розвиток комп'ютерних технологій дозволив перейти до нового методу створення і синтезу музичних інструментів, а саме до технології комп'ютерних фізичних моделей музичних інструментів. Створення таких моделей змусило застосувати всі сучасні досягнення в теорії коливань, лазерної інтерферометрії тощо до аналізу процесів роботи музичних інструментів і розробці їх адекватних математичних описів. До теперішнього часу створені комп'ютерні моделі таких інструментів як флейта, литаври, тромбон, труба (перелік може типів і видів їх бути значним) Тривають розробки алгоритмів для реалізації фізичних моделей фортепіано, органу тощо [6].

Класичний музичний інструмент можна аналізувати як механіко-акустичний перетворювач.

Склад музичного інструменту містить такі основні елементи:

- генератор (збудник коливань) - система для передавання енергії в звучному тілу і збудження в ньому коливань;
- вібратор (тіло, що звучить - звучне) - основна частина інструменту, в якій збуджують коливання;
- резонатор (підсилювач) - пристрій, призначений для підсилення звуку і його використовують в тих випадках, коли віддача енергії безпосередньо від вібратора в повітряне середовище занадто мала.

У музичних інструментах застосовують три основні категорії вібраторів:

- тіла, пружні в силу своїх природних властивостей (твердості і форми). Вони не вимагають попереднього натягу, щоб здійснювати коливання і випромінювати звук (бруски, стрижні, трубки, пластини, оболонки тощо);
- тіла, що стають пружними внаслідок натягу. Натягування може бути докладено в одному напрямку, наприклад для струн, а може бути докладено по периметру, наприклад для круглих мембран барабанів. Від ступеня натягування залежить пружність цих тіл, а отже, і власні частоти їх коливань, тобто, склад спектра;
- тіла, що стають пружними внаслідок процесу стиснення (наприклад, стовпи повітря, укладені в труби різного перерізу).

Основні способи збудження коливань вібраторів, тобто, генерації енергії,

можна звести до таких:

- удар (поштовх) - миттєве додавання сили і передавання енергії звучному тілу з подальшим наданням йому свободи коливань. В разі такого режиму збудження вібратор здійснює вільні згасні коливання, тому що відбувається передавання енергії на випромінювання і внутрішнє тертя (наприклад, в струнах рояля, дзвонах тощо);

Особливий вид збудження відбувається завдяки передаванню енергії послідовними поштовхами, наприклад для стовпів повітря в трубах, що створює автоколивальний процес, який забезпечує звучання духових інструментів;

- щипок, або зчеплення - це спосіб, в разі якого звучне тіло зачіпають будь-яким предметом (або пальцем), виводять з положення рівноваги і звільняють (наприклад, струна гітари, арфи, лютні, клавесина тощо), після чого воно переходить в режим вільних згасних коливань;

- тертя - при цьому способі збуджувальне тіло (наприклад, смичок) залишають в щільному контакті з вібратором (струною) внаслідок тертя протягом певного періоду часу, після чого відбувається відрив вібратора, далі цей процес періодично повторюють (наприклад, для збудження струн скрипки чи контрабасу).

Як підсилювачі-резонатори можуть використовувати резонатори, що забезпечують ефективне випромінювання звуку в навколишній простір, наприклад, внаслідок великої площі (деки рояля), або спеціальних корпусів з зосередженим в них повітряним об‘ємом (у скрипки, гітари тощо), або системи резонансних труб (наприклад, в маримбі).

Потрібно зазначити, що в музичних інструментах, які настроюють як вібратори і резонатори, можуть використовувати тільки ті тіла, які здатні здійснювати періодичні коливання, тобто, тіла, власні частоти яких складають дискретний гармонійний спектр.

Класифікація музичних інструментів може бути виконана за різними критеріями (хоча далеко не всі інструменти можуть бути чітко класифіковані) [6]:

за типами вібраторів:

- хордофони (струнні), в яких як вібратор використовують струни різних розмірів, діаметрів, щільності і ступеня натягу (роялі, арфи, гітари, скрипки тощо);

- мембранофони, в яких звук утворено в разі збудження натягнутої мембрани (барабани, литаври тощо);

- ідіофони, де звук створено внаслідок збудження коливань в тілах, що мають власну пружність: брусках (ксилофон, маримба тощо), трубках (оркестрові дзвіночки), пластинках (тарілки), оболонках (дзвони) тощо;

- аерофони - духові інструменти, які використовують для збудження і підтримки звуку коливання повітряних стовпів.

Виконавська класифікація виділяє зазвичай такі групи інструментів: духові, струнні та ударні (рис. 4.3). Ці групи в свою чергу поділяють на підгрупи залежно від способу збудження: духові - на лабіальні, тростинові і амбушурні (крім того, духові ще традиційно поділяють на мідні та дерев'яні); струнні - на щипкові, смичкові і клавішні; ударні - на мембранні і пластинкові тощо.

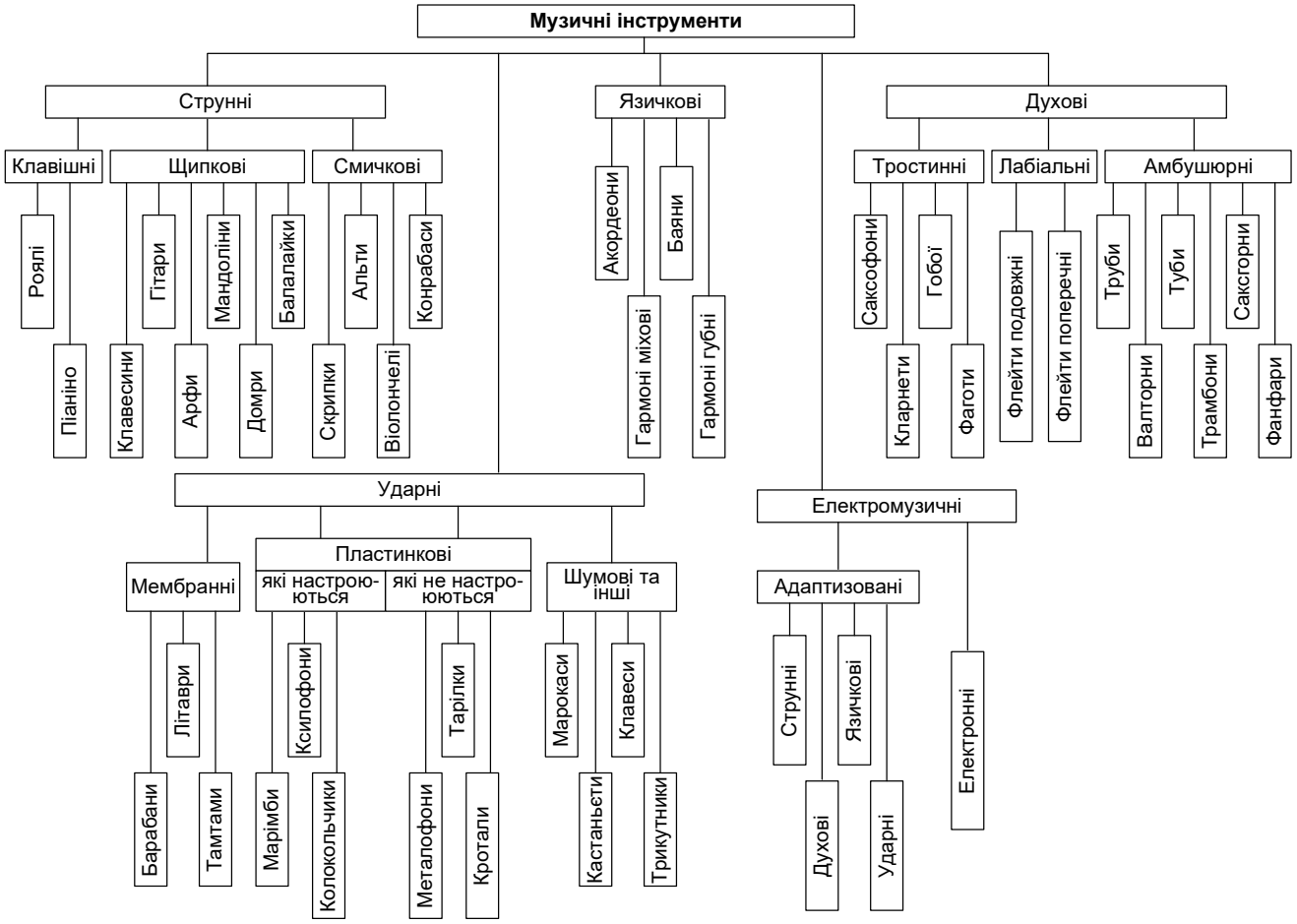


Рис. 4.3. Класифікація музичних інструментів

4.2.1. Духові музичні інструменти

Духовими музичними інструментами (або аерофонами) називають клас інструментів, у яких джерелом звуку служать коливання повітряного стовпа.

Для того щоб з духового інструмента можна було видобувати музичні звуки, треба підводити до нього енергію протягом відповідного часу у вигляді стиснутого повітря (в формі ритмічних імпульсів) - тоді, за певних умов, в об'ємі повітря, що наповнює духовий інструмент, виникає тривалий автоколивальний процес.

Форма об'єму повітря, укладеного в порожнині духового інструмента, дуже впливає на тембр звуку. У результаті багатовікового досвіду людина відібрала для використання в музичних інструментах подовжені труби різного перерізу: циліндричні, конічні, експоненціальні, призматичні.

Процес звукоутворення в духових інструментах характеризують тим, що коливання збуджують і підтримують в подовжених стовпах повітря всередині труб різного перерізу (резонаторах) в результаті автоколивального процесу, в разі тривалого імпульсного підведення енергії внаслідок модуляції повітряного потоку.

Спосіб модуляції (переривання) струменя повітря у всіх духових інструментів різниться, за цією ознакою їх може бути розподілено на такі групи [6]:

- лабіальні (airreed): до цього класу інструментів відносять флейти (поздовжні і поперечні), органні труби (деяких видів), різного роду свистки тощо. В цих інструментах збудження звуку відбувається в результаті тертя о край твердого тіла

(лабіуму) повітряного струменя, що рухається з досить великою швидкістю, і його коливань відносно цього краю (що частково збігається з процесами, що створюються під час свисту, тому іноді ці інструменти називають свистячими);

- тростинові (mechanical reed): з одинарної тростиною (single mechanical reed) - кларнет, саксофон, язичкові труби органу; з подвійною тростиною (double mechanical reed) - гобой, фагот тощо. У цих інструментах для модуляції використовують вібратор з подовженої пластинки - трості, закріпленої на одному кінці і вільної на іншому.

Лабіальні і тростинові інструменти традиційно відносять до групи дерев'яних (woodwind), хоча більшість з них виготовляють з інших матеріалів (наприклад, саксофони і поперечні флейти зазвичай роблять металевими);

- амбушурні (lipreed): це інструменти з воронкоподібними мундштуками - валторна, труба, тромбон, туба, саксгорн, корнет тощо. В цих інструментах вібратором є особливим чином складені губи (франц. Embouchure), прикладені до мундштука. Під час продування повітря розсовує щілину між губами, приводячи їх у коливання, в результаті відбувається періодичне збільшення або зменшення її площі і модуляція повітряного струменя.

Амбушурні інструменти називають мідними (brasswind), тому що для їх виготовлення використовують в основному латунь (сплав міді та цинку).

Крім зазначених груп інструментів, що входять до складу симфонічного оркестру, є безліч народних духових інструментів різних культур, які важко класифікувати.

Особливу групу складають духові язичкові інструменти з камерами змінного об'єму (акордеони, баяни, гармонії), постійного об‘єму (фісгармонії) і без камер (губні гармонії)

Тростинові духові музичні інструменти - кларнет, гобой, фагот, саксофон (рис. 4.4).

У системі звукоутворення в інструментах цього типу як генератор енергії використовують дихальну систему музиканта, в якій внаслідок роботи м'язів створено певну енергію стисненого повітря; вібратором в цій групі інструментів є пластинка, що коливається, – тростина; резонатором є закриті циліндричні або конічні труби, процес коливання повітряного стовпа в яких має деякі відмінності від такого у відкритих циліндричних трубах, які використовують в лабіальних музичних інструментах. Тростинові інструменти класифікують таким чином:

- з циліндричною трубою з одинарної тростиною - кларнет, деякі язичкові труби органу;

- з конічною трубою з подвійною тростиною - гобой, фагот;

- з конічною трубою і одинарної тростиною - саксофон.

Механізм збудження тростин: тростина є тонкою пружною пластинкою, що закріплена в мундштуці з однієї сторони. Під час продування струменем повітря через мундштук і, відповідно, повз тростину, вільна частина тростини починає коливатися.

В разі коливання вільного кінця пластинки відбувається модуляція повітряного струменя з певною частотою, тобто, відбувається зміни швидкості повітряного потоку, що і служить причиною коливань стовпа повітря в трубі.



а б в

Рис. 4.4. Вигляд кларнету (*а*), саксофонів: сопрано (*б*) та тенор (*в*)

Товщина, матеріал та форма тростин впливають на тембр інструмента, його динамічний діапазон і висоту тону, тому велику увагу приділяють вибору їх параметрів. Тростини бувають двох видів: що б'ють і вільні. Тростини, що б'ють, мають площу більше площі отвору, тобто, вони закривають його повністю. Під час коливань тростина може ударяти по твердій поверхні мундштука, тому звук у інструментів виходить різкий, гострий (такі тростини використовують в кларнеті, гобої, фаготі тощо).

Вільні тростини мають площу менше отвору, тому звук виходить більш м'який, їх використовують в деяких трубах органу.

За типом застосовуваних матеріалах тростини також поділяють на пластинки: металеві (там, де губи не стикуються з ними, наприклад, для язичкових труб органу) і очеретяні (для інструментів типу кларнета, гобоя тощо), в яких доторканістю губ та язика можна змінювати площу і масу коливальної частини тростини і, отже, її резонансну частоту.

Саксофон конструктивно складено з однотростинового мундштука, підмундштучної трубки, конічної труби з 17…25 бічних і 2 регістрових отворів, з'єднаних автоматичним важільним механізмом, нижньої зігнутої труби (чобітка) і розтруба. Довжина, наприклад, сопрано-саксофона становить 690 мм з діаметром рупора (90…100) мм, кут розкриття 4° [11].

Акустичні параметри саксофона такі:

- частотний діапазон сопрано-саксофона від 207,7 Гц (Ab3) до 1319 Гц (E6), альт-саксофона 138,6 Гц (Db3) … 830,6 Гц (Ab5), баритон на октаву нижче альта, тенор на октаву нижче сопрано. З урахуванням обертонів спектр має діапазон до 10 кГц;

- динамічний діапазон - від 40 дБ на низьких до 20 дБ на високих частотах;

- перехідні процеси - процес наростання короткий (20…30 мс) і відбувається з великим розкидом за часом для різних обертонів, що створює своєрідний тембральний відтінок звучання (рис. 4.2,*д*);

- характеристика спрямованості: ширина діаграми спрямованості рівномірно зменшується з підвищенням частоти, при цьому напрямок осі головної пелюстки

зміщується на 10…15° до високих частот;

- тембр - інструмент має чотири регістра (нижній, середній, верхній, вищий) з різними тембрами: щільний, густий в нижньому; м'який, світлий в середньому; напружений, пронизливий у верхньому.

Труба. Як і всі духові інструменти, їх використовують як генератор енергії стисненого повітря, створену внаслідок мускульних зусиль музиканта. Вібратором є особливим чином складені губи, що коливаються; як резонатор використовують стовп повітря в подовжених трубах. Вигляд труби та інших духових інструментів, в яких як резонатор використовують стовп повітря наведено на рис. 4.5.

В їхній системі звукоутворення є певні відмінності від інших духових інструментів, які полягають в наступному: особливий механізм модуляції потоку повітря завдяки коливання губ; застосування достатньо великих мундштуків складної конструкції; застосування вигнутих циліндричних і конічних вузьких труб; використання вентилів і куліс замість бічних отворів; застосування великих розтрубів як додаткових підсилювачів звуку, а також використання сурдин.



Рис. 4.5. Вигляд труби (*а*), флюгер-горна (*б*), тромбону (*в*), туби (*г*), флейти (*д*)

4.2.2. Струнні інструменти

У всіх струнних інструментах є основні елементи для видобування звуку, такі як генератор - збуджувач коливань, яким м'язову енергію передають рухом смичка, щипка або удару молоточком; вібратор - натягнуті струни інструменту, що коливаються (скріпки, гітари, арфи, роялю тощо); резонатор - підсилювач коливань, наприклад, плоска дека інструмента (рояль) або корпус з деяким об'ємом повітря (гітара, скрипка, арфа тощо) [11].

Класифікацію струнних інструментів зазвичай проводять за способом збудження (генерації) звуку і містить такі основні групи:

- смичкові - скрипки, альти, віолончелі, контрабас, а також народні інструменти (кеманча, басоля, саранги тощо);
- щипкові - гітари, арфи, мандоліни, клавесини і багаточисленні народні інструменти: балалайки, домри, гуслі, бандури тощо;
- ударні (клавішні) - фортепіано.

Незважаючи на наявність загального типу вібраторів (натягнутих струн), ця група охоплює інструменти, що значно відрізняються за способом звуковидобування і за акустичними характеристиками через відмінності в способах генерації і підсилення звуку.

Скрипка. До групи смичкових відносять інструменти, звук в яких збуджено внаслідок тертя, що виникає під час руху смичка по струні. Такий спосіб видобування звуку називають фрикційним. У цю групу входять такі інструменти як скрипка, альт, віолончель, контрабас тощо (рис. 4.6), які вже більше трьох століть є прикрасою симфонічних і камерних оркестрів.

Гітара. Відмінною особливістю всіх інструментів цього типу є збудження струн щипком. Щипок можливо виконувати пальцями (наприклад, в гітарі, арфі), плектром - медіатором (наприклад, в мандоліні, домрі) або спеціальним щипковим механізмом (в клавесині).

Щипкові струнні інструменти поділяють на:

грифові - гітара, мандоліна, бандура, домра, балалайка тощо;

безгрифові - арфа, клавесин, лютня тощо.

Гітару (від грецького kithara - ліра) відносять до сімейства лютневих (рис. 4.7).

У XX столітті гітара стала одним з наймасовіших інструментів на всіх континентах, при цьому поряд з акустичними гітарами широкого поширення набули різні різновиди електрогітар.

Зараз широке поширення мають такі типи акустичних гітар: класичні; фолк-гітари (flattop) з плоскою верхньою декою, сталевими струнами і збільшеним корпусом (на їх основі були створені великі естрадні гітари типу «дредноут» і типу «джамбо»; нарешті, джазові гітари з арочною верхньою декою (archtop), що мають сталеві струни, вигнутий корпус і отвори, схожі на ефи скрипки. Зупинимося детальніше на конструкції класичної гітари.

Класичні гітари можна розподілити: за кількістю струн - на шестиструнні, семиструнні, дванадцятиструнні; за строєм - на прими, терцієві, квартові, квінтові; за застосуванням - на концертні, домашні тощо.



а б в

Рис. 4.6. Вигляд скрипки (*а*), віолончелі (*б*), контрабасу (*в*)



а б в г

Рис. 4.7. Вигляд акустичної гітари (*а*), електрогітари типу Les Poul (*б*), електрогітари типу Stratocaster (*в*), бас електрогітари (*г*)

Конструкція сучасної класичної шестиструнної гітари (рис. 4.7,*а*) містить такі основні її елементи: корпус, що складено з верхньої (1) та нижньої (2) дек і обичайки (3); резонаторний отвір (5) з розеткою (4) і підставка (6) для закріплення струн, розташовані на верхній деці; гриф (10), який складається з шийки з п'ятою і накладки з ладовими пластинами; верхній поріжок (9); головка (8), в якій знаходиться кілковий механізм (7); набір струн [6].

Розміри гітари (максимальна довжина, ширина і висота корпусу) істотно варіюються, наприклад, 1005 мм х 366 мм х 100 мм; 940 мм х 343 мм х 85 мм тощо.

Верхню деку виконують з резонансної ялини товщиною приблизно 2-2,5 мм. Нижню деку і обичайки виготовляють також з резонансної ялини або з таких твердих порід, як палісандр, червоне дерево тощо. Для грифа використовують червоне дерево, кедр, клен, граб; для грифової накладки зазвичай застосовують чорне дерево. Шийку грифа зазвичай склеюють з трьох або п'яти частин цінних порід дерева, причому шари підбирають так, щоб вони лежали в різних напрямках. У деяких конструкціях її виготовляють монолітною. Іноді для більшої жорсткості всередину грифа вставляють металевий стрижень (особливо для гітар типу flattop).

Під нижньою частиною верхньої деки, а також на внутрішній частині нижньої деки встановлюють пружини (ребра жорсткості), з брусків резонансної ялини. Розташування пружин на верхній деці для різних типів гітар може бути різним.

Струни (струнний одяг) гітари (кількістю 6, 7 або 12) можуть бути синтетичними або металевими: класичні гітари мають зазвичай струни синтетичні (нейлон), басові струни іноді роблять з навивкою мідною мішурою. Гітари flattop, archtop мають сталеві струни, при цьому басові струни роблять з навивкою бронзовою або латунною мішурою (часто на них грають плектром).

Налаштування струн залежить від обраного ладу і числа струн гітари. Наприклад, у сучасній класичній концертній шестиструнній гітарі з довжиною робочої частини струни 650 мм настроювання таке: E4 - 329,6 Гц, B3 - 246,92 Гц, G3 - 195,96 Гц, D3 - 146,8 Гц, A2 - 110 Гц, E2 - 82,4 Гц. Натяг для металевих струн 100…170 Н, у синтетичних – 50…80 Н.

Як вже було наведено в розділі 1, частота коливань основного тони струни пов'язана з довжиною струни l і натягом G такими формулами [6]:

$$f_0 = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{G}{l_m}},$$

$$\frac{f_m}{f_0} = \frac{l}{l_{m0}} = 2^{\frac{m}{12}},$$

де m - число ладів (ближній до верхнього поріжка лад має m = 1), l_m - довжина струни від підставки до m-лада, l - робоча довжина вільної струни, f_0 - частота основного тону вільної струни, f_m - необхідна частота коливань струни, притиснутої до m-ладу.

Розміщення ладів на грифі виконують за напівтоном темперованої шкали, тому відношення частот має бути 1,05946 (що приблизно відповідає відношенню 18/17), в зв'язку з цим розбивку роблять за правилом «1/18», тобто, кожен лад повинен бути розташований на 1/18 частини довжини, що залишилася до підставки;

але так як при цьому з'являється арифметична помилка, то роблять деякий зсув положення ладу - замість 1/18 використовують 1 / 17,817. Крім того, внаслідок додаткового натягу струни під час притиснення її до ладу відбувається зміщення частоти налаштування (що особливо помітно для металевих струн). Для компенсації цього підставку зсувають униз на 1-2 мм відносно відстані *d*, яке використовували для розрахунку ладів. Кількість використовуваних ладів залежить від типу гітари: іспанська шестиструнна і семиструнна гітара мають дев'ятнадцять ладів, іноді для двох верхніх струн їх кількість збільшують до 21 і більше.

Процес звукоутворення. Гітара являє собою складну коливальну систему. Енергія механічних коливань щипком передається струнам, що спричинює у них коливання, які через підставку передаються на верхню деку, а через повітряний об‘єм і пружини передаються на нижню деку. Звукове випромінювання верхніх частот відбувається в основному від верхньої деки, а нижніх частот - від нижньої деки і повітряного об‘єму через звуковий отвір.

Коливання струн. Механізм збудження коливань струни в гітарі створюють щипком. За такого способу збудження струну відводять в сторону і відпускають, тобто, в цей момент часу вона має максимальне зміщення від положення рівноваги і нульову швидкість. Під дією сили натягу струна починає рухатися вниз, проходить за інерцією положення рівноваги, зупиняється, потім знову повертається в положення рівноваги - і процес повторюється, тобто, струна періодично коливається аналогічно маятнику.

Для того, щоб підтримувати коливання струни, необхідно регулярно надавати енергію. Для того, щоб визначити спектральний склад таких коливань, необхідно розкласти їх в ряд Фур'є. Амплітуди гармонік залежать від величини і місця прикладання сили впливу: якщо щипок прикладено в центрі струни $p = 1/2$, то коефіцієнти для всіх парних гармонік $n = 2, 4, 6 ...$, дорівнюють нулю. Якщо струну відтягнути в точці p = 1/5 від її довжини, то спектр буде інший, при цьому амплітуди гармонік $n = 5, 10, 15$ дорівнюють нулю, а інші будуть знаходитися в співвідношеннях $A_2/A_1 = 0{,}4$, $A_3/A_1 = 0{,}18$, $A_4/A_1 = 0{,}061$, $A_5/A_1 = 0$ тощо.

Таким чином, спектр коливань гітарної струни (а отже, тембр її звучання) істотно залежить від місця збудження (щипка). Якщо місце збудження збігається з місцем розташування вузла *n* гармоніки, тобто, np дорівнює цілому числу, то ці гармоніки відсутні у спектрі, їх амплітуди дорівнюють нулю. Щоб підкреслити певні гармоніки в спектрі, треба збуджувати струну у тих точках, де ці гармоніки мають пучність, тобто, максимум зміщення.

Крім того, спектр залежить і від способу збудження, якщо щипок виконують пальцем, тобто, місце контакту зі струною має кінцеві розміри, то ті гармоніки, які мають вузли усередині зони контакту в спектрі, не збуджуються, тому чим більше зона контакту у разі збудження, тим менше високих гармонік в створюваному звуці. Тому під час збудження нігтем (або плектром, у якого зона контакту менше) звук більш яскравий і дзвінкий.

Акустичні параметри гітари такі:

- частотний діапазон від 82,4 Гц (E2) до 1046,5 Гц (C6). З урахуванням обертонів спектр має діапазон до 9 кГц. Основні форманти лежать в області 100…140 Гц, 200…280 Гц. Основну енергія спектра зосереджено в діапазоні від

100 Гц до 1 кГц;

- динамічний діапазон - 20 дБ;

- перехідні процеси - процес наростання (атаки) короткий (10…50 мс) тривалий час спаду – (0,2…1) с. Тривалість перехідних процесів залежить від напрямку прикладання сили від струни на підставку;

- характеристика спрямованості: на частотах (100…200) Гц випромінювання ненаправлене, на частоті 367 Гц (мода верхньої деки 1.0) характеристика спрямованості має вид диполя, на частоті 436 Гц - квадропольний і на ВЧ випромінювання зосереджено в передній півплощині.

4.2.3. Фортепіано

Фортепіано (рояль) (рис. 4.8) - це струнний ударний інструмент з застосуванням складного клавішно-молоточкового механізму для збудження струн. Таким чином, фортепіано, з одного боку, належить до групи струнних інструментів (по типу вібратора), з іншого боку, до групи ударних інструментів (за способом генерації коливань); крім того, його відносять до групи клавішних інструментів поряд з органом.

Основним джерелом вібрацій є струни, натягнуті на масивну раму. У великому концертному роялі використовують 240…250 струн (у малих роялях і піаніно 220…230) довжиною приблизно 1,5…2 м в басовому регістрі й до 50 мм у верхньому (дискантному) регістре. Кожній клавіші відповідає різна кількість струн (групу струн, що відповідна одній клавіші, називають 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 необвитих струни (ці співвідношення можуть відрізнятись 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 більше 20 тон [11].

Процес звукодобування полягає в наступному.

Механічна енергія під час удару пальцями виконавця по клавіші (механізм генерації) перетворюється складною системою важелів (клавішного механізму) в рух молоточка, який ударяє по струнах (вібраторах), передаючи їм цю енергію, що призводить до збудження в них коливань; при цьому сам він відлітає назад. Коли піаніст звільняє клавішу, клавішний механізм опускає на струну демпфер; при цьому коливання струни достатньо швидко загасають. Звук безпосередньо від струн слабкий і перестає сприйматися слухом на відстані 3…5 м від інструмента, тому в фортепіано використовують деку (резонатор).

Коливання струн через підставки (штеги) передаються деці, в якій також збуджують коливання. Оскільки дека має відносно велику площу, то звук, що випромінюється нею, забезпечує досить високий рівень акустичної енергії (пропорційний площі випромінювання). Таким чином, дека підсилює звук і модифікує його спектр внаслідок своїх множинних резонансів. Реальний механізм утворення звуку надзвичайно складний і служить предметом численних досліджень, тембр звучання інструмента в значній мірі залежить від фізико-механічних параметрів молоточків.



а б

Рис. 4.8/ Вигляд концертного роялю (*а*), піаніно (*б*)

Загальні процеси звукоутворення в системі клавішний механізм - молоточок - струна - дека носять надзвичайно складний характер. У наш час активно розробляють комп'ютерні фізичні моделі механізмів звукоутворення в фортепіано, тому можливо сподіватися на отримання нових результатів в дослідженні цих процесів.

Акустичні характеристики рояля такі [10].

Частотний діапазон основних тонів фортепіано змінюється від найнижчого тону 27,5 Гц (A0) до найвищого 4186 Гц (C8). У низьких регістрах загальний діапазон з урахуванням обертонів досягає 3 кГц, у верхніх регістрах до 10 кГц і вище.

Спектральний склад звуку істотно різниться за діапазонами: якщо в нижніх регістрах (нижче 100-250 Гц) спектр містить багато обертонів, при цьому амплітуда фундаментальної (основної) частоти нижче, ніж амплітуди перших обертонів, то у разі переходу до більш високих регістрів кількість чутних обертонів у спектрі звуку зменшується, амплітуда основної частоти починає домінувати і тембр істотно змінюється.

Формантні області у спектрі нечітко виражені і знаходяться у області 500…2000 Гц. У спектрі є шумові компоненти, особливо в області 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 55 дБС (на 10 м) і тихий 50 дБА. Зміна гучності робить істотний вплив на зміну спектрального складу звуку і зміну тембру.

Перехідні процеси. У звуках фортепіано переважають в основному нестаціонарні процеси (атаки і спаду), стаціонарна частина звуку дуже коротка

(оскільки після удару молоточком струна і дека знаходяться в режимі згасних коливань). Звук складено з короткої атаки і тривалого спаду. У нижніх регістрах час атаки сягає 20…30 мс, в верхніх – 10…15 мс. Процес загасання коливань значно триваліший і може тривати без демпферів 10 с (час, протягом якого рівень звука зменшується на 60 дБ). Як уже було відзначено вище, демпфери опускаються на струну і припиняють її звучання приблизно через 80…100 мс після відходу молоточка. Швидкість і характер процесу загасання істотно різниться для різних обертонів (високі обертони загасають швидше).

Характеристика спрямованості рояля істотно видозмінюється з підвищенням частоти. На частотах вище 500 Гц починає позначатися екранний вплив кришки рояля. При відкритій кришці максимальний рівень випромінювання зосереджений в кутах між 15° і 35° у вертикальній площині, для високих регістрів кут випромінювання зменшується. Різниця в рівнях випромінювання за відкритої і закритої кришки досягає 5-10 дБ.

Тембр фортепіано має величезні можливості для створення великого тембрального і динамічного різноманіття звучання. Він відрізняється рядом особливостей, обумовлених нестаціонарним характером звуку, сильною залежністю спектрального складу від рівня гучності і висоти тону, наявністю шумових компонентів, а також негармонійністю обертонів в спектрі. Ці особливості використовують в даний час для комп'ютерної ідентифікації інструменту

4.2.4. Ударні інструменти

Ударні інструменти - особлива група музичних інструментів, в яких звук утворюють ударом або близьким до нього рухом.

Класифікацію ударних музичних інструментів здійснюють за різними ознаками, зокрема: за видом застосовуваних у них вібраторів, за типом застосованих матеріалів, за можливістю настроювання їх на певну висоту тону тощо.

Як і у всіх музичних інструментах, у них можна виділити три основні частини: генератор, вібратор і резонатор.

Генератором є м'язова сила музиканта, що передається до вібруючого тіла інструменту за допомогою дерев'яних або металевих молотків, паличок, калатал, рук тощо.

Спосіб збудження, загальний для цієї групи інструментів, - удар, тобто, миттєве додавання сили до інструменту з наступним наданням йому свободи. Такий спосіб передавання енергії призводить до створення звуків з особливою часової структурою: короткий період атаки, практично повна відсутність стаціонарної частини і тривала частина згасних коливань.

Вібратори, які використовують в ударних інструментах, являють собою: струни, мембрани, бруски, стрижні, циліндричні трубки, пластинки, оболонки тощо.

Резонатори - пристрої, які застосовують в деяких ударних інструментах для підсилення звуку, мають форму резонансних трубок (маримба, вібрафон тощо), котлів (литаври) тощо.

Одна з прийнятих класифікацій ударних музичних інструментів за видом вібраторів є такою [6]:

- мембранофони - інструменти, в яких як вібратор використовують тіла, що вимагають натягу (мембрани), - наприклад литаври, барабани тощо,

- ідіофони- інструменти, в яких вібраторами є пружні тіла, які не потребують натягу на відміну від мембран. Інструменти цієї групи поділяють на металофони (в яких вібратори виготовлено з металу) і ксилофони (матеріал вібратора - дерево).

Форма вібраторів також дозволяє класифікувати ідіофони на групи: з вібраторами у формі брусків дерев'яних (ксилофон, маримба тощо) або металевих (вібрафон, челеста, дзвіночки тощо); трубок (трубчасті дзвони); пластинок (тарілки, гонги тощо); оболонок (дзвони).

Крім того, ідіофони поділяють на інструменти: що настроюють за висотою тону - ксилофон, маримба, челеста тощо; що не настроюють за висотою тону - великий барабан, тарілки тощо;

- хордофони - інструменти, в яких як вібратори використовують натягнуті струни. До інструментів цієї групи, тобто, струнним ударним, відноситься фортепіано.

Мембрана барабана - це тіло, яке не має власної жорсткості, а набуває її тільки в разі натягування. Зазвичай це тонкі плівки із шкіри тварин, різних синтетичних полімерних матеріалів тощо. Будучи натягнутою по периметру, така плівка набуває жорсткості, пропорційної її натягу, - тільки тоді під час удару по ній молотком, паличками тощо збуджуються коливання і утворюється звук.

За конструкцій вібруючих елементів все мембранофони можна розподілити на три групи, у яких:

- мембрана пов'язана з замкнутою повітряної порожниною (наприклад, литаври);

- дві мембрани з'єднані через об‘єм повітря (великі і малі барабани);

- мембрана відкрита на повітря по обидва боки (бубон).

Під час удару по натягнутій мембрані в ній збуджуються коливання на її власних частотах, які можуть бути наближено визначені так: основну (фундаментальну) частоту розраховують за формулою

$$f_0 = \frac{0,766}{2a} \cdot \left(\frac{G}{p} \right)^{0,5},$$

де G - натяг мембрани, a - радіус, p - поверхнева щільність.

У разі коливання на власних частотах мембрану розподіляють на нульові діаметри і окружності.

У разі підвищення частоти моди коливань мембрани частково гасять один одного і випромінювання звуку зменшується (адже окремі елементи мембрани коливаються в протифазі). Отримані співвідношення відносять до «ідеальної» мембрани.

У реальних мембранах має місце зсув власних частот внаслідок навантаження з боку повітря (з урахуванням його маси і пружності), а також деякої власної

згинальної і зсувної жорсткості тощо. У конструкціях деяких інструментів передбачено можливість зміни сили натягу мембрани і можливість застосування повітряних резонаторів різної конструкції, що дає змогу змінювати співвідношення власних частот коливань мембрани, наближаючи їх до гармонійного ряду, і тим самим отримувати звуки певної музичної висоти. Прикладом таких інструментів є литаври.

Барабани. (Bass-drum, snaredrum тощо, рис. 4.9) – інструменти що не настроюють, і які дають глухі звуки невизначеної висоти. Барабани мають давню історію (були відомі вже в IV тисячолітті до н. е.), їх постійно використовували в музиці різних культур Індії, Африки, Азії тощо. І у наш час широко застосовують в симфонічних оркестрах, ансамблях тощо. Є величезне різноманіття барабанів різної конструкції, що значно різняться за своїми акустичними параметрами: індійські, латиноамериканські, індонезійські (том-томи, табла, конга, бонго тощо) [10].

На відміну від литавр барабани мають циліндричний корпус з натягнутими на нього верхньою і нижньою мембранами. Корпус не має жорсткої задньої стінки і тому не створено умови для виникнення резонансних коливань всередині корпусу (нижня мембрана прогинається під дією стовпа повітря у разі удару по верхній мембрані і тому не утворює на резонансних частотах хвилю, що стоїть).

Коливальна механічна система являє собою дві мембрани, з'єднані через об‘єм повітря. Зазвичай верхню мембрану налаштовують на більший натяг, ніж нижню. Однак є рекомендації для різного співвідношення величин натягів обох мембран залежно від застосування барабанів (музика оркестрова, джазова тощо). Зміна цих співвідношень зсуває нижні власні частоти мембран, змінює час загасання і надає вплив на тембр звучання барабана.

Великі концертні барабани (Bass-drum) мають діаметр від 610 до 920 мм, висоту корпусу (кадла) (400…500) мм.

Великі барабани не мають визначеної висоти тону, зміна натягу мембран, а також зміна висоти циліндричного корпусу впливають на тембральне забарвлення (плоскі корпуси дають більш яскравий тембр, глибокі - більш глухий). Спосіб збудження також робить істотний вплив: наприклад, при збудженні калаталом з м'якою головкою виходить більш глухе і м'яке звучання.

Акустичні характеристики бас-барабана:

- діапазон відтворюваних частот становить (50…2000) Гц, максимальна енергія в діапазоні до 300 Гц, спектр має шумовий характер;

- динамічний діапазон досягає (75…80) дБ, загальна акустична потужність може досягати 20 Вт (це також один з найгучніших інструментів оркестру);

- перехідні процеси: час атаки - 10 мс, час загасання досить великий – (0,2…1) с (в залежності від сили і місця удару може тривати до 3 с);

- тембр звучання великого барабана низький, глухий, тривалий. У разі удару у краю барабана звук виходить вище і сухіше.

Малі барабани. (Snare drum) - мають діаметр (320…450) мм, висоту (75…270) мм. Усередині корпусу або зовні у них часто натягнуті через нижню мембрану шнури або пружини – 2…4 і більше струн.

Ступінь взаємодії мембрани і шнурів залежить від маси і натягу мембрани. Для

цих барабанів використовують жорсткі палички (з твердого дерева), що сприяє появі високих обертонів в спектрі і більш «жорсткого» тембру звучання. Особливий ефект досягають під час використання металевих щіток.



а



б



в

Рис. 4.9. Вигляд акустичної ударної установки (*а*), литавр (*б*), ксилофону (*в*)

Складна форма коливань корпусу і самої мембрани впливає на випромінюваний спектр власних частот і, відповідно, тембр звучання барабанів цього типу.

Акустичні характеристики:

- діапазон відтворюваних частот становить (80-10000) Гц, основна енергія в області (200-1000) Гц. Спектр звуку у шнурових барабанів значно зміщено до високих частот у порівнянні з великими (басовими) барабанами;
- динамічний діапазон становить 60 дБ, максимальна вихідна потужність 12 Вт;
- перехідні процеси: час атаки - 7 мс, час загасання (0,2-0,4) с (спад на 30 дБ);
- тембр - сухий, тріскучий, його можна варіювати внаслідок зміни відстаней між шнурами і нижньої мембраною і зміною сили удару.

Тарілки (cymbals) - найдавніші музичні інструменти, відомі в багатьох музичних культурах (особливо високий рівень їх виготовлення був досягнутий в Туреччині та Китаї). В Європі вони стали популярні в кінці XVII століття, зараз застосовують в симфонічних, військових оркестрах і джаз-ансамблях.

Оркестрові тарілки являють собою дві круглі бронзові пластини діаметром (250-600) мм і товщиною (1,5-2,5) мм (рис. 4.9,*а*). Зазвичай в оркестрі використовують дві пари 380/405 мм і 460 мм в діаметрі. Тарілки мають злегка увігнутий профіль, оскільки їх центральну частина роблять у вигляді сферичного сегмента (за рахунок проковки). Коливання в них збуджують ударом: або одна об одну з кільцевої лінії (потім ковзним рухом тарілки відводять одна від одної в сторони, при цьому виходять різкі, дзвінкі звуки без певної висоти, але з переважанням середніх і високих частот); або м'якою паличкою (звук виходить більш м'яким); або металевою мітлою (виникає дзвінкий шелест).

Дослідження довели, що коливання тарілок в разі ударів великої сили носять нелінійний характер. Це виявляється в різноманітних ефектах: формування «хвилі, що біжить», тобто, зміщенні вузлових ліній в процесі звучання, що створює особливий ефект «плавання» звуку; появі вібрацій хаотичного характеру; створення особливого виду перехідних процесів з вираженим биттям. В момент удару в тарілках збуджується дуже широкий спектр шумового типу (до 20 кГц), потім через 2 с низькі частоти починають загасати і внаслідок нелінійних процесів відбувається конверсія енергії в високочастотну частина спектра, причому протягом (1…4) с після удару починає формуватися пік енергії в районі 300…400 Гц, що надає звучанню характерний тембр. Через 10 с в спектрі залишаються в основному низькочастотні складові. Максимальну інтенсивність звуку досягають під час удару на половині радіуса тарілки.

Акустичні характеристики тарілок:

- діапазон відтворюваних частот: (80-16000) Гц, один з самих широких серед оркестрових інструментів;
- динамічний діапазон досягає 66 дБ. Максимальний рівень звукового тиску 116 дБ-С / м (середній – (90-95) дБ-С / м). Випромінювана акустична потужність 9,5 Вт;
- перехідні процеси, час атаки - 3 мс. Час загасання (на 30 дБ) від 7с до 5 с в діапазоні до 1 кГц і 4 с в діапазоні до 16 кГц;
- тембр - блискучий, звучний, дзвінкий, істотно залежить від способу збудження і манери гри.

4.2.5 Оркестр

Оркестр може бути визначено як «група музичних інструментів, призначених для спільного виконання музичних творів». Сучасний оркестр включає в себе кілька основних секцій інструментів: струнні, духові (дерев'яні і мідні) і ударні.

В наш час існує велика різноманітність оркестрів за жанром музики, що виконують і кількості музикантів: великий симфонічний, оперний, естрадний, духовий тощо.

Склад симфонічного оркестру в різні періоди розвитку музики істотно змінювався. В наш час склад великого симфонічного оркестру в основному потрійний (по числу дерев'яних духових інструментів у кожній групі), проте є четверні і вище склади. Він містить: скрипки перші - 12-16, скрипки другі - 10-14; альти - 8-12; віолончелі - 6-10, контрабас - 6-10, флейти - 3, гобої - 3, кларнети - 3, фаготи - 3, валторни - 4, труби - 3, тромбони - 3, туба - 1; крім того, литаври - 1,

ударні - 1-5, арфи - 2; та інші, наприклад, рояль [6].

Є істотні відмінності і в розташуванні музичних інструментів в оркестрі. Найбільш поширену схему, прийнята на теперішній час для симфонічного оркестру, наведено на рис. 4.10. Підбір, розміщення і вибір кількості музичних інструментів у симфонічному оркестрі пов'язані в першу чергу з метою досягнення музичної виразності, проте за акустичними особливостями їх в значній мірі визначено проблемами звукового балансу.

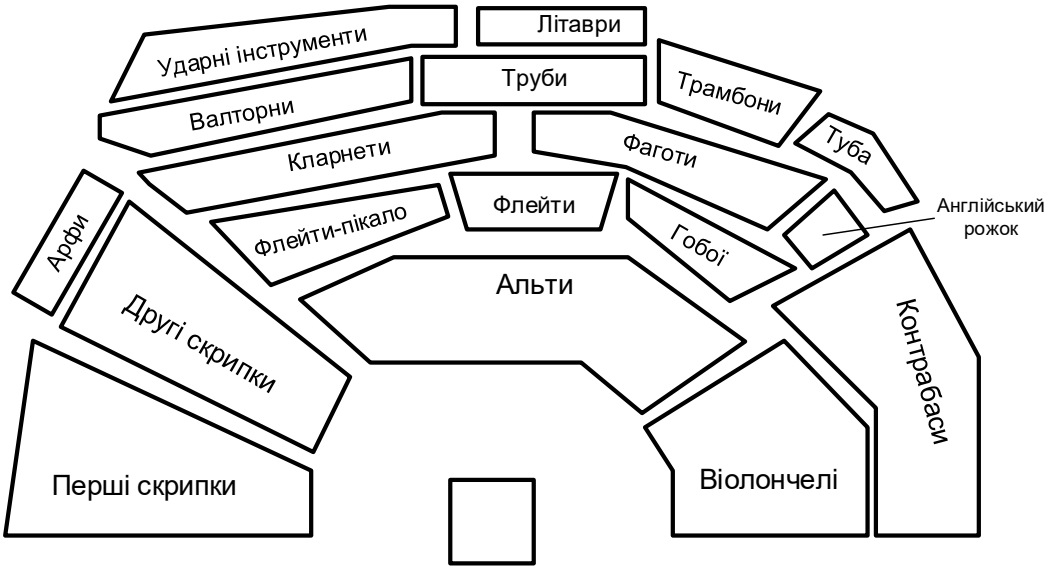


Рис. 4.10. Схема розташування інструментів симфонічного оркестру

З позиції слухачів «оркестр являє собою єдине просторово розподілене звукове джерело з таким складом і чисельністю інструментів, який забезпечує музикальний баланс звучання у всіх точках залу, що включає баланс за гучністю, за тембром і за розрізненістю (чіткості)».

Зрозуміло, забезпечення цих вимог в значній мірі залежить від акустичних характеристик концертних залів.

Якщо вважити симфонічний оркестр як єдине просторове звукове джерело, то можна оцінити його загальні акустичні параметри, основні з яких наведено нижче.

Частотний діапазон симфонічного оркестру охоплює область від нижчої частоти самого низькочастотного інструменту до вищої найбільш високочастотного. Частотні діапазони основних музичних інструментів, що входять в оркестр, наведено на рис. 4.11 [10]. Наприклад, нижча частота основного тону контрафаготу дорівнює А2 - 27,5 Гц, вища частота основного тону флейти-пікколо випадках становить С5 - 4186 Гц. Однак внаслідок наявності обертонів, шумових призвуків, використання таких ударних інструментів як тарілки, трикутники тощо з великим рівнем високочастотного шуму в спектрі, частотний діапазон може розширюватися до 16…17 кГц. В результаті частотний діапазон великого симфонічного оркестру становить 30…16000 Гц.

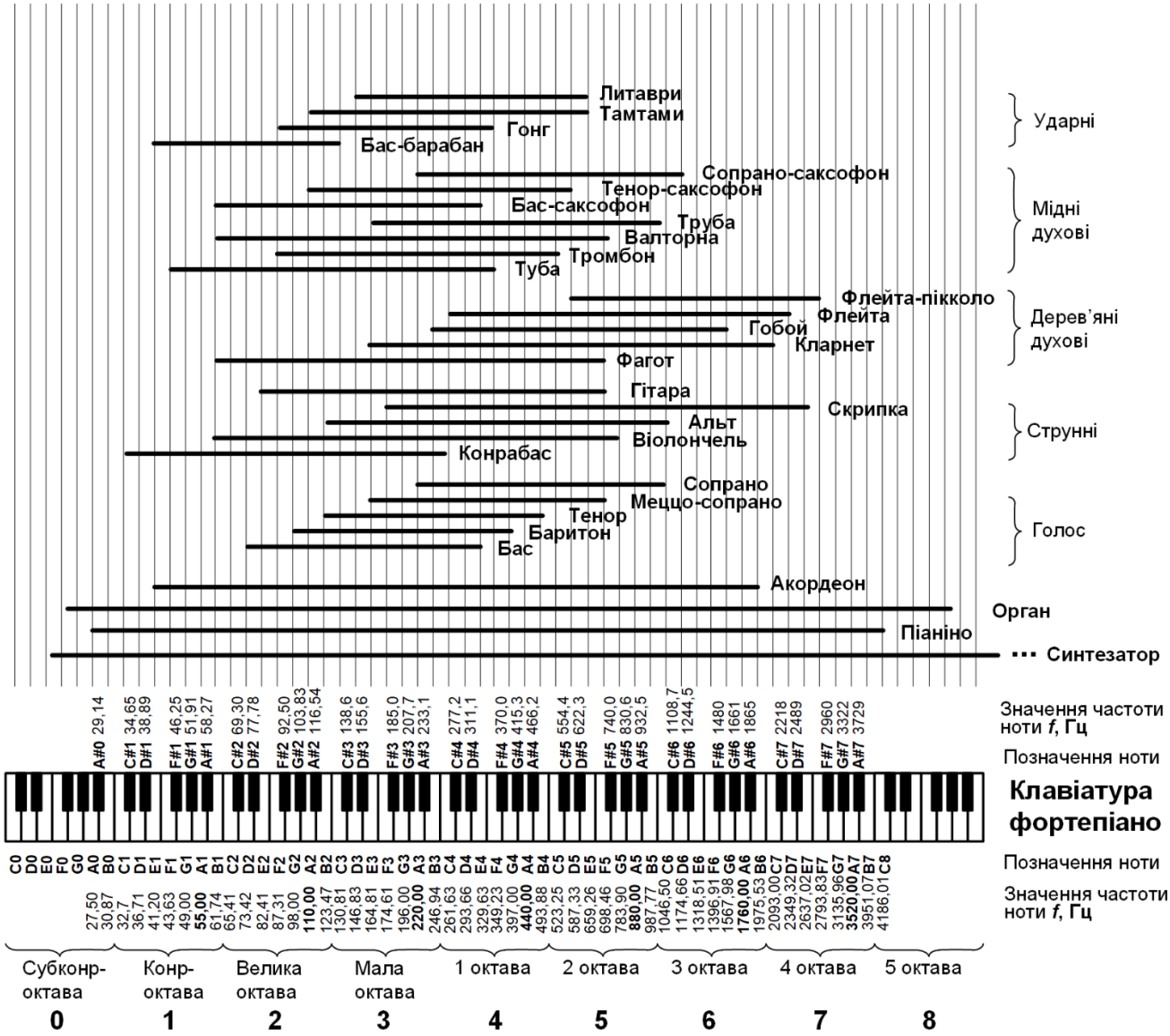
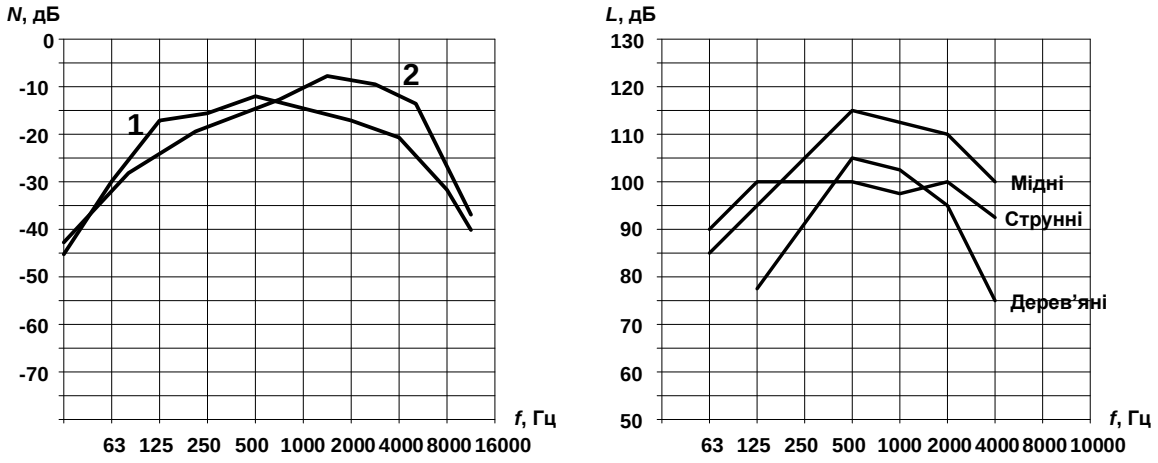


Рис. 4.11. Частотні діапазони музичних інструментів та голосу людини

Усереднений спектр симфонічного оркестру наведено на рис. 4.12,*а* (ймовірність перевищення даного рівня – 10%) [10]. Область максимальних рівнів знаходиться в діапазоні 500-1000 Гц; вище 4-5 кГц і нижче 250 Гц відбувається спад приблизно 10 дБ / окт. Слід зазначити, що такий розподіл характерний для класичного симфонічного оркестру (крива 1), для сучасних джаз- і рок-ансамблів, особливо з використанням електронних інструментів, спектральна область пікових значень змістилася в діапазон більш високих частот (2-8 кГц, крива 2), що створює певні проблеми для сучасної звуковідтворювальної апаратури.

Динамічний діапазон: для забезпечення балансу за гучністю в сучасному симфонічному оркестрі група струнних складає близько 70% від усієї кількості інструментів (частка скрипок - 35%, альтів - 15%, віолончелей і контрабасів по 10%), група дерев'яних духових інструментів - 12%, група мідних ~ 10% і ударних - 5%. Струнні інструменти мають невеликий динамічний діапазон (в середньому (30-35) дБ), дерев'яні і мідні духові в середньому (35-45) дБ, ударні до 80 дБ. Динамічні діапазони деяких інструментів, які використовують в оркестрі, наведено на рис. 4.13,*а*.

Повний динамічний діапазон для великого симфонічного оркестру для зазначеного вище співвідношення кількості інструментів сягає (75-80) дБ. Для різних типів оркестрів динамічні діапазони істотно різняться - від 40 дБ до 70 дБ.



а б

Рис. 4.12. Спектральний розподіл пікових рівнів для оркестру (*а*) та розподіл рівнів акустичної потужності для різних груп музичних інструментів (*б*)

Акустична потужність сучасного оркестру становить в середньому приблизно 1 Вт, на піках вона може досягати значення 20 Вт і навіть 70 Вт. Розподіл за частотою рівнів акустичної потужності для різних груп інструментів при виконанні на рівні mf наведено на рис. 4.12,*б*. Максимальні рівні потужності знаходяться в частотних областях 250 Гц…2 кГц. Між різними типами інструментів є значні відмінності в випромінюваній акустичній потужності: наприклад, контрабас - 0,16 Вт, кларнет - 0,05 Вт, труба - 0,3 Вт, рояль - 0,44 Вт, тромбон - 6,4 Вт, тарілки - 9,5 Вт, великий барабан - 25 Вт тощо [10].

Великі максимальні рівні звукового тиску, що доступні симфонічному оркестру, забезпечують пік-фактор 27 дБ. Це висуває особливі вимоги до апаратури звукозапису, яка повинна мати великі запаси за потужністю, з тим щоб не було кліпування піків під час запису звучання симфонічного оркестру.

Для слухачів в залі середній рівень зазвичай становить (70-90) дБ SPL. У той же час всередині оркестру рівні звукового тиску можуть бути значно вище: в одному метрі від мідних інструментів рівень може досягати 130 дБ, всередині струнної групи до (90-100) дБ (для порівняння: всередині хорових ансамблів рівень досягає значення (80-100) дБ, на кафедрі органіста до 100 дБ тощо). В сучасних джаз- і рок-ансамблях звуковий тиск на сцені може бути на рівні больових порогів (до 140 дБ). Робота на таких звукових рівнях повинна бути строго обмежена за часом.

Перехідні процеси: процеси атаки і спаду звуку сильно відрізняються у кожної групи інструментів в залежності від їх конструктивних особливостей і системи звуковидобування. Загальну структуру перехідних процесів для різних типів інструментів наведено на рис. 4.13, *б-і*.

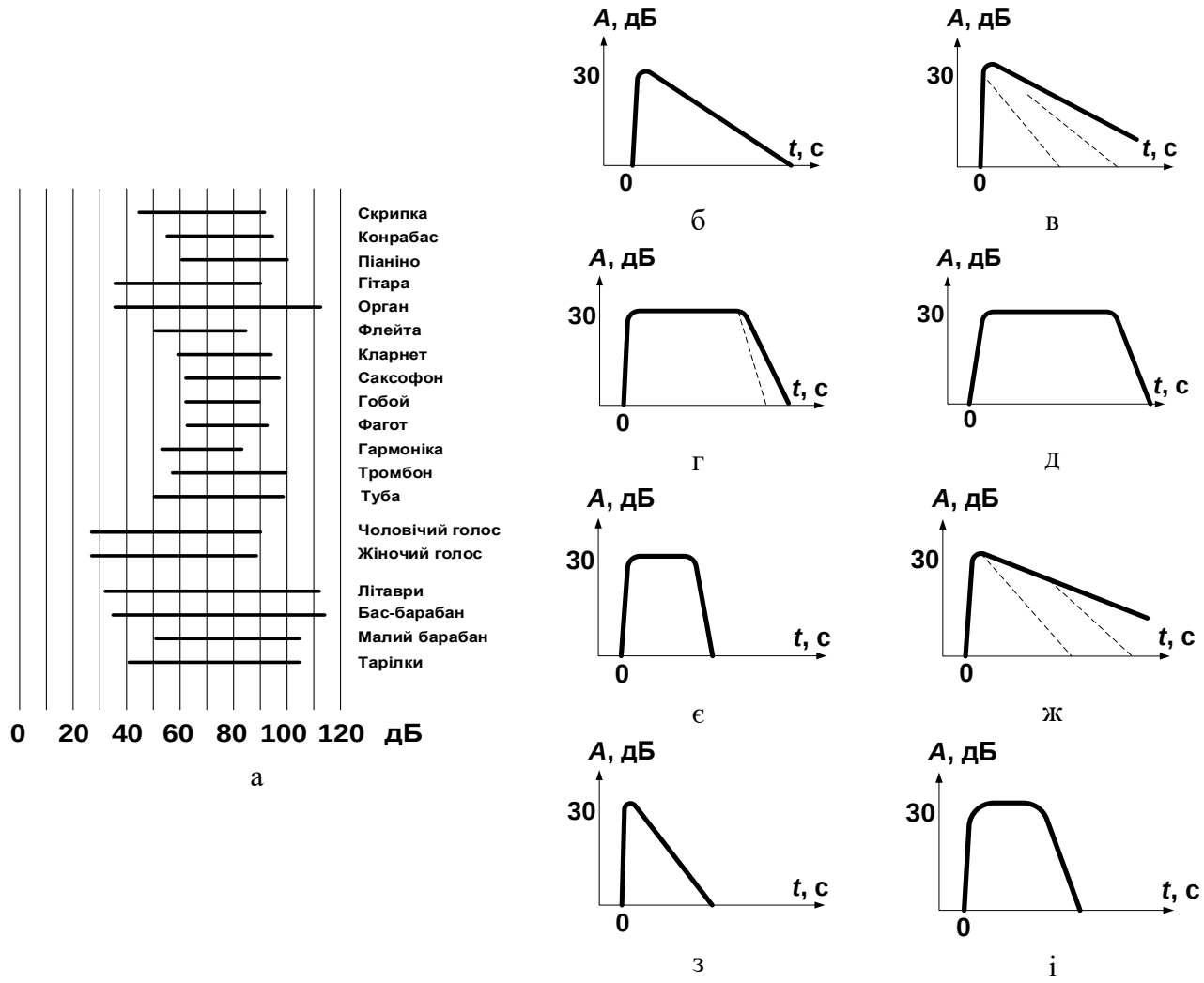


Рис. 4.13. Динамічні діапазони (*а*) та структура перехідних процесів для різних груп музичних інструментів: щипкові струнні (*б*), ударні струнні (*в*), смичкові струнні (*г*), органні лабіальні труби (*д*), духові (*є*), ударні (*ж*), барабани (*з*), голосні звуки мови (*і*)

Для струнних щипкових і ударних інструментів (гітара, арфа, рояль тощо) характерним є короткий час атаки (10-50) мс, майже повна відсутність стаціонарної частини і тривалий час загасання коливань; в разі застосування демпферів, наприклад, в роялі він може бути істотно зменшений (рис. 4.13,*в*). У струнних смичкових (скрипка, альт, віолончель тощо) час атаки також короткий (50 мс), але значно більш тривала стаціонарна частина звучання (рис. 4.13,*г*).

Органні труби мають тривалий час атаки до (100-300) мс, тривалу стаціонарну ділянку і досить тривалий спад до (5-6) с. Всі духові інструменти мають дуже короткий час атаки (10-30) мс і дуже короткий спад; нарешті, для ударних інструментів (рис. 4.13*е, ж*) характерні коротка атака (3-10) мс, довгий спад (наприклад, у дзвонів до 50 с) і майже повна відсутність стаціонарної частини; у голосового апарату характер перехідних процесів аналогічний духовим інструментам.

Тембр: забезпечення балансу звучання оркестру за тембром і чіткістю (розрізнення) залежить від мистецтва диригента і музикантів, музичного змісту твору, вибору кількості інструментів і їх розміщення на сцені, а також, як було зазначено вище, у значній мірі визначає акустика залів і сцени.

4.3. Первинний мовний сигнал

Мова і спів створюють «складним музичним інструментом» - голосовим апаратом, можливості якого людина намагається копіювати століттями, створюючи різні види музичних (перш за все духових) інструментів [4].

Процес утворення і сприйняття мовних сигналів містить такі основні етапи:

- створення мови - формулювання повідомлення, кодування, нейром'язові дії, рухи елементів голосового тракту і звукового джерела (створення акустичного сигналу), випромінювання акустичного сигналу;

- сприйняття мови - спектральний аналіз і виділення акустичних ознак в периферичній слуховій системі, передавання виділених ознак нейронними мережами, розпізнавання мовного коду (лінгвістичний аналіз), розуміння змісту повідомлення.

4.3.1. Структура апарату формування голосу

Подібно духовому музичному інструменту, він містить такі основні частини [4]:

- генератор - дихальна система, що складено з повітряного резервуара (легень), де запасається енергія надлишкового тиску, м'язової системи і вивідного каналу (трахеї) зі спеціальним апаратом (гортанню), де повітряний струмінь переривається і модулюється;

- вібратори - голосові зв'язки, повітряні турбулентні струмені (що створюють «крайові тони»), імпульсні джерела (вибухів);

- резонатори - розгалужені і перебудовувані резонансні порожнини складної геометричної форми (глотки, ротової і носової порожнини тощо), названих артикуляційною системою.

Генерація енергії відбувається в легенях, які являють собою своєрідні міха, що створюють потік повітря під час вдихання і видихання внаслідок різниці атмосферного і внутрішньолегеневого тиску (рис. 4.14). Процес вдихання і видихання відбувається завдяки стисканню і розширенню грудної клітини, що здійснюють двома групами м'язів: міжреберних (використовують переважно для мови) і верхньочеревних разом з діафрагмою - м'язової тканиною у формі подвійного куполу, яка напружується і опускається під час вдихання, розширюючи грудну клітину, (використовуються в основному для співу). Збільшення грудної клітини розтягує легені. Це призводить до падіння внутрішньолегеневого тиску відносно атмосферного, внаслідок чого у легені потрапляє повітря. Під час вдихання м'язи розслаблюються, діафрагма піднімається і виштовхує повітря. Таким чином, вдихання - процес активний, вимагає затрат енергії, видихання - процес пасивний. У разі звичайного дихання цей процес відбувається приблизно 17 раз / хв.; керування ним як у звичайному диханні, так і під час розмови відбувається несвідомо; для співу процес постановки дихання відбувається свідомо і вимагає тривалого навчання.

Мова - це своєрідний природний код, яким здійснюють передавання інформації. Мова як безперервний потік проходження кодових елементів підпорядковується певним фізичним і статистичним закономірностям. Разом з цим

мову поділяють на складові лінгвістичні елементи - слова, склади, звуки [4].

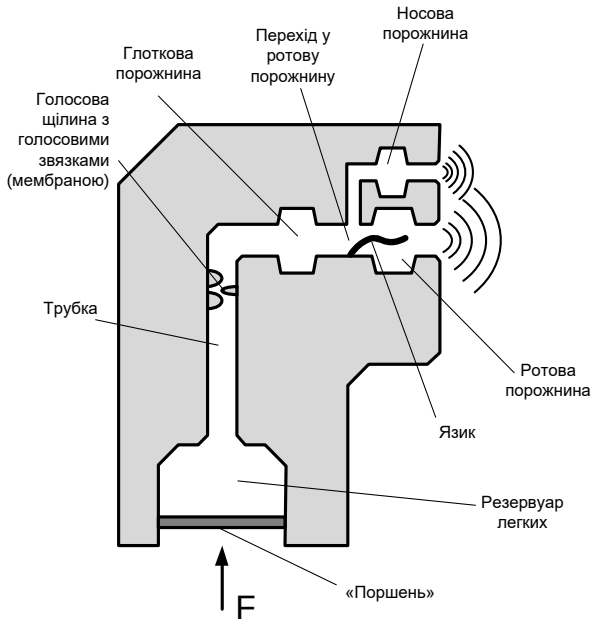


Рис. 4.14. Структура органу мовотворення людини

Звук мови – це найменший елемент, що розпізнають або сегмент мови. Незважаючи на різну вимову, кожен звук пов'язано з одним і тим же лінгвістичним образом.

Кожній людині властива власна манера вимовляти звуки мови (свого роду усний почерк). Вимова звуків мови залежить, наприклад, від наголосу, сусідніх звуків і інших чинників. Але при всьому різноманітті в їх вимові, звуки - фізична реалізація обмеженого числа узагальнених звуків мови, званих фонемами. (Фізичної реалізацією узагальненого звуку мови є фонема.) Фонема - це типовий звук мови.

Фонема - це те, що людина хоче вимовити, а звук мови - це те, що людина фактично вимовляє. Фонема відносно звуку мови відіграє ту ж роль, що і зразкова буква, що називається графемою (наприклад, друкована курсивом) відносно до її рукописної форми в конкретному написанні.

Сукупність органів, які беруть участь в мовотворенні, називають мовним апаратом.

Мовотворення сформовано на основі дихальних і жувальних життєвих функцій. Тобто мовний акустичний продукт утворено певними рухами рота, носа, глотки, дихальних шляхів і легень.

Частину мовного тракту, яка формує звук, складено з рота, носа, глотки, губ.

Легені, трахеї і бронхи, виконують функцію акумуляторів звукової енергії. Кожному звуку притаманне своє положення язика, щелепи, губ, і верхньої частини ротової порожнини (м'якого піднебіння), певна артикуляція.

Мовний тракт - це труба змінного діаметру, від голосових зв'язок і до губ, довжина приблизно 17 см.

Носовий тракт - це носоглотка і носова порожнина, створюють допоміжний шлях у створенні звукових хвиль. Довжина приблизно 12 см, об'єм 50-60 см^3.

Формування більшої частини звуків мови відбувається за участю голосу,

утворення голосу - фонація, пов'язане з роботою голосових зв'язок, коливання яких веде до зміни ширини голосової щілини, і відповідно, модуляції потоку повітря, що видихають [8].

Звуки мови ділять на дзвінкі і глухі. Дзвінкі звуки утворено за участю голосових зв'язок, які в цьому випадку знаходяться в напрузі. Під напором повітря, що йде з легень, вони періодично розсуваються, у результаті чого створюється переривчастий потік повітря. Імпульси потоку повітря, що створено голосовими зв'язками, яким властива певна інерція, з достатньою точністю можуть вважати періодичними.

Відповідний період повторення імпульсів називають періодом коливання голосових зв'язок або періодом основного тону голосу T_0 (рис. 4.15). Зворотну величину $f_0 = 1/T_0$ називають частотою основного тону або основною частотою голосу. Якщо зв'язки тонкі і сильно напружені, то період виходить коротким і частота основного тону високою; для товстих, слабонапружених зв'язок частота основного тону низька.

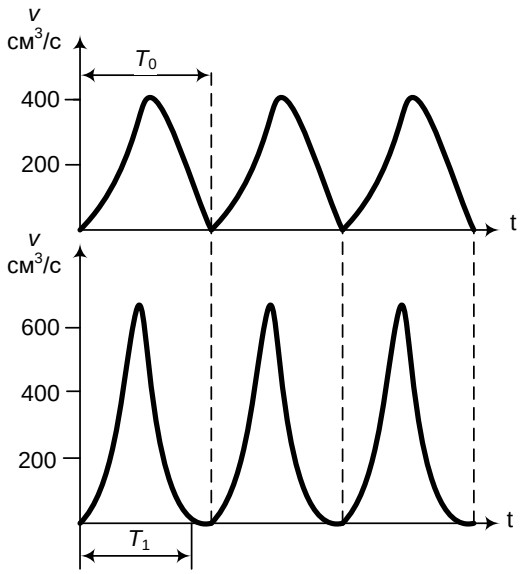


Рис. 4.15. Форма мовного сигналу людини

Ця частота для всіх голосів лежить у межах від 70 Гц до 450 Гц. Під час мовлення вона безперервно змінюється відповідно до наголосу і підкресленням звуків і слів, а також для прояву емоцій (запитання, вигук, здивування тощо). Зміну частоти основного тону називають інтонацією.

У кожної людини свій діапазон зміни частоти основного тону (зазвичай він буває трохи більше октави) і своя інтонація. Остання має велике значення для пізнаваності людини, що говорить. Основний тон, інтонація, усний «почерк» і тембр (забарвлення) голосу можуть служити для впізнання людини. При цьому ступінь достовірності впізнання вище, ніж за відбитками пальців. Цю властивість використовують в розробленій останнім часом апаратурі, яка спрацьовує тільки на певні голоси.

Крім основної частоти важливою характеристикою є форма кривої змінного потоку повітря, що обумовлено характером зміни площі голосової щілини. Часова

залежність об'ємної швидкості повітря, відповідно, імпульси основного тону, має вигляд пилкоподібного коливання (рис. 4.15). Тому в разі їх періодичного повторення виникає дискретний спектр з великим числом гармонік (до 40), частоти яких кратні частоті основного тону. Обвідна спектра основного тону має спад в бік високих частот з крутизною близько 6 дБ/окт. Наприклад, для чоловічого голосу рівень гармонік на частоті 3000 Гц нижче рівня на 100 Гц приблизно на 30 дБ.

Форма кривої визначає спектр голосового джерела, характеристикою якого є його середня обвідна, що описується в першому наближенні функцією $1/f_2$, а також його гармонічний характер, оскільки всі його спектральні складові є гармоніками основного тону f_0. Таким чином, спектр такого коливання являє собою сукупність гармонік основного тону f_0, розподіл амплітуд і фаз яких описують деякою функцією від частоти $S(\omega)$ (рис. 4.16,*а*) [8].

Під час вимови глухих звуків голосові зв'язки перебувають у розслабленому стані і потік повітря з легень вільно проходить в порожнину рота. Зустрічаючи на своєму шляху різні перешкоди у вигляді язика, зубів, губ, він утворює завихрення, що створюють шум із суцільним спектром.

Під час вимови звуків мови язик, губи, зуби, нижня щелепа, голосові зв'язки повинні знаходитися для кожної фонеми у строго певному положенні або русі. Ці рухи називають артикуляцією органів мови. При цьому у мовотворному тракті створено певні для даної фонеми резонансні порожнини, а для злитого звучання фонем в мові - і відповідні переходи від однієї форми тракту до іншого.

Через мовний тракт під час вимови звуків проходять або тональний імпульсний сигнал, або шумовий, або той і інший разом.

Мовний тракт являє собою складний акустичний фільтр з резонансами, створюваними порожнинами рота, носа і носоглотки, тобто завдяки артикуляційним органам мови (рис. 4.14).

Враховуючи резонансні явища умовних труб мовного тракту, тракт має нерівномірну передатну функцію $K(\omega)$, модуль якої можна представити у вигляді багаторезонансної кривої (рис. 4.16,*а*). Внаслідок цього тональний або шумовий спектри з монотонною обвідною перетворено у спектри з рядом максимумів і мінімумів.

Максимуми спектра називають формантами, а нульові значення - антиформантами. Обвідна спектра для кожної фонеми має індивідуальну і цілком певну форму (рис. 4.16,*б*). При проголошенні мови спектр її безперервно змінюється, у результаті чого утворюються формантні переходи. Частотний діапазон мовлення є у межах від 70 Гц до 7 кГц.

На результуючій характеристиці $P(\omega)$ помітні області спектральних максимумів, обумовлені резонансними властивостями тракту (рис. 4.16,*в*). Ці області називають формантами, а частоти, на яких помітні максимуми, називають формантними частотами.

На формування спектрів звуків мови впливає також частотна залежність, опір випромінювання ротового і носового органів, що визначено синфазністю або зсувом фаз випромінювання ротом і носом (для різних довжин хвиль).

Сумарна результуюча характеристика мовного тракту може бути записана як

$$P(\omega) = S(\omega) \cdot K(\omega) \cdot R(\omega),$$

де $R(\omega)$- опір випромінювання.

В результуючій функції $S(\omega)$ і $R(\omega)$ повторюються для різних звуків майже без зміни голосних звуків, а функція $K(\omega)$ залежить від конфігурації мовного тракту і визначає положення і ширину формантних максимумів [8].

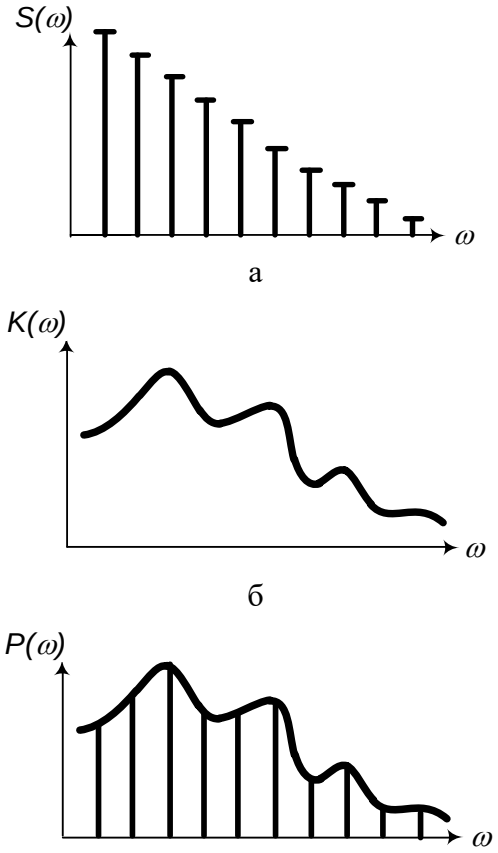


Рис. 4.16. Спектр (*а*), передавальна функція (*б*) та результуюча характеристика (*в*) мовного тракту людини

Дзвінкі звуки мови, особливо голосні, мають високий рівень інтенсивності, глухі - низький. У процесі виголошення мови її гучність безперервно змінюється, особливо різко при вибухових звуках мови. Динамічний діапазон звуків мови знаходиться в межах 35…45 дБ. Голосні звуки в середньому тривають близько 0,15 с, приголосні - близько 0,08 с, звук «п» - близько 30 мс. Велика тривалість голосних звуків необхідна для перебудови артикуляційних органів, тому що інакше язик буде «заплітатися».

Звуки мови неоднаково інформативні. Так, голосні звуки містять меншу інформацію щодо змісту мови, ніж глухі (наприклад, у слові «посилка»: послідовність «о» «и» «а»- нічого не говорить, а – «п» «с» «л» «к» дає майже однозначну відповідь щодо змісту). Тому розбірливість мови знижується під час дії шумів, у першу чергу через маскування глухих звуків.

4.3.2. Утворення звуків мови

Утворення голосних звуків. Звуки мови, пов'язані з фонацією, називають вокалізованими [8].

Акустична реалізація голосних звуків має такі особливості:

1. Обов'язкова участь голосового джерела;
2. Стабільність конфігурації мовного тракту;
3. Незначна участь носової порожнини.

До голосних звуків відносять всі голосні літери, фізичними кореляторами (ознаками) голосного звуку може бути:

1. Сукупність формантних частот, що називається F-картиною звуку;
2. Відносна ширина формантних максимумів;
3. Відносна частотна відстань між частотами.

F-картина визначає розпізнавання (фонетичну особливість звуку) і індивідуальні особливості голосу, які залежать від основного тону f_0 (табл. 4.2) [4].

Таблиця 4.2. F-картина голосних звуків

	f_1	f_2	f_3	f_4
У	300	625	2500	3320
О	535	780	2500	3220
А	700	1800	2600	3410
Є	440	1800	2550	3500
І	240	2250	3200	3700
И	300	1480	2230	3450

Для більшості голосних розпізнаваність визначено першими двома формантного частотами, а f_3 і f_4 дають інформацію щодо індивідуальних особливостей голосу.

Голосні звуки мають пікову потужність ~ 0,7 мВт, тривалість звучання 0,1…0,3 с, дискретний спектр і формантну структуру обвідної спектра. f_0 голосних звуків лежить в діапазоні 80…180 Гц для чоловічого голосу, і 150…300 Гц для жіночого, а форманти лежать в діапазоні від 300 Гц до 3 кГц.

Утворення неголосових звуків. В утворенні неголосових звуків не працюють голосові зв'язки. Для таких звуків існують два типи акустичного збудження: шумовий і імпульси.

1. Шум виникає в результаті турбулентності потоку, в тому перетині мовного тракту, де завдяки артикуляційним органам відбувається найбільше збудження. Таке джерело відрізняється від голосового зниженою інтенсивністю, а спектр є суцільним. Такий сигнал не має постійного місця розташування, тобто змінюється залежно від звуку, який вимовляють. З таких звуків виділяють:

1) мовні: задньоязикові «х», середньоязикові «ш», і передньоязикові «с»;

2) губні, коли беруть участь і верхні губи «ф»;

3) глоткові «г».

2. Стрибок тиску, що утворюється в тому чи іншому місці тракту, під час різного розмикання або змикання артикуляційних органів, губний «н» і «т», язиковий «к».

Утворення приголосних звуків. Має велику кількість ознак і особливостей. Джерела акустичного збудження приголосних звуків більш складні, оскільки одночасно задіяні шумові і голосові збудники.

Конфігурація мовного тракту можливо характеризувати стабільним положенням артикуляційних органів або короткочасною динамікою артикуляторних рухів. Характер руху може бути тільки ротовим, або тільки носовим, або одночасно ротоносовим. За ступенем вокалізації, участі голосових органів, приголосні поділяють на сонорні і шумові.

Сонорні наближаються до голосних. З них виділяють плавні сонорні «р» і «л», напівголосні «ї», носові приголосні «м» і «н».

Шумові: дзвінкі за участю голосу «б», «д», «ж», «з», «г», глухі без голосу: «к», «ф», «н», «п», «с», «ш», «у», «х» ...

За динамікою артикуляторних рухів приголосні поділяють на поздовжні і вибухові. За характером неголосового збудження є:

- щілинні (фрикативні), які формуються в щілинах мовного органу: «з», «с», «ж», «л», «й», «п»;
- зімкнуті (вибухові або аспіраторні) утворюються в момент прориву струменем повітря зімкнутих мовних органів (імпульсні джерела) - «б», «д», «г», «к», «т», ...;

Зімкнуто-щілинні об'єднують в утворенні звуку моменти змикання і розриву «ц = т + с» і «ч = т + ш».

Виділяють також тремтячий звук «р».

Спектр приголосних звуків відрізняється великою різноманітністю, тривалість приголосних звуків від 0.03 с (буква «п») до 0.08 с.

4.3.3. Акустичні характеристики мови

Мовний сигнал має подвійну природу. З одного боку, це звичайний акустичний сигнал, який являє собою процес поширення звукових хвиль, форми фронту яких залежать від властивостей джерела і умов поширення. Тому, як і інші акустичні сигнали, мову характеризують певним набором об'єктивних параметрів - залежністю звукового тиску від часу (часової структури звукової хвилі), тривалістю звучання; спектральним складом, місцем розташування джерела в просторі тощо, які викликають відповідні суб'єктивні слухові відчуття (гучності, висоти, тембру, локалізації, маскування тощо)

З іншого боку, мову призначено для передавання змістовної інформації, тож у її акустичних характеристиках існують спеціальні фонетичні та семантичні ознаки, для розшифрування яких застосовують спеціальні механізми процесорного оброблення в спеціальних відділах кори головного мозку.

Оскільки мовний сигнал (як і музичний) являє собою сигнал квазівипадковий, тобто, передбачити його майбутні значення можна тільки з певною ймовірністю, то до його характеристик можуть бути застосовані методи статистичного аналізу, а саме: може бути досліджено розподіл у часі миттєвих значень і рівнів мовного сигналу, тривалості безперервного існування різних рівнів, тривалості пауз; розподіл максимальних рівнів за частотою; розподіл поточної і середньої потужності, спектральної щільності потужності; крім того, можуть бути визначені

динамічний діапазон і пік-фактор; обчислено розподіл основної фонаційної частоти, спектральний розподіл формант тощо.

Під час аналізу акустичних параметрів мовного сигналу у сучасних спеціалізованих програмах зазвичай оцінюють рівнеграми і всі пов'язані з ними параметри (динамічний діапазон, розподіл миттєвих значень сигналу, поточна потужність тощо); одновимірний спектр (розподіл формантних областей); тривимірний спектр – 3D (зміна форми обвідної у часі) і спектрограми або сонограми (широкосмугові, вузькосмугові, слухові), з яких можуть бути отримані такі характеристики, як зміна основної фонаційної частоти у часі, зміна формантних областей, розподіл гармонік голосового джерела тощо, а також інформація щодо фонетичного змісту мовного сигналу.

Перш за все мовний сигнал, як і розглянуті вище сигнали, створювані музичними інструментами, характеризують такими акустичними параметрами: діапазон відтворюваних частот у середньому становить (70…7000) Гц (для чоловічих голосів - (80…5000) Гц, для жіночих - (220…7000) Гц) [4].

Розрахунок обвідної спектра для звуків мови дозволяє встановити середньостатистичний розподіл формантних областей за частотою, за амплітудою і за шириною смуги (добротністю) (рис. 4.17,*а*). Аналіз спектрів дає можливість також обчислити середнє значення частоти основного тону, яке для мови становить 139 Гц (чоловіча мова) і 249 Гц (жіноча мова).

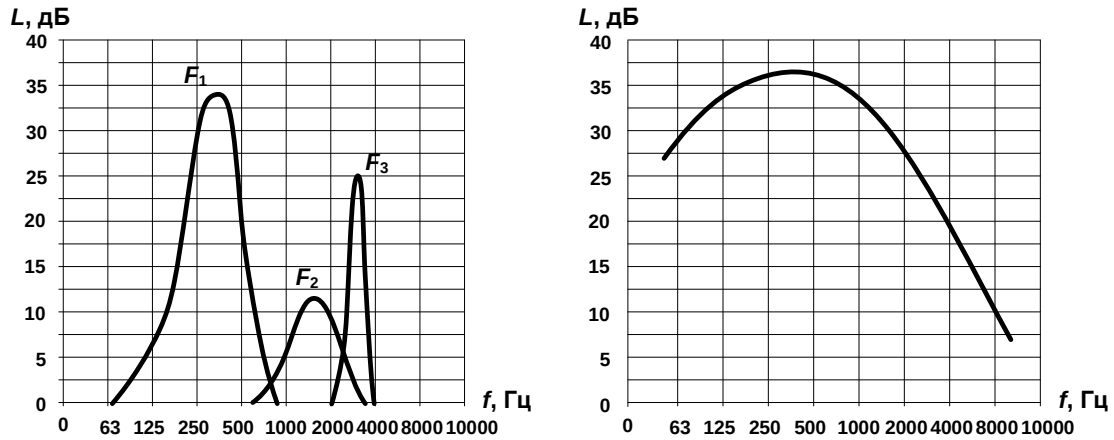
Основна енергія мовного сигналу зосереджена в смузі (250…1000) Гц, спад на високих частотах відбувається за співвідношенням - 6 дБ / окт після 500 Гц (рис. 4.17,*б*).

Динамічний діапазон: значення динамічних діапазонів мовних сигналів є в межах (35…45) дБ, значення пік-фактору (10…12) дБ.

Слід зазначити, що для вокальної мови (співу) ці рівні істотно вищі і можуть досягати значень 115 дБ на відстані 1 м.

Аналіз спектрів дає можливість побудувати дуже важливу для практики звукозапису криву розподілу рівнів мови, приклад для діапазону (1000…1500) Гц наведено на рис. 4.18 (для інших частотних діапазонів криві розподілу подібні). Аналіз цих даних показує, що в мовному потоці амплітуди з рівнем 45 дБ становлять понад 80%, амплітуди з рівнями 70 дБ і вище - менше 10%. Це означає, що під час оброблення мовних фонограм прагнення «вичистити» шуми може привести до втрати значної частини інформації, оскільки низькі рівні амплітуд пов‘язані в основному з приголосними звуками, а вони є носіями основного змістовного навантаження в мові.

Перехідні процеси: як і у духових інструментів, голосовий апарат створює звуки з короткою атакою (20-30) мс і коротким часом спаду (30-40) мс [6].



а б

Рис. 4.17. Частотний розподіл формантних областей мови (*а*) та розподіл спектральної щільності потужності мови (*б*)

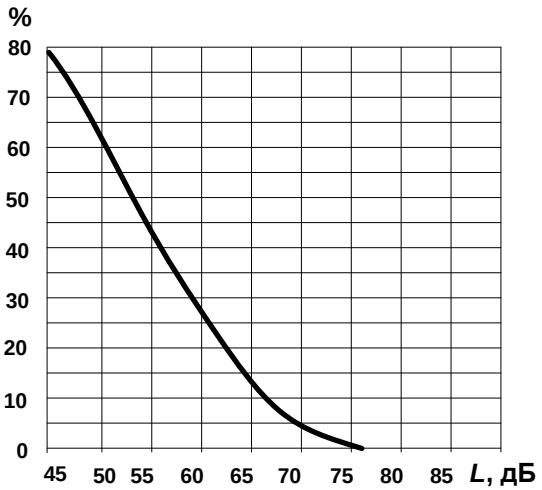


Рис. 4.18 Гістограма розподілу амплітудного складу мови в діапазоні (1…1,5) к Гц

4.3.4. Особливості звукоутворення і акустичні характеристики вокальної мови (співу)

Інформацію, яку містить мовний сигнал, прийнято ділити на семантичну (змістовну, логічну) і емоційно-естетичну.

Якщо в мові основним є перший вид інформації, то в вокальній мові головні завдання полягають в передаванні емоційно-естетичної інформації.

«Вокальна мова» означає те ж, що і «спів», але спів - це перш за все музично-естетичний термін («мистецтво співу»); під терміном «вокальна мова» мають на увазі аналіз процесу співу з акустичних наукових позицій, тому у подальшому викладі буде використано в основному перше визначення [4].

Ці завдання, а також особливості їх реалізації (оперний, концертний, хоровий, естрадний спів тощо) призвели до того, що вокальна мова, незважаючи на наявність загального механізму звукоутворення, має ряд істотних відмінностей від звичайної мови, які полягають перш за все в наступному: специфіці організації дихання; наявності особливої структури формант, що характеризуються появою особливих

співочих формант; здатності до підстроювання формант в верхньому діапазоні співочого голосу; і використанні різних регістрів, наявності амплітудної і частотної модуляції (вібрато і тремоло); великих флуктуацій акустичних параметрів під час вираження емоцій, особливої системи зворотного зв'язку тощо.

Все це зумовлює специфіку акустичних характеристик вокальної мови - більш широкий частотний діапазон, великий динамічний діапазон, особливий спектральний розподіл потужності тощо, - а також створює певні проблеми з розбірливістю.

Процес звукоутворення вокальної мови охоплює всі основні етапи, які використовують для звичайної мови: генерацію, фонацію (для голосних і дзвінких приголосних), артикуляцію і випромінювання звуку. Однак зазначені вище особливості вокальної мови вносять свої корективи в організацію процесів, пов'язаних з використанням як голосових джерел (генерація і фонація), так і резонаторних порожнин (артикуляція). Проблеми організації дихання під час співу є складним завданням, пов'язаним з постановкою голосу, і їх аналізують в спеціальних настановах.

Особливі вимоги до тембру співочого голосу, що істотно відрізняються від вимог до звичайної мови, призводять в першу чергу до відмінностей в налаштуванні резонансів голосового тракту, тобто, його формантних частот.

Співоча форманта: для того щоб голос оперного співака (або концертного виконавця) було чути на тлі оркестру, необхідно перш за все створювати значно вищий рівень звукового тиску (співати голосніше). Однак одного збільшення гучності виявляється недостатньо для вирішення цієї проблеми, тому у процесі багаторічного удосконалення техніки співу, перш за все оперного (бельканто), були відпрацьовані особливі прийоми перебудови спектральних характеристик голосу, зокрема створення особливої - «співочої» форманти.

Якщо порівняти розташування формантних частот (тобто, резонансів вокального тракту) для одних і тих же голосних у звичайній і вокальній мові, то чітко видно, що для всіх голосних положення першої форманти на шкалі частот мало змінюється, друга форманта зсувається за частотою униз, значно змінюється положення третьої, четвертої та п'ятої формант у бік їх спільного зближення (рис. 4.19,*б*). Якщо проаналізувати спектральну обвідну будь-якого з голосних звуків у мові і співі (рис. 4.19,*а*), то чітко видно наявність вираженого піку у області (2…3) кГц. Цей пік створено у результаті об'єднання (кластеризації) третьої, четвертої та п'ятої формант і носить назву «співочої форманти».

Таку групу підкреслених формант спостерігають тільки у спектрах добре поставлених, частіше оперних голосів, при цьому центральну частоту розташовано залежно від типу голосу в області: у басів і баритонів – (2100…2500) Гц, у тенорів – (2500…2800) Гц, у сопрано – (3000…3500) Гц.

Для одного і того ж співака ця форманта не зміщується за частотою, стабільно займає одне і те ж положення у разі співу нот різної висоти або різних голосних, тобто, положення цієї форманти не залежить ні від фундаментальної частоти (це властивість підстроювання є у інших формант, як буде показано далі), ні від позиції інших резонансів (нижніх формант).

Амплітуда співочої форманти залежить як від амплітуд з‘єднуваних формант

(третьої, четвертої та п'ятої), так і від амплітуд відповідних обертонів в спектрі голосового джерела, а це, у свою чергу, залежить від особливостей його використання (зокрема, швидкості і сили зведення при коливаннях голосових зв'язок). Крім того, оскільки у разі збільшення гучності обвідна спектра звуку голосового джерела змінюється, оскільки збільшуються амплітуди високих обертонів, то і амплітуда співочої форманти при цьому зростає.

Проведені дослідження довели, що у разі прослуховування записів співочих голосів, з яких відфільтровано високу співочу форманту, у голосі губилася дзвінкість, чистота і ясність тембру, польотність, він звучав глухо і невиразно. Звучання високої співочої форманти в ізольованому виді сприймають як дзвінкий мелодійний звук. Його прослуховують в разі співу будь-якої голосної, підсилюючись під час збільшення гучності. Ці досліди є підставою для встановлення того, що від наявності і амплітуди високої співочої форманти залежить дзвінкість співочого голосу [4].

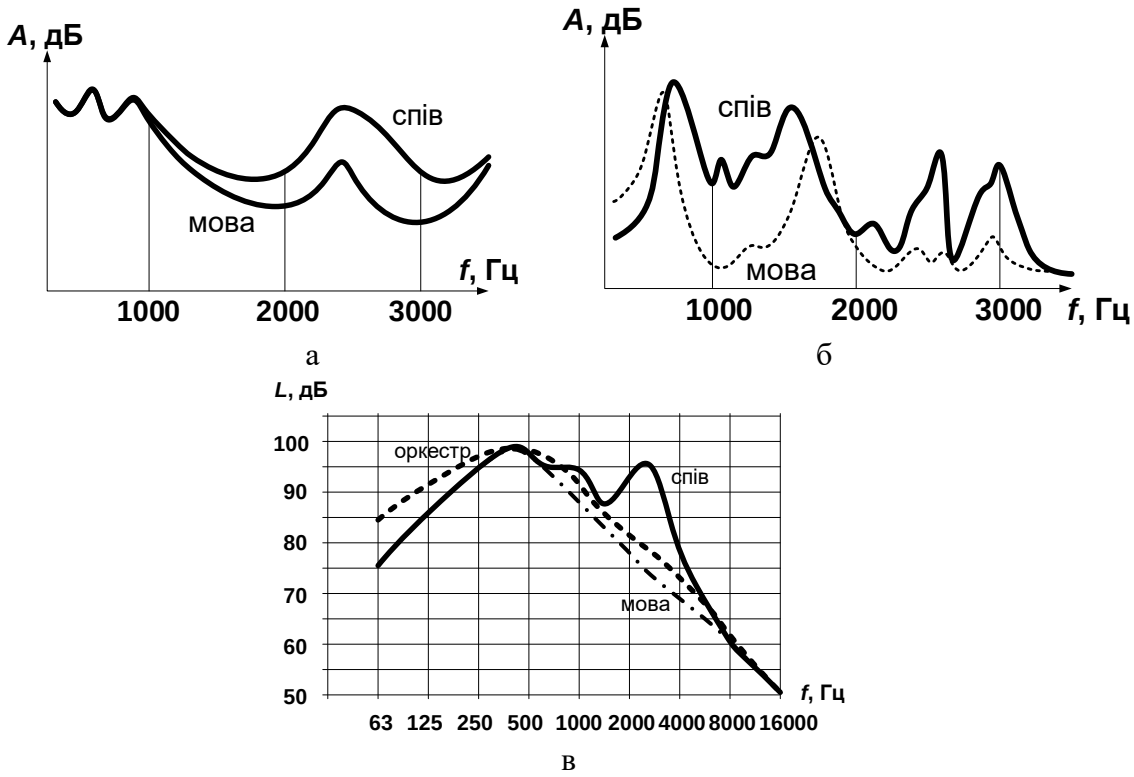


Рис. 4.19. Форма обвідної спектра при мові та співі (*а*), розподіл формант для мови та співу (*б*) та обвідна звуків оркестру, мови та співу (*в*)

Була навіть запропонована кількісна величина «коефіцієнт дзвінкості голосу», який визначали як відношення інтенсивності спектра в області високої співочої форманти до загальної інтенсивності голосу. Проведені вимірювання у різних категорій співаків показали, що у оперних співаків він досягає (33-35)%, у некваліфікованих співаків (5-11)%, у дітей - 3%.

Проте основною причиною застосування співочої форманти у оперних голосах є, напевне, підвищення завадостійкості голосу. Середній рівень оркестру в разі досить гучного виконання у концертному залі становить (90-100) дБ (на 10 м). Створення такого середнього рівня звукового сигналу вище можливостей

людського голосу. Крім того, маскувальна дія оркестру залежить від частотного розподілу спектральних рівнів.

Якщо порівняти обвідну довготривалого спектра для звуків оркестру і для звуків нормальної і вокальної мови (співу) (рис. 4.19,*в*), то можна зробити висновок, що максимум енергії у звуках оркестру знаходиться в області (400-500) Гц, потім її рівень швидко спадає і у області (2,5-3) кГц зменшується на 20 дБ. Приблизно такий же розподіл енергії і в звуках звичайної мови (тільки нижче за рівнем гучності), і тому її повністю маскує звук оркестру. У співочому голосі до 30% енергії може бути зосереджено у співочій форманті у області (2…3) кГц (яка, до того ж, збігається з областю максимальної чутливості слуху).

Така спектральна перебудова голосу дозволяє отримати значний енергетичний виграш, підвищити стійкість і дзвінкість голосу без збільшення енергетичних витрат голосового джерела (не дивно, що знайдений в процесі удосконалення техніки співу прийом отримав таке широке розповсюдження).

Існують види співу, де співочу форманту не використовують, наприклад хоровий спів, спів під гітару, сучасний естрадний спів (де баланс регулюють системою звукопідсилення, і співоча форманта, тобто, підсилення особливої групи обертонів, може бути введена звукорежисером).

Механізм утворення співочої форманти служить предметом численних досліджень. У більшості робіт вважають, що основний спосіб утворення співочої форманти реалізовано завдяки зниженню позиції гортані і значного розширення глотки. Резонанси створеного при цьому надгортанних об'ємів (2,57-4,83 $см^3$) підсилюють високочастотні гармоніки у спектрі голосового джерела в області (2,5-3,5) кГц.

Наступною характерною особливістю акустичних властивостей вокальної мови є здатність до підстроювання формант.

У співі використовуються значення фундаментальної частоти значно вище, ніж у звичайній мові. У звичайній мові середня частота складає 110 Гц для чоловічого голосу і 220 Гц для жіночого (максимальна межа 200 Гц і 350 Гц відповідно). У той же час при співі у верхніх регістрах значення фундаментальної частоти можуть дорівнювати: для сопрано 1319 Гц (E6), для тенора 523 Гц (C5). Тому у мові перша форманта знаходиться зазвичай вище на частотною шкалою, ніж фундаментальна частота, але у співі перша форманта виявляється нижче її в багатьох випадках. При цьому здатність вокального тракту підсилювати звук на її частоті не використовуватиметься, оскільки ніякої енергії від голосового джерела не надходить [8].

Відкриття губ не збільшує ефективність випромінювання, адже джерело не виробляє більше енергії, але це зсуває форманти, що змінює перерозподіл енергії в певних діапазонах і покращує завадозахищеність.

Підстроювання формант під першу фундаментальну частоту дозволяє отримати виграш за звуковим тиском до 28 дБ. Це підсилення звуку є, як і «співоча» форманта, чисто резонансним процесом і відбувається без збільшення витрат енергії від вокального джерела (голосових зв'язок). Для більшості голосних значення першої форманти лежить в області 300…800 Гц. Якщо фундаментальна частота перевищує 500 Гц і відбувається підстроювання формант (тобто,

зближення, кластеризація формантних частот), то загальна гучність підсилюється, оскільки перша і друга форманти, де має місце максимальне підсилення звуку, зсуваються за частотним діапазоном і зближуються одна з одною, тому високі жіночі голоси стають добре чутні навіть на тлі гучного оркестру (тобто, досягають такого ж ефекту, як і у чоловічих і низьких жіночих голосах, де використано інший механізм для цих цілей - співоча форманта).

У співі в разі підвищення висоти тону використовують ще один спосіб, який отримав назву «модифікація якості голосних».

Модифікація якості голосних: як спів з підстроюванням формант, так і спів з співочою формантою вимагає переналаштовування вокального тракту - розширення глотки, зниження гортані тощо, що, природно, впливає на дві нижчі формантні частоти, які критичні для ідентифікації голосних. Порівняння всіх формантних частот для мови і співу (рис. 4.19,*а*) доводить, що у них друга і третя форманти значно різняться (друга форманта під час співу нижче за частотою), що впливає на розбірливість голосних. Тому піл час співу використовують спосіб модифікації голосних (наприклад, (е) замінюють на (а) тощо), щоб перейти на голосні звуки, формантні області яких ближче до областей, які формуються у вокальній мові з високою співочої формантою.

Інтегральні характеристики вокальної мови: якщо виконати статистичне оброблення спектрів вокальної мови більшої кількості співаків з їх індивідуальними формантами, то у середньому отримано криві, які наведено на рис. 4.20, на яких чітко видно три області максимумів (чого немає на узагальненій спектральній кривій для мови). Найбільших рівнів досягає у чоловічих голосах третя область - це висока співоча форманта, яку вже було описано вище.

Першу область називають першою (нижньою) співочою формантою, вона визначає м'якість, масивність голосу; друга область, яку називають артикуляційною (фонетичною) формантою, нижче за рівнем і збігається з другою формантою звуку «а» (мабуть, під час співу всі голосні стають ближче до «а» за артикуляцією). Відмінності між басами, баритонами і тенорами чітко видно стосовно розташування цих трьох максимумів (табл. 4.3)

У жіночих співочих голосах також чітко видно три стабільні області максимумів.

Перша (низька) співоча форманта пов'язана з резонансами всього ротового тракту від гортані до губ, зміщення її у високочастотну область для різних типів голосів пов'язано з різницею у довжині тракту, який, за даними вимірювань у більшості випадках становить (233…250) мм для басів, (215…240) мм для баритонів, (190…220) мм для тенорів, (160…180) мм для сопрано. Істотну роль в підсиленні обертонів в цій області мають також резонанси грудного (трахейно-бронхіального) резонатора, які знаходяться у області (470…610) Гц [10].

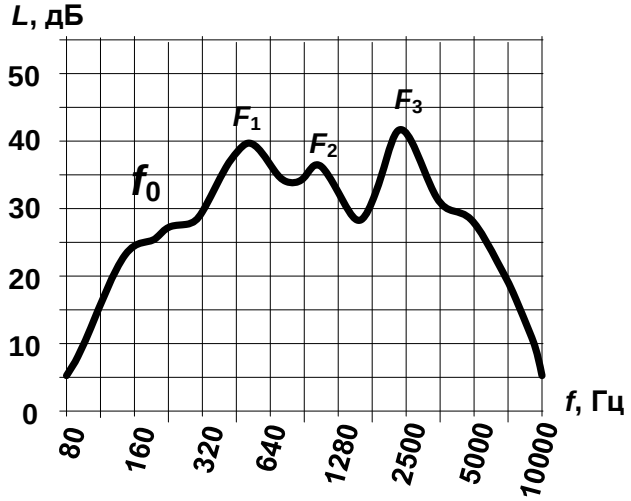


Рис. 4.20. Три області максимумів на обвідній вокальної мови для чоловічих голосів

Таблиця 4.2. Відмінності між басами, баритонами і тенорами за частотними максимуми

Тип голосу	F_1 Гц	F_2 Гц	F_3 Гц
Баси	380-540 (сер. 460)	760-1100 (сер. 930)	2100-2500 (сер. 2300)
Баритони	450-540 (сер. 495)	1100	2500
Тенори	540-640 (сер. 590)	1300	2500-3000

У звичайній мові під час проголошення різних голосних формантні області весь час зміщуються в процесі мовного потоку, ця варіабельність забезпечує розбірливість мови. Однією з вимог до хорошого співочого голосу є рівність тембру, оскільки якщо у співі вимовляти голосні, як і у мові, то має місце «строкатість» співу. Ця вимога зумовлює вирівнювання голосних: мабуть, в початковий період атаки звуку встановлюються всі форманти для впізнавання звуків, потім голосоутворюючий апарат перебудовується для співу.

Розбірливість вокальної мови: спектральна перебудова голосу для підвищення його завадостійкості неминуче призводить до зміни перших формантних областей (за частотою, амплітудою, добротністю тощо), а оскільки саме перші дві формантні області у значній мірі впливають на розпізнавання звуків, то це викликає погіршення розбірливості вокальної мови. Хоча головне завдання вокальної мови полягає у передаванні емоційно-естетичної інформації, передавання семантичної інформації (тобто, розуміння сенсу змісту) також має істотне значення (у всякому разі в класичній вокальній культурі).

Статистичне оброблення великої кількості випробувань дозволила виявити деякі загальні закономірності: середня розбірливість вокальної мови виявилася у всіх випробовуваних (співаків) нижче, ніж розбірливість у звичайній мові (у них же), відсоток впав у середньому з 87% до 70,7%. Причому якщо у чоловіків ця різниця становила 86,7% і 75%, то у жінок 88% і 65%, тобто, розбірливість жіночих голосів в вокальній мові падає набагато значно, що, очевидно, пов'язано з висотою їх голосу.

Область максимальної розбірливості відповідає частоті основного тону для чоловічих голосів у області (110…262) Гц і для жіночих голосів в області (330…524) Гц. У разі підвищення частоти основного тону до 500 Гц розбірливість у чоловічих голосах падає, але все-таки зберігається на рівні приблизно 50%; в жіночих голосах у разі підвищення основного тону до 1048 Гц розбірливість стає дуже низькою.

Таким чином, зона хорошої розбірливості знаходиться в середній частини діапазону для різних типів голосів. Вона трохи падає до низьких частот і значно - до високих, причому у жіночих голосів більшою мірою, ніж у чоловічих.

Існує кілька основних причин цього явища: у разі значного підвищення частоти основного тону залишається занадто мало обертонів, які потрапляють в чутний діапазон, це змінює тембр звуків і ускладнює їх впізнавання; основний тон потрапляє у область за межами формантних частотних областей, і співак намагається зробити підстроювання формант, як уже було зазначено вище, але зсув перших формант різко погіршує розпізнавання звуків мови і, відповідно, розбірливість; більше 30% енергії концентровано у області співочої форманти - відповідно знижується рівень перших формант, що також позначається на чіткості.

Нарешті, в вокальній мові особливо сильно виявляється різниця за рівнем і за тривалістю між голосними і приголосними звуками: рівень голосних може досягати (110…115) дБ, рівень приголосних (40…70) дБ, що призводить до явищ маскування приголосних. Оскільки приголосні передають основну семантичну інформацію, то значна втрата розбірливості у вокальній мові обумовлена також нечіткою артикуляцією приголосних, що важливо враховувати для запису і оброблення вокальної мови. У цілому, якщо поставлено завдання передавання змістовної інформації у співі, то краще, якщо твір написаний для середніх (і низьких) регістрів. Під час співу на високих регістрах передавання змістовної складової інформації є обмеженим; як основне виконують завдання передавання естетичної інформації.

Вібрато і тремоло. Одним із засобів музичної виразності співу є використання у процесі виконання різних видів модуляції (зміни) параметрів звукового сигналу. Такі зміни сприймають як темброву особливість виконання, що надає йому жвавість, польотність, приємність тощо. Модуляцію параметрів широко використовують не тільки в співі, а й під час виконання музики на різних інструментах: скрипці, віолончелі, духових інструментах тощо [10].

Спектральний аналіз записів голосів оперних співаків доводить, що найчастіше у їх співі використано частотну модуляцію, тобто, вібрато, яка супроводжується невеликою амплітудною модуляцією. У деяких інших видах співу (поп-музиці, народному співі тощо) іноді використовують амплітудну модуляцію, тобто, тремоло. У сучасній рок-музиці, де виконання йде з величезним напруженням зв'язок, модуляція (вібрато і тремоло) практично відсутня, звук виходить «прямий».

Аналіз особливостей модуляції у голосах видатних співаків дозволив зробити такі висновки:

- у оперному співі видатних майстрів використано в основному частотну модуляцію з частотою (5,5…7) Гц і глибиною модуляції ± 50 центів;

- важливою особливістю голосу майстрів оперного вокального мистецтва є достатня періодичність (ритмічність) вібрато; для голосів непрофесійних співаків характерний неритмічний характер вібрато, що сприймають як нестійкість, невпевненість співу;

- значення частоти модуляції є характерною особливістю даного співака, хоча вона (так само, як і глибина модуляції) може злегка видозмінюватися залежно від висоти основного тону, сили голосу, типу голосної, тривалості її звучання і ряду інших чинників.

Слід зазначити, що такі параметри вібрато, як частота і глибина модуляції, можуть змінюватися в залежності від емоціональної налаштованості співака.

Частоти формант для вібрато не зміщені, тому у разі зсуву частот обертонів з частотою модуляції відбувається збільшення або зменшення їх амплітуди - залежно від того, далі або ближче вони переміщаються до формантної області, а оскільки загальна гучність випромінюваного сигналу залежить у основному від амплітуд обертонів всередині формантних областей, то відбувається зміна гучності сигналу з частотою модуляції. Таким чином, для частотної модуляції, тобто, застосування вібрато під час співу, відбувається і амплітудна модуляція сигналу, але вона не так значна.

Основні переваги використання вібрато полягають перш за все у поліпшенні естетичного сприйняття співу, при цьому звук має більш живий тембр (за рахунок збагачення спектру при модуляції). Крім того, існують і об'єктивні причини застосування цього прийому при співі, основні з яких такі [8]:

- застосування вібрато зменшує вимоги до точності настроювання фундаментальної частоти, тобто, висоти тону. Дослідження довели, що хоча в разі модуляції і змінюється основна частота (а отже, і висота тону), але якщо частота модуляції лежить в межах (6…7) Гц і глибина модуляції ± 40 центів, то слух як би усереднює значення частоти і сприймає деяку середню висоту тону. Якщо частота модуляції нижче 5 Гц, виявляються чутними коливання висоти, голос здається дуже напруженим (старечим). Якщо частота модуляції вище 7 Гц, голос сприймається нервовим. Таким чином, діапазон зміни частоти модуляції (6…7) Гц є оптимальним;

- використання вібрато зменшує вимоги до точності настроювання інтервалів і допомагає приховати биття (до яких слух дуже чутливий), що виникають в разі неточного налаштування голосів;

- застосування вібрато підвищує завадозахищеність голосу, оскільки, як показали результати досліджень, максимальна здатність чути частотно-модульовані сигнали співпадають з областю (5…7) Гц, а це дозволяє краще виділяти цей сигнал на тлі завад;

- вібрато підвищує розбірливість звуків, особливо у співі на високих діапазонах, оскільки зсув обертонів за частотою, як було зазначено вище, призводить до збільшення або зменшення їх амплітуд залежно від їх позиції відносно формантних частот, що допомагає також ідентифікувати формантні області (а саме вони є основою розпізнавання звуків).

Таким чином, вибір частоти модуляції в межах (5…7) Гц є найкращим чином узгодженим з можливостями слухової системи (з одного боку, максимальна

чутливість до цієї області частот модуляції виникла у неї, напевно, у процесі сприйняття мови; з іншого боку, саме ці частоти модуляції найлегше можуть бути реалізовані м‘язовим апаратом людини).

Слід зазначити, що оскільки вібрато і тремоло є засобами для виділення голосу (залучення до нього уваги), то використання його у хоровому співі небажано (це порушує злагодженість ансамблю).

Регістр - фонаційний ряд частот, у якому всі звуки звучать однаково за тембром (при цьому, мабуть, вони і створені подібним чином). Перехід від одного регістра до іншого показує зміни у фонаційній техніці, тобто, зміни взаємодії м'язів гортані і голосових зв’язок. Зміну регістрів відчувають як зсув у фонаційній частоті (висоті тону) і як зміну тембру. При цьому відбувається і зміна інших акустичних характеристик звукового сигналу (зміна форми спектральної огинаючої, структури атаки і спаду тощо).

Для класифікації і назв регістрів в різних вокальних школах використовують абсолютно різні поняття. В італійській школі, наприклад, виділяють три регістра: грудний (chest), середній (middle), головний (head) у жіночому голосі або грудний (modal, normal), головний (head) і фальцет (falsetto) в чоловічому голосі. Зазвичай прийнято вважати, що механізми голосоутворення сильно розрізняються у нижніх («важких») і верхніх («легких») регістрах; середні регістри комбінують якості їх обох.

Окремі регістри перекриваються по частоті. Наприклад, у жіночих голосах області перекриття: грудний - середній (chest-middle) 400 Гц, середній - головний (middle-head) 660 Гц. У чоловічих голосах перша зона перекриття (200…350) Гц.

Механізм утворення регістрів лежить в зміні властивостей голосового джерела (гортані і голосових зв'язок). На коливання зв'язок впливають аеродинамічні фактори (величина підглоткового тиску), м'язові фактори, що залежать від натягу основних видів м'язів: вокальних, щитовидно-перстневидних, щитовидно-черпаловидних тощо, а також пружно-механічні властивості всіх трьох шарів самих голосових зв'язок.

Частота фонації залежить від натягу і маси зв'язок, тому у співі на низьких частотах зв'язки розслаблені, товсті і короткі, а на високих - тонкі, довгі та напружені. Підвищення основної частоти майже лінійно пов'язано з подовженням зв'язок.

Акустичні характеристики вокальної мови (співу) у зв‘язку з зазначеними вище особливостями звукоутворення відрізняються від характеристик звичайної мови:

- діапазон відтворюваних частот для основних (фонаційних) частот залежить від типу голосу: бас - 82,4 Гц (E2) … 329,6 Гц (F4); баритон - 110 Гц (A2) … 415,3 Гц (G'4); тенор - 130,8 Гц (C3) … 523,25 Гц (C5); мецо-сопрано - 207,7 Гц (A'3) … 932,3 Гц (B5); сопрано - 261 Гц (C4) … 1046,5 Гц (C6); колоратурне сопрано - 61,6 Гц (C4) … 1318,5 (E6). Слід враховувати, що це середньостатистичні дані, при цьому є значні індивідуальні відмінності. Діапазон частот з урахуванням обертонів розширено до (8…10) кГц;

- динамічний діапазон при співі значно ширше, ніж для звичайної мови. Оперні співаки можуть розвивати рівні звукового тиску до 100 дБ/м і навіть до 120 дБ/м;

при тому, що тиск в гортанній порожнині може досягати значень (2…3) кПа, ККД збільшується. Динамічний діапазон при цьому розширено до 70 дБ. В середньому динамічний діапазон для вокальної мови становить (50…60) дБ;

- перехідні процеси істотно залежать від виду атаки («жорстка» або «м'яка») і способу звукоутворення. В середньому час атаки може змінюватися від 30 мс до 300 мс;

- характеристика спрямованості змінюється зі збільшенням частоти аналогічно зміні для мовного сигналу;

- тембр вокальної мови має величезну емоційну виразність і можливості.

Контрольні запитання.

1. Які питання вивчає музична акустика?
2. Як особливості сприйняття музичних звуків органом слуху людини?
3. Надайте визначення музичної шкали, музичного інтервалу, музичного тону.
4. Надайте визначення музичних інтервалів та наведіть відношення частот для різних музичних інтервалів.
5. Надайте пояснення рівномірно темперованої шкали та зазначте інтервальний коефіцієнт.
6. Яка частота відповідає стандартній висоті тону для настроювання інструментів?
7. Наведіть закономірності сприйняття музичних та мовних сигналів людиною.
8. Надайте визначення тембру звуку, тембрального забарвлення звучання та наведіть приклади формулювання тембру звучання музичного інструменту.
9. Зазначте, як наявність або нестача окремих спектральних складових впливає на тембральне забарвлення звучання.
10. Як змінюється тембр звучання від гучності та транспонування спектральних складових за частотою?
11. Які часові інтервали, їх визначення та тривалість характерні для перехідних процесів звукоутворення різних інструментів?
12. Наведіть приклади структури перехідних процесів різних музичних інструментів.
13. Які основні фізичні ознаки визначають тембр звучання і його зміни у часі?
14. Які складові частини музичного інструменту характеризують його як механіко-акустичний перетворювач?
15. Наведіть класифікацію музичних інструментів за типами вібраторів.
16. Наведіть виконавську класифікацію музичних інструментів.
17. Наведіть приклади та способи звуковидобування духових музичних інструментів.
18. Наведіть приклади та способи звуковидобування струнних музичних інструментів.
19. Наведіть приклади та способи звуковидобування ударних музичних інструментів.
20. Наведіть особливості звучання, основні акустичні характеристики та процес звуковидобування роялю.
21. Зазначте основні акустичні характеристики різних духових музичних інструментів.
22. Зазначте основні акустичні характеристики різних струнних музичних інструментів.
23. Зазначте основні акустичні характеристики ударних музичних інструментів.
24. Наведіть приблизний склад, розташування музичних інструментів в оркестрі.
25. Наведіть приблизні частотні діапазони різних музичних інструментів оркестру.
26. Наведіть спектральний розподіл рівнів акустичної потужності для різних груп музичних інструментів в оркестрі.
27. Наведіть графічно структуру мовного апарату людини та зазначте особливості звукоутворення.
28. Опишіть формування звуків мови мовним апаратом людини.
29. Надайте визначення таким термінам: фонема, артикуляція, форманта, фонація.
30. Як виглядає форма мовного сигналу людини, що таке основний тон голосу та в яких межах

лежить частота основного тону?

31. Як виглядає форма спектру мовного сигналу і чим визначено сумарну частотну характеристику мовних звуків?
32. Як утворено різні звуки мови (голосні, приголосні, глухі) в мовному апараті людини?
33. Зазначте основні акустичні характеристики мови.
34. Зазначте особливості й відмінності вокальної мови від звичайної мови.
35. Надайте визначення таким термінам: спів, співоча форманта, модифікація якості голосних, вібрато, тремоло, регістр.
36. Як відбувається формування співочої форманти в вокальній мові?
37. Зазначте основні акустичні характеристики вокальної мови (співу).
38. Як змінює звучання співу застосування вібрато і тремоло?

5. СИСТЕМИ ЗВУКОПЕРЕДАВАННЯ ТА ЗВУКОВІДТВОРЕННЯ

Ключові слова: акустичні умови, баланс гучності, багатоканальна система, бінауральна, декодувальний, завади, звукова панорама, звуковий процесор, звуковідтворення, звукопередавання, кодувальний, лівий канал, монофонічна, музична рівновага, музичний баланс, одноканальна, ознаки якості, об'єктивний контроль, панорамне кодування, псевдостереофонічна, правий канал, прозорість звучання, просторове враження, просторовий, роздільність звучання, синтезатор просторового звучання, стереоамбіофонічна, стереофонічна, стереофонічне враження, суб'єктивний контроль, тембр, тембральне забарвлення, техніка звуку, тильний, удаване джерело звуку, фронтальний, художня якість, якість звуковідтворення, Dolby.

5.1 Якість звуковідтворення в системах звукопередавання

Високоякісне звуковідтворення – основна вимога, що висуває будь-який слухач звукових програм радіомовлення і телебачення. У повсякденному житті ми чуємо звуки, які надходять з усіх боків - зверху, знизу, ліворуч і праворуч. Наш слуховий апарат може більш-менш точно визначати напрямок на джерело звуку і відстань до нього. Тому цілком зрозуміле бажання, щоб радіоприймачі, телевізори, магнітофони, музичні центри, комп'ютери та інші пристрої відтворення звуку максимально точно відтворювали реальне (або схоже на реальне) звучання, а ще краще – тривимірне (3D) звукове поле.

Звуку у телебаченні та у мультимедійній апаратурі традиційно приділяють менше уваги, ніж зображенню. У результаті склалася ситуація, коли звуковий супровід телепрограм за своїм рівнем якості значно відставав від сучасних систем звукотехніки, особливо за критерієм об'ємного звуку. Монофонічні системи передавання звуку вже не задовольняють вимогам сучасного звуковідтворення. Багато споживачів мають чотири- або шестиканальні системи Dolby Surround і Dolby Digital, і тому їх вже не влаштовує і стереофонічний цифровий звук цифрового телебачення та відеотехніки. У зв'язку з цим актуальною стала задача впровадження багатоканальних систем звукопередавання або звукового супроводу в телебаченні та відеотехніці. На думку багатьох експертів, для успіху цифрового телебачення та відеотехніки багатоканальний звук може мати навіть більше значення, ніж високоякісне зображення [12].

Якість звучання у разі звуковідтворення формує сукупність відчуттів, що відрізняють один спосіб звукопередавання або звуковідтворення від іншого. Якість звучання визначають характеристиками якості звуковідтворювальної апаратури й акустичними характеристиками приміщення, де відбувається звуковідтворення.

У великих приміщеннях, обладнаних акустичними системами, звукові сигнали до слухача приходять різними шляхами. Насамперед приходить пряма звукова хвиля, тому що вона поширюється найкоротшим шляхом. Слідом за нею надходить множина звукових хвиль, відбитих від поверхонь приміщення. Сукупність відбитих звукових хвиль утворює реверберaційний процес у приміщенні. Цей реверберaційний процес збагачує звучання. Завдяки йому звук здається більш багатим у тембральному відношенні і тонше нюансованим. Реверберaційний процес приміщення також визначає і слухову оцінку його акустичних властивостей – властиву приміщенню гучність та специфічне забарвлення звучання.

Реверберацiйний процес у приміщенні має складну спектральну і часову структуру. Крім того, він носить просторовий характер. Відбиті звукові хвилі надходять до вух слухача з різних напрямків. Просторовість приходу відзвуків зменшує їх взаємна маскуючи дія один на одного. Наслідком цього є поліпшення умов для перетворення цієї сукупності просторових сигналів у слуховій системі людини, а це, у свою чергу, поліпшує умови сприйняття акустичного обладнання приміщення та властивого йому забарвлення і гучності звучання, сприяє більш точній оцінці тембрів інструментів і голосів. Важливо відзначити і те, що складні звукові сигнали на лівому і правому вухах слухача (Л, П) не тотожні. Вони мають різні часові структури, різні просторові і спектральні особливості.

Бінауральна пара звукових сигналів визначає всю сукупність відчуттів, властивих природному слуханню. Основними відчуттями або ознаками якості звучання є такі [13]:

1. Просторове враження, об'ємність, протяжність звучання. Відчуття розташування окремих джерел звуку оркестру в різних місцях простору, як за фронтом, так і за глибиною. Місце розташування джерел звуку - музичних інструментів, може бути досить чітко локалізоване у просторі, однак число одночасно сприйманих фронтальних напрямків і звукових планів за глибиною невелике. Звичайно, у тому або іншому випадку – не більш двох-трьох.

2. Прозорість або роздільність звучання. Прозорість звучання визначають здатністю слухача виділяти і роздільно сприймати інструменти, голоси або їх групи на фоні звучання ансамблю.

3. Природність і багатство тембрів інструментів і голосів.

4. Музична рівновага, баланс гучностей окремих складових частин звукового образу.

5. Сприйняття акустичної обстановки приміщення, концертного залу, властивих йому особливостей звучання - гучності, теплоти, м'якості, світлості, дзвінкості тощо. Кожна така ознака якості містить звичайно трохи більш простих відчуттів.

Оцінка якості звучання – трудомісткий і відповідальний процес.

Достатньо часто в основі оцінки якості звучання лежить ESP-модель (Emotional Response (емоційна реакція), Sensation (відчуття), Phisicale characteristics (фізична характеристика) [14].

Відповідно до неї процес слухового сприйняття умовно розділяють на два функціональні етапи – аналіз і синтез. Схему цього процесу наведено на рис. 5.1. Ліворуч стрілками показано звукову дію. Далі наведено етап аналізу сукупності відчуттів, тобто множини простих відчуттів, об'єднаних у групи 1, 2, 3 тощо Кожну таку групу утворюють відчуття, між якими існує кореляційний зв'язок. Ці групи відчуттів утворюють основні статистично незалежні ознаки якості, властиві звучанню даного вигляду. Число основних статистично незалежних ознак якості звичайно невелике – не більше трьох, чотирьох. Саме цей обмежений набір основних ознак якості і визначає зрештою його узагальнену оцінку.

На етапі синтезу виділені основні відчуття об'єднують у єдиний звуковий образ і формують реакцію слухача на початкову звукову дію. Зазначені процеси аналізу і синтезу й лежать у основі естетичного сприйняття тієї змінюваної у часі і

просторі "живої" звукової картини.

Для узагальненої оцінки якості звучання Q в психофізиці досить часто використовують лінійну багатовимірну модель вигляду

$$Q = \sum_{i=1}^{k} s_i F_i ,$$

де F – величини основних статистично незалежних відчуттів або ознак якості, що оцінюють найчастіше у балах спеціальних психологічних (психофізичних) шкал; s – вагові коефіцієнти, які визначають значущість кожного основного відчуття у разі формування загальної оцінки якості звучання.

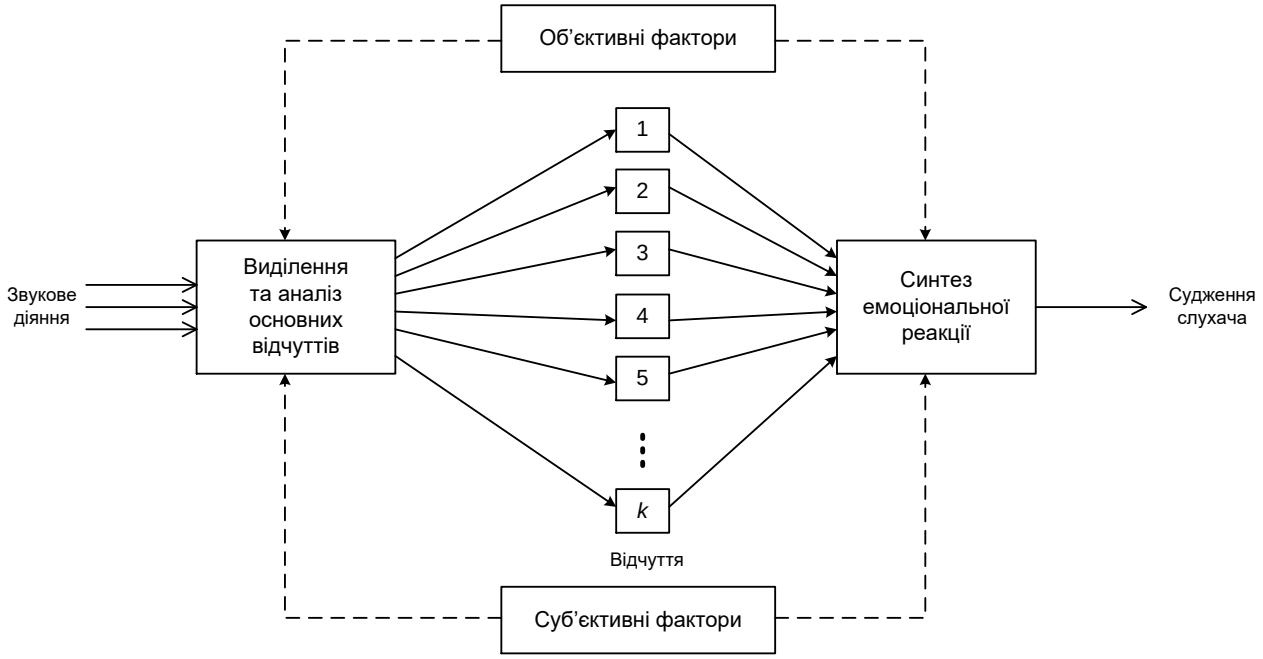


Рис. 5.1. Узагальнена модель формування емоційної реакції слухача на звукову дію

Розмірність простору даної моделі дорівнює числу k основних відчуттів. Величини цих статистично незалежних відчуттів відкладають уздовж відповідних їм осей багатовимірної ортогональної системи координат. У даному випадку узагальненій оцінці якості звучання Q відповідає точка багатовимірного простору.

Кожному виду звучання (моно-, стерео-, псевдостерео-, квазістерео-, стереоамбіофонічному тощо) відповідає свій набір основних статистично незалежних ознак якості і свої значення вагових коефіцієнтів в моделі узагальненої оцінки якості звучання. Вид звучання – моно-, стерео-, квазістерео- тощо — визначено структурою системи звукопередавання. Окремі пристрої системи звукопередавання можуть вносити визначені за величиною спотворення, які змінюють лише основні ознаки якості і вагові коефіцієнти, унаслідок чого змінюється і узагальнена оцінка Q якості звучання. Все це утрудняє оцінку потенційних можливостей досліджуваної системи звукопередавання. З цієї причини пристрої, що входять до складу системи звукопередавання, не повинні вносити спотворення, що лежать вище за пороги їх слухової помітності, якщо

йдеться про оцінку потенційних можливостей останньої [13].

Якість звучання оцінюють звичайно на експертизах найчастіше методом парних порівнянь. Існують два підходи до проведення експертиз. Якість звучання оцінюють або за ознаками (у даному випадку експерт вписує в анкету відчуття, що виникають у нього при сприйнятті вказаного виду звучання, наприклад, у термінах, сенс яких потім уточнюють в індивідуальній бесіді), або оцінюють якість звучання у цілому за перевагою, не розділяючи його на окремі ознаки (експерт відзначає в анкеті, яке звучання з тих, що прослуховували, він вважає за краще).

Перевагою називають виражене у відсотках число експертопоказань за дану систему (у разі порівняння з іншою) до загального їх числа. Для кількісної оцінки якості звучання в цілому або величин відчуттів використовують психофізичні шкали і особливі методи оброблення результатів експертиз. На результати експертиз впливають: звуковий матеріал, склад експертної групи, умови і методика проведення експертизи, шкали оцінки, коректність математичного оброблення результатів експертних оцінок.

Якість звуковідтворення залежить від якості програми, що відтворюють. В свою чергу, якість записаного програмного матеріалу визначено не тільки якістю технологічного устаткування, але, насамперед, акустичними властивостями, наприклад, студії звукозапису. Основні якісні обмеження у використанні студії визначають, головним чином, її розміри й акустичні властивості. Просторовість звучання в таких студіях, як правило, створено штучно із застосуванням спеціальних технічних засобів. У студії, яка має невеликі розміри приміщення, нажаль дуже важко якісно зробити запис звучання музичних інструментів з великою щільністю й амплітудою низькочастотних спектральних складових.

Таким чином, найважливіша умова подальшого підвищення якості звучання - це передавання просторової інформації з найбільшою точністю й у максимально можливому обсязі, причому необхідно, щоб просторові характеристики системи звукопередавання були адекватні можливостям просторового слуху людини під час локалізації діючих джерел звуку.

Критерії оцінювання якості звукових фонограм

Для контроля якості фонограм використовують суб'єктивні та об'єктивні методи, які можуть застосовувати як у оперативному, так і неоперативному режимах.

Оцінювання якості звукових фонограм передбачає аналіз фонограми за показниками якості з такими напрямами [14]:

1. Суб'єктивний контроль якості фонограми, тобто оцінка акустичних параметрів звукових фонограм на виході тракту перетворення-відтворення у разі прослуховування їх з використанням високоякісної звуковідтворювальної апаратури.

2. Об'єктивний контроль якості фонограм, відтворених відповідною звуковідтворювальною апаратурою, тобто контроль акустичних сигналів технічними засобами.

3. Об'єктивний контроль якості електричного сигналу звукової фонограми, тобто на виході звуковідтворювального тракту до акустичних систем.

Тобто можна узагальнено стверджувати, що для оцінки якості фонограм існують такі методи оцінки - метод суб'єктивної оцінки якості звучання фонограм, метод об'єктивної оцінки якості звучання, метод об'єктивної оцінки параметрів сигналу фонограм.

Метод суб'єктивної оцінки якості звучання, заснований на суворій конкретизації окремих параметрів, що визначають у сукупності якість фонограми. Оцінці підлягають як технічні, так і художні показники, що розглядають у сукупності і взаємозв'язку один з одним. Суб'єктивний контроль проводять в спеціалізованих приміщеннях, в яких передбачено відповідні акустичні умови на стандартних гучномовних системах або контрольних агрегатах. Гучномовні системи можуть бути ближньої, середньої і дальньої зони. При цьому вважають, що в ближньому полі неможливо адекватно контролювати НЧ-складові звучання. У деяких випадках суб'єктивний контроль проводять на стереотелефонах, однак вони не завжди точно передають особливості звучання, звук здається більш прозорим, зміщується локалізація, змінюється тембр.

Метод об'єктивної оцінки звучання передбачає вимірювання об'єктивних параметрів акустичного сигналу під час відтворення фонограми. Об'єктивний контроль – це вимірювання зіставних суб'єктивних параметрів з об'єктивними характеристиками, тобто вимірювання спеціалізованими приладами акустичних характеристик.

Метод об'єктивної оцінки параметрів сигналу фонограм дозволяє оцінити технічні характеристики сигналу у разі проходження його трактом звуковідтворення.

Суб'єктивні методи передбачають слуховий контроль звучання фонограм з високоякісних гучномовців у спеціалізованому, акустично оформленому приміщенні - контрольній студії і, найголовніше, їх проводять із залученням експертів. Такі методи вимагають достатнього фінансування і багато часу на їх реалізацію, хоча без них обійтись не можна.

Для проведення об'єктивного контролю якості у реальних умовах використовують апаратні і програмні засоби вимірювання параметрів фонограм, а також розроблені інструментальні методи, звані моделями якості. Такі методи передбачають наявність спеціалізованого програмного забезпечення (ПЗ), призначеного для автоматичного визначення якості сигналу, який відтворено з фонограми.

Основними засобами, які використовують звукорежисери у суб'єктивному контролі якості - це гучномовці, акустичні системи й навушники (стереотелефони), а у об'єктивному контролі - це індикатори рівня, спектроаналізатори, візуальне відображення сигналограми і інші вимірювальні засоби, вбудовані, як правило, у ПЗ роботи із звуком.

Всі сучасні методи контролю якості фонограм вимагають або достатньої підготовки до проведення експертизи, в разі суб'єктивного контролю, або наявності спеціалізованих ПЗ для виконання об'єктивного контролю.

Коректна оцінка якості звучання фонограми давно є свого роду проблемою для аудіо-інженерів і звукорежисерів. Дана проблема полягає в тому, що до теперішнього часу не існує чіткої кореляції між об'єктивними параметрами

звукового тракту, самого сигналу і суб'єктивним сприйняттям звукового сигналу.

Уміння професійно оцінити якість фонограми - одне з найважливіших умов успіху роботи звукорежисера. При цьому слід прагнути до того, щоб оцінки були за можливістю об'єктивні і однозначні. Технічну якість фонограм має обов'язково проаналізовано разом з естетичною оцінкою, тобто, суб'єктивним сприйняттям художньої цінності фонограми. Оцінку якості звучання фонограм потрібно проводити в спеціальному приміщенні з необхідними акустичними умовами.

Суб'єктивний експертний контроль передбачає оцінювання якості звучання прослуховуванням фонограми з високоякісних гучномовців у акустично оформленому приміщенні і з залученням не менше 5 експертів.

Суб'єктивні характеристики якості нових звукових фонограм визначено міжнародними стандартами (згідно з протоколом OIRT (Асоціація організацій мовлення країн РЕВ), аналогічний оцінним протоколам CCIR (нині ITU) і Міжнародного звукотехнічного суспільства AES - AES20-1996, IEC 268-5 тощо. OIRT (Organisation Internationale de Radiodiffusion et de Télévision), ITU-R (International Telecommunication Union - Radio communication Sector4), EBU (European Broadcasting Union)).

Оцінку якості проводять за 5-бальною системою і узагальнено її може бути описано такими значеннями: 5 (відмінно) - фонограма досить хорошої якості, без істотних недоліків, придатна для мовлення; 4 (добре) - фонограма хорошої якості, з незначними недоліками, придатна для мовлення; 3 (задовільно) - фонограма зі значними технічними або художніми недоліками, може бути прийнята умовно до разової передачі; 2 (незадовільно) - фонограма поганої технічної якості, що являє документальну цінність; 1 (погано) - фонограма, що має суттєві недоліки, непридатна для мовлення.

Під час оцінювання якості на запис або фонограму заповнюють відповідні протоколи (табл. 5.1). Експерти виставляють, кожен окремо, біля параметрів ту чи іншу оцінку. У нижній частині оціночного протоколу ставлять загальну оцінку ("Загальне враження"). Потім за протоколами всіх учасників експертизи суб'єктивні думки - оцінки статистично обробляють, у результаті чого виставляють об'єктивну оцінку, як за окремими параметрами, так і загальну щодо придатності фонограми в цілому.

Кількість і назви критеріїв суб'єктивної оцінки якості фонограм може бути різними. Але у більшості випадків суб'єктивні характеристики якості фонограм припускають оцінку звучання фонограм за такими основними критеріями: просторове враження, прозорість, музичний баланс, тембр, завади, художня якість (виконання), інструментування (аранжування), звукорежисерська техніка (техніка приймання звуку), стереофонічний ефект, загальне враження [14].

Під поняттям просторового враження або просторовості звучання фонограм, в першу чергу, аналізують загальну акустичну атмосферу у приміщенні, де проводився запис. Просторовість характеризує звукову картину за шириною (стереовраження) і за глибиною (наявність одного або декількох планів - багатоплановість), формує відчуття відстані від слухача до інструменту або групи інструментів. На просторовість у записі впливають ранні відбиття сигналу і реверберація, її час і рівень.

Під прозорістю розуміють деталізацією, добе розрізнення звучання окремих інструментів в оркестрі, чутність тембру кожного інструмента, ясність музичної фактури і розбірливість тексту, читаність окремих інструментів у загальній масі джерел звуку. Прозорість безпосередньо пов'язана з акустичною обстановкою приміщення запису з особливістю розміщення інструментів у загальній звуковій картині під час запису. Прозорість також залежить від музичного та тонального балансів, від інструментальної фактури твору і, звичайно, від якості виконання.

Таблиця 5.1. Випробувальний протокол для суб'єктивної оцінки якості записів

Експерт, група прослуховування					Випробувальний протокол №	Дата
Назва						Стерео
	5	4	3	2	1	Примітка
1. Просторове враження						
2. Прозорість						
3. Музичний баланс						
4. Тембр (забарвлення звуку)						
5. Завади та перешкоди						
6. Художнє якість						
7. Аранжування						
8. Техніка звуку						
9. Стереовраження						
10. Загальне враження						
Шкала оцінок	відмінно				5	
	добре				4	
	задовільно				3	
	не задовільно				2	
	Погано (не придатне)				1	

Музичний баланс - це, у першу чергу, правильні пропорції між рівнями гучності компонентів партитури - інструментів, вокалістів, оркестрових і хорових груп, між головними і другорядними музичними партіями, як за гучністю, так і за перспективою. Музичний баланс формують на етапі запису фонограми, однак, він залежить від умов прослуховування - безпосередньо у залі або у приміщенні через гучномовці, тобто від якості електроакустичного обладнання, від акустичної обстановки приміщення з урахуванням частотної характеристики приміщення.

Тембр або забарвлення звуку поєднує тональний баланс і темброву достовірність звучання фонограми.

Тональний баланс визначають співвідношенням між різними частотними областями і регістрами звукового діапазону. З технічних особливостей тональний баланс - це явно виражена нерівномірність частотної характеристики, як окремих інструментів, так і всього звукового образу у цілому. Залежно від частотної області, в якій створено надмірну нерівномірність, тобто підйом або спад АЧХ, тональний баланс звучання має характерні ознаки.

Темброва достовірність - це передавання природного, впізнаваного, неспотвореного в тембральному розумінні звучання музичних інструментів і

голосу.

Тембр звучання багато в чому залежить від суб'єктивних понять щодо тембру звукорежисера. У процесі запису фонограми звукорежисери часто штучно змінюють натуральний тембр окремих інструментів, надаючи їм специфічного звучання або для компенсації спотворень, що внесені під час зняття сигналу з інструменту або у разі недоліків у звучанні самого інструменту. Також тембральне оброблення використовують для забезпечення часткової просторовості, музичного балансу звукового образу.

Збереження природності звучання, тембру в його первинному вигляді - важливе завдання звукорежисера. Тембр звуку втрачає свою природність під впливом багатьох причин. Головна з них - нелінійність АЧХ аналогового тракту передавання звуку. Найбільш яскраво прояв цього фактору відчувають в разі прослуховування далеко не першої аналогової копії оригіналу. Є й інші причини, які погіршують тембр звуку. Це неправильне встановлення мікрофонів, недоліки студійного приміщення (наявність резонансу), спотворення контрольних акустичних систем, які змушують звукорежисера вибирати неправильну частотну корекцію під час запису, і багато іншого. Коли звукорежисер виявляється в спокійній обстановці і прослуховує фонограму через хороші акустичні системи, можуть виявитися недоліки, що вимагають застосування цифрових (або аналогових) фільтрів.

Завади або помітність завад і спотворень і визначає помітність на слух фонового шуму, наведень, гулу, тріску і клацань, а також випадінь і змін рівня сигналу, нелінійних спотворень і інтермодуляції - всього того, чого не було у початковому сигналі і що з'явилося у міру проходження сигналу через звукозаписувальний тракт. Цей аспект якості фонограм, у першу чергу, є технічним і залежить від використовуваного звукотехнічного обладнання. Однак наявність акустичних шумів, проникаючих в погано ізольоване приміщення або ж шумів, створюваних виконавцями, шумів, створюваних публікою у залі під час запису живого концерту, також необхідно враховувати.

Як завади у своєму прямому розумінні розрізняють [14]:

- шуми, що проникають у студію наслідок недосконалості звукоізоляції і створювані самими виконавцями;
- електричні наведення, фон, шуми підсилювачів, шум магнітної стрічки у паузах, модуляційний шум, копірефект;
- імпульсні завади - електричні потріскування, клацання тощо;
- сильні нелінійні спотворення, помітна на слух детонація, завади від монтажних склеєк, а також від спрацювання автоматичних регуляторів рівня.

Сучасне обладнання і технології у більшій мірі позбавлені цих недоліків, однак неправильний вибір динаміки рівнів сигналів може призвести до цифрових спотворень.

Використання відповідного програмного забезпечення дозволяє виправляти багато помилок і недоліки обладнання.

Художня якість як критерій якості фонограм не є технічною відсталістю та визначає, в основному, художні переваги фонограми і особливо якість виконання звукової програми виконавцями. Художню якість визначають професіоналізм

виконавців - музикантів, вокалістів, а також особливості використання індивідуального обладнання для звукоутворення (музичних інструментів, вокальних здібностей) і специфічного оброблення звуку. Художню якість визначають також особливості жанру програм, стилі музики. Від якості виконання залежить загальна оцінка запису.

Якість виконання, в деякій мірі, характеризує і роботу звукорежисера, адже саме він повинен донести до слухача всі нюанси передавання звукової програми самих виконавців, в такому вигляді, який хоче сам виконавець.

Разом з поняттям художньої якості фонограми важливою є художня цінність запису, критерій, який, як би, інтегрований з художньої якості. Цей умовний критерій відображає - чи буде цінна фонограма через певний проміжок часу. Вища оцінка означає повну комерційну придатність запису, у якій немає технічних і музичних недоліків і яку можна сміливо видавати, продавати або транслювати по радіо і телебаченню. Якщо ж окремі недоліки є, то вони знижують цінність фонограми аж до її непридатності до публікації.

Художню цінність запису визначає параметр "технічна якість" фонограм. Фонограми, що зберігалися більше 10 років, можуть вважатися технічно недосконалими для сучасних технологій звукопередавання і, як правило, вимагають реставрації.

Аранжування або інструментування і її якість - творча сторона фонограми, що відображає стилістику музичного твору, особливість підготовки та адаптації музичного твору для подання його у формі, відмінній, наприклад, від первісної, що допускає зміну гармонії, застосування модуляцій, транспозиція, додавання нового матеріалу, створення полегшеної версії оригінального твору тощо.

Техніку звукозапису оцінюють за технологічними рішеннями, до яких вдався звукорежисер. Цей критерій заснований на досвіді роботи звукорежисера, на використанні ним технологій приймання звукових сигналів. Сюди входить правильний вибір мікрофонів і їх розстановка відповідно до мікрофонної карти, використання приладів частотної корекції і динамічного оброблення сигналів, застосування реверберації і інших ефектів, якість мікшування джерел сигналу і монтажу фонограми, а також інші аспекти.

Сучасні технології та способи звукозапису припускають використання звукових робочих станцій, відповідного програмного забезпечення для оброблення звуку, віртуальних носіїв інформації, багатоканальність запису, використання мережевих каналів зв’язку для обміну і передавання даних.

Стереофонічність або стереовраження передбачає, в першу чергу, точність локалізації удаваного джерел звуку, ширину звукової картини, баланс між лівою і правою сторонами, точність сприйняття центру сцени, відсутність звукових дірок у середині ансамблю виконавців, а також продумане розміщення джерел за шириною звукової сцени. Стереофонічний ефект передбачає використання не менше двох гучномовців, один з яких відтворює лівий канал, а точніше в ньому локалізують у разі прослуховування інструменти та виконавці, розташовані ліворуч від центру сцени, а інший гучномовець відтворює удавані джерела звуку, умовно розташовані праворуч від центру сцени. Необхідно також відзначити, що обидва гучномовця у стереофонічній системі передавання відтворюють удавані

джерела звуку (УДЗ), розміщені у центрі сцени. Важливим показником стереофонічності фонограми є сумісність між каналами, а також з монофонічним відтворенням. Стереофонічність фонограми також вносить специфічну акустичну атмосферу звучанням і ефект присутності слухача у приміщенні, де відбувається передавана звукова подія.

Загальне враження - загальна остаточна оцінка фонограми, застосовують як суму оцінок, даних усіма експертами незалежно один від одного.

Як критерій оцінки якості фонограм приймаємо динамічний діапазон або щільність звучання. Щільність звучання, в якомусь наближенні оцінюють гучністю окремих інструментів, точніше динамічним діапазоном інструментів і всього звукового образу, всього ансамблю. Надмірна компресія джерел і фонограми у цілому веде до збільшення щільності, проте погіршує динаміку звучання. Щільність багато у чому залежить від професіоналізму звукорежисера створюваної фонограми.

До перерахованих вище критеріїв якості можна додати ще такі критерії - світлість і яскравість звучання, звукові плани, динамічний діапазон і гучність, а також розширити критерій просторовості просторовою перспективою (життєвістю), прозорість - розбірливістю і чистотою, аранжування - інструментовкою, якість виконання - ансамблем. Ці критерії більше придатні для оцінки художньої якості фонограм з урахуванням сучасних цифрових технологій звукозапису та звуковідтворення.

Об'єктивними параметрами, за якими оцінюють якість фонограми, є рівень сигналу, частотна характеристика, нелінійні спотворення, співвідношення сигнал/шум, динамічний діапазон, фазові і рівневі співвідношення між каналами стереосигналу, проникнення з каналу в канал стереосигналу.

5.2. Призначення та узагальнена структура систем звукопередавання

Систему звуковідтворення, у цілому, призначено для більш повної передавання сукупності відчуттів з первинного приміщення (студії, концертного залу) у вторинне - житлову кімнату радіослухача або телеглядача. Акустичні характеристики приміщень, у яких застосовано ту або іншу систему звуковідтворення, дуже сильно відрізняються між собою, що створює додаткові труднощі у разі передавання і впливає на структуру власне звукової системи.

Система звуковідтворення повинна представляти широкі можливості для реалізації творчої фантазії звукорежисерів, у тому числі і для створення звукових ефектів, здійснити які важко або навіть неможливо в умовах природного слухання. Тому звуковідтворення - це не пасивне відображення звукового поля студії, а процес активної творчої переробки звукорежисером вихідної множини первинних звукових сигналів, створення на приймальній стороні системи звуковідтворення нового звукового поля, може бути навіть несхожого на первинне, але яке забезпечує повноцінне слухове сприйняття, властиве тому чи іншому способу звукопередавання. Правильно підібрана система звуковідтворення у приміщенні багаторазово підсилює сприйняття візуальної картини, створює додаткові емоції [12].

Вимоги до систем звукопередавання та звуковідтворення [12].

Головне завдання у системі звукопередавання мови у радіомовленні - забезпечити суб'єктивну помітність кожного звуку - високу артикуляцію. Стовідсоткова артикуляція матиме місце тоді, коли всі елементи промови будуть правильно (ідентично) сприйняті всіма слухачами.

Перша вимога до тракту відтворення звуку: він повинен мати досить широкий частотний діапазон, щоб «пропустити» всі коливання, що збуджуються звучанням будь-якого музичного інструменту, шуму і голосу людини.

Друга вимога до тракту звуковідтворення: щоб зберегти природність тембру звучання, треба щоб рівень гучності звуку відповідав рівню гучності цього ж звуку в природних умовах. У іншому випадку порушується сприйняття його (звуку) частотних складових: для рівня відтворення вище природного посилюється суб'єктивне сприйняття низькочастотних складових, а на рівнях нижче природного погіршується.

Третя вимога до тракту відтворення звуку: у тому, щоб звукопередавання наближалася до природного, динамічний діапазон кожного з його вузлів і всього тракту загалом може щонайменше дорівнювати найбільшому з діапазонів, порядку 50…55 дБ.

Четверта вимога до наскрізного тракту відтворення звуку: сумарні за всіма елементами і вузлами тракту завади ніколи не повинні перевищувати певної, заздалегідь заданої величини. У іншому випадку в результаті ефекту маскування може бути втрачена частина інформації, що передається звуком.

Якість мовного передавання оцінюють тим, наскільки відтворюване гучномовцем на приймальній стороні звучання близьке до первинного (натурального), що сприймають в місці розташування мікрофонів (на стороні, що передає).

Якісною оцінкою дії всього тракту у цілому, так само як і кожної його ланки окремо, є вірність передавання звукової інформації, що характеризує ступінь відповідності прийнятого сигналу переданому сигналу

Будь-який тракт звукопередавання, навіть найвищої якості, вносить залежні від властивостей його ланок частотні, нелінійні та інші спотворення, що погіршує якість звучання.

Але в правильно підібраному і коригованому тракті вони надзвичайно малі і майже невідчутні на слух споживача сигналу радіомовлення, певною мірою адаптованого до широко і повсюдно поширеному електрозвуку.

Порушення точності передавання звукової програми каналами зв'язку призводить, відповідно, до наступного:

- втрати просторової чи акустичної перспективи, що проявляється в одноканальних системах передавання та проявляється у зміні просторовості студії запису, її акустичних характеристик;

- усунення рівнів, що з'являється через те, що слухачеві не повідомляється значення середнього рівня первинного акустичного сигналу і він встановлює його на свій розсуд, внаслідок чого може бути зміна співвідношення між гучністю низькочастотних та середньочастотних складових;

- спотворення прозорості;

- обмеження частотного та динамічного діапазонів;
- лінійним, нелінійним та перехідним спотворенням;
- маскування шумами та завадами.

У самому загальному вигляді структурну схему звукової системи незалежно від її призначення (радіомовлення, телебачення, грамзапис, кінематограф тощо) наведено на рис.5.2 [13].

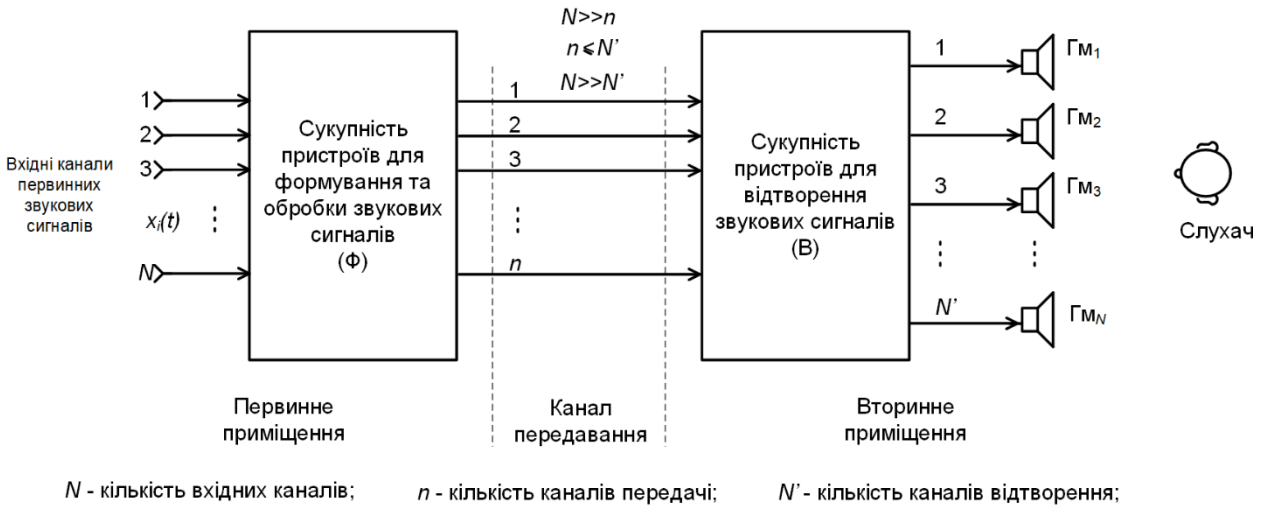


Рис. 5.2. Узагальнена структурна схема системи звукопередавання

Тут: 1,2,3..., N - вхідні канали первинних звукових сигналів $x_i(t)$, які надходять безпосередньо від мікрофонів, пристроїв відтворення магнітного запису, реверберatorів тощо;

Ф - сукупність пристроїв, якими звукорежисер формує з множини первинних вхідних сигналів n канальних сигналів (1,2,3,..., n), які підлягають передаванню на вихідну сторону системи для монтажу й одержання остаточного звукового продукту. Тобто, n – число роздільних каналів передавання звукових сигналів. Зазначимо, що Ф може містити комутаційні і змішувальні пристрої, різноманітні за призначенням регулятори рівня (індивідуальні, групові, загальні), панорамно-кодувальні пристрої, які застосовують для синтезу стереопанорами, коректори форми амплітудно-частотної характеристики, реверберatори; зазвичай $N >> n$;

В – це сукупність пристроїв, якими на приймальній стороні системи з n канальних сигналів отримують, у процесі монтажу сигнали 1,2,3,..., N_1 готової програми, надалі відтворені гучномовцями $Гм_1$, $Гм_2$, ..., $Гм_{N1}$ системи відтворення. Зазвичай $n \neq N_1$ і $N >> N_1$.

Крім того, всю сукупність пристроїв, що входять до складу Ф, крім реверберatorів, об'єднано у пульті звукорежисера. Останній поряд із системою відтворення, цифровими реверберatorами, магнітофонами встановлено в апаратній студійного блоку.

Сукупність пристроїв M розташовано в апаратній монтажу (радіомовлення, телебачення), а готовий звуковий продукт доставляють каналами зв'язку споживачу. До складу системи звукозапису не входять тракти первинного і вторинного розподілу програм, а також високочастотні частини радіоприймальної

і телевізійної апаратури.

Таким чином, будь-яку систему звукопередавання складено з двох основних частин: одна знаходиться на стороні передавання, а інша – на стороні приймання звукової інформації. Кожна з них являє собою розімкнуту звукову систему, в противагу цьому системи звукопідсилення є замкнутими системами.

5.3. Класифікація систем звуковідтворення

Існує кілька типів систем звуковідтворення в телерадіомовленні та телебаченні. Кожна із систем формує визначений звуковий образ, викликаючи у слухача або глядача множину простих відчуттів. Ці групи відчуттів утворюють основні статистично незалежні ознаки якості, властиві звучанню даного виду.

Системи звукопередавання (звуковідтворення) класифікують, насамперед, за числом каналів передавання (n). Розрізняють одно- та багатоканальні або стереофонічні ($n \geq 2$) системи.

Умовне позначення формату відтворення звуку виглядає як

$$F' / S,$$

де F' - цифра, яка відображає число роздільних каналів для відтворення звукових сигналів, що містять як прямі, так і відбиті звуки в оптимальному співвідношенні; S - цифра, яка відображає число каналів, що призначено тільки для відтворення реверберуючих (реверберацiйних) сигналів.

Умовне позначення системи звукопередавання виглядає як

$$N\text{-}n'\text{-}n\text{-}N',$$

де N - цифра, яка відображає кількість джерел звукових сигналів, точніше, кількість вхідних каналів, які задіяні у пристрої формування звукового образу; n' - цифра, яка відображає кількість вихідних каналів пристрою формування звукового образу, тобто кількість каналів, в які зміксовані вхідні джерела звуку; n - цифра, яка відображає кількість каналів передавання сигналу споживачам; N' - цифра, яка відображає кількість каналів відтворення або кількість незалежних гучномовців.

Для систем корпорації Dolby умовне позначення формату відтворення може бути як

$$N.\text{Sub},$$

де N - цифра, яка відображає кількість каналів відтворення, включно як з прямими, так і реверберацiйними (просторовими) каналами; Sub - кількість (наявність) каналу наднизьких частот.

З різноманіття звукових систем, запропонованих різними авторами на визначених етапах розвитку звукотехніки, найбільш життєздатними і розповсюдженими в даний час виявилися такі (рис. 5.3) [13]:

- звичайна одноканальна (монофонічна) система передавання;
- квазістереоамбіофонічна система звуковідтворення;

- звичайна двоканальна стереофонічна система;
- двоканальні системи підвищеної якості звучання;
- стереоамбіофонічні системи звукопередавання;
- бінауральна система звукопередавання;
- системи звукопередавання з панорамним кодуванням;
- квадрофонічна система передавання;
- багатоканальні стереофонічні системи;
- інші.

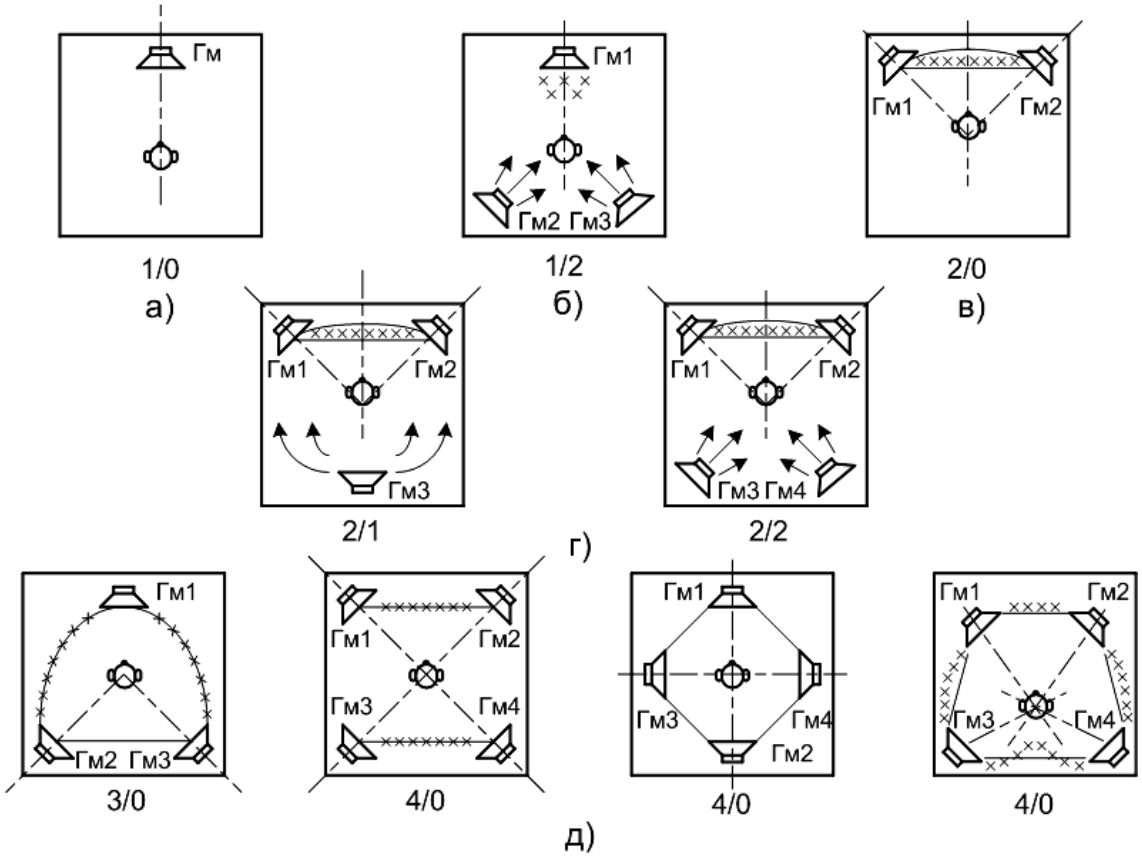


Рис. 5.3. Основні звукові формати і системи відтворення:
а - система відтворення монофонічного звукопередавання, звуковий формат "1/0";
б - система відтворення квазістереофонічного звукопередавання, формат "1/2";
в - система відтворення звичайного стереофонічного звукопередавання, формат "2/0";
г - системи відтворення стереоамбіофонічного звукопередавання, формати "2/1" і "2/2";
д - системи відтворення матричних стереофонічних звукопередавань, формати "3/0" і "4/0"

Квазістереоамбіофонічні системи звуковідтворення, умовно позначають як *N*-1-1-2, формат відтворення звукових сигналів "1/2" (рис. 5.3,*б*).

5.3.1. Звичайна одноканальна (монофонічна) система передавання

Звичайна одноканальна (монофонічна) система передавання, для якої $n = N' = 1$ - містить у приміщенні відтворення один гучномовець. У такій системі відсутні будь-які додаткові канали для передавання і відтворення у вторинному приміщенні реверберaційних компонентів сигналів, які складають звучання окремих джерел звукової картини. Сигнал, випромінюваний гучномовцем, містить оптимальне з позицій слухового сприйняття співвідношення сигналів прямих звуків і їхніх реверберуючих продовжень. Якість звучання, що відповідає даному способу передавання звуку з первинного приміщення (студії, концертного залу) у вторинне (наприклад, житлове) приміщення, найгірша. Однак, у силу своєї простоти даний спосіб передавання звуку і сьогодні є широко розповсюдженим, особливо в разі проведення інформаційних передач.

Умовне позначення монофонічного формату відтворення звуку "1/0", де перша цифра 1 означає число роздільних каналів для відтворення звукових сигналів, що містять як прямі, так і відбиті звуки в оптимальному співвідношенні, а цифра 0 - число каналів, призначених тільки для відтворення реверберуючих сигналів (рис. 5.3,*а*). Умовне позначення системи звукопередавання N-1-1-1.

До основних різновидів одноканальних систем відносять також:

система об'ємного звучання, для якої $n = 1$, $N' > 1$;

моноамбіофонічна з $n = 1$, $N' > 1$;

псевдостереофонічна з $n = 1$, $N' = 2$;

квазістереофонічна з $n = 1$, $N' = 24$.

Сигнал передавання можна формувати підсумовуванням множини вихідних сигналів від мікрофонів у повноцінний одноканальний звуковий сигнал, який називають монофонічним. Єдиним каналом цей сигнал передають на приймальну сторону системи і його відтворюють одним гучномовцем. Таке звучання називають монофонічним. Структурну схему монофонічної системи звукопередавання наведено на рис. 5.4.

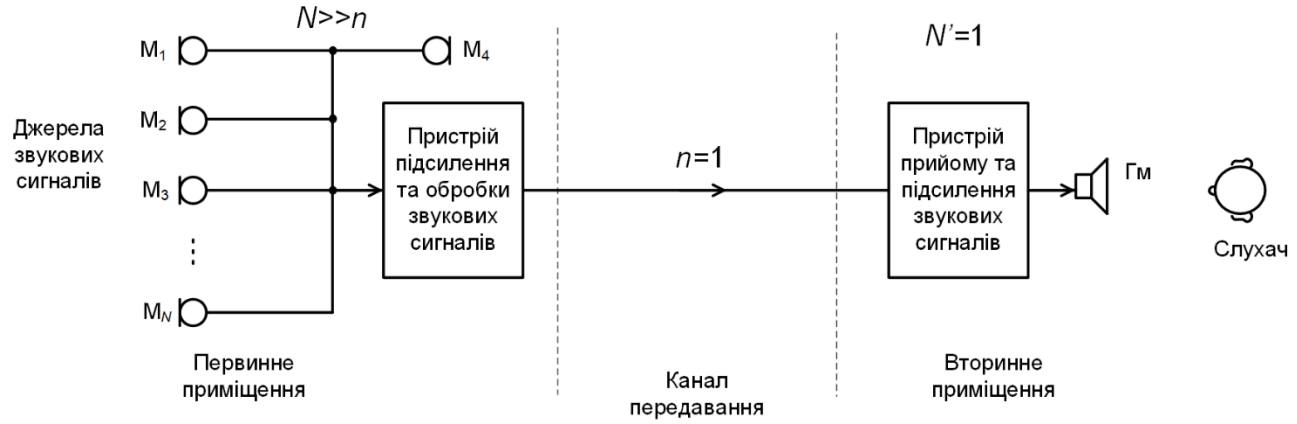


Рис. 5.4. Структурна схема монофонічної системи звукопередавання

Усі звуки під час відтворення виходять із єдиного джерела - гучномовця. Це стосується як сигналів прямих звуків, так і сигналів реверберaційного процесу студії. Таким чином, панорама оркестру у разі відтворення виявляється стиснутою в одну точку. Оскільки механізми просторового демаскування сигналів не

працюють, то прозорість звучання та сприйняття акустичної обстановки студії виявляються значно гіршими, ніж під час прослуховування у концертному залі з гарною акустикою. Якість звучання тут найгірша. Проте система дуже проста. Вона поширена до нашого часу, особливо під час передавання мовних інформаційних сигналів.

5.3.2. Звичайна двоканальна стереофонічна система

Звичайна двоканальна стереофонічна система містить два роздільних канали передавання звуку і два канали для відтворення цих сигналів у вторинному приміщенні. Ніяких додаткових перетворень сигналів стереопари в приміщенні відтворення не виконують, за винятком регулювання гучності, тембру за нижніми і верхніми частотами і стереобалансу [13].

Важливо відзначити дві особливості, які властиві сигналам звичайної стереофонії. По-перше, сумісність - сума лівого і правого сигналів стереопари повинна давати повноцінне монофонічне звучання; по-друге, лівий і правий сигнали стереопари містять як сигнали прямих звуків, так і їхні реверберaційні продовження, і що особливо істотно - мають приблизно однакове співвідношення енергій сигналів прямих і відбитих звуків у кожному з каналів стереопари. Умовне позначення системи звукопередавання *N*-2-2-2; формат відтворення "2/0" (рис. 5.3,*в*).

Вихідна множина первинних сигналів $\{x_i(t)\}_N$ джерел звуку перетворюється в лівий Л(t) і правий П(t) сигнали стереопари за правилом

$$Л(t)= \sum_{i=1}^{N} a_{1i}(t)x_i(t-\Delta\tau_{1i});$$

$$П(t)= \sum_{i=1}^{N} a_{2i}(t)x_i(t-\Delta\tau_{2i}),$$

де a_{1i}, a_{2i} та $\Delta\tau_{1i}$, $\Delta\tau_{2i}$ - пари коефіцієнтів кодування і часових зсувів для i-го первинного сигналу $x_i(t)$, який формує в разі відтворення i-те джерело звуку стереопанорами. Значення цих параметрів однозначно визначають місце розташування i-го звукового образу на лінії бази гучномовців $Гм_1$ і $Гм_2$. Синтез (формування) сигналів стереопари Л(t) і П(t) виконують панорамно-кодувальним пристроєм (ПКП) або мікрофонними системам типу AB, XY і MS.

Структурну схему звичайної стереофонічної системи звукопередавання наведено на рис. 5.5. Сигнали Л(t) і П(t) двома окремими каналами передавання надходять на відповідні входи тракту відтворення. У його склад входять двоканальний стереофонічний підсилювач і система відтворення (СВ), яка містить два гучномовці $Гм_1$ і $Гм_2$, звичайно розташовуваних на деякій відстані один від одного перед слухачем. Ніякі додаткові перетворення над сигналами стереопари тут не виконують: лівий гучномовець $Гм_1$ випромінює сигнал Л(t), а правий $Гм_2$ - сигнал П(t). Декодування сигналів Л(t) і П(t) здійснює безпосередньо слуховий аналізатор людини.

Сигнали стереопари відтворюють рознесеною СВ, яку складено з двох

однакових гучномовців, що встановлюють перед слухачем на деякій відстані один від одного; поєднаної СВ - гучномовці Гм1 і Гм2 конструктивно об'єднані в одному корпусі, де також зазвичай розташовано і електричну частину стереоприймача, телевізора, магнітофона тощо; комбінованої, в якій низькочастотні ланки лівого та правого гучномовців об'єднані, а середньо- та високочастотні ланки виконані у вигляді окремих виносних гучномовців, що мають порівняно малі розміри. Варіанти комбінованих СВ відрізняються один від одного тим, що в одному випадку їх поєднано з корпусом ТБ приймача, а в іншому - виконано в окремих конструкціях, що в ряді випадків набагато зручніше для споживача.

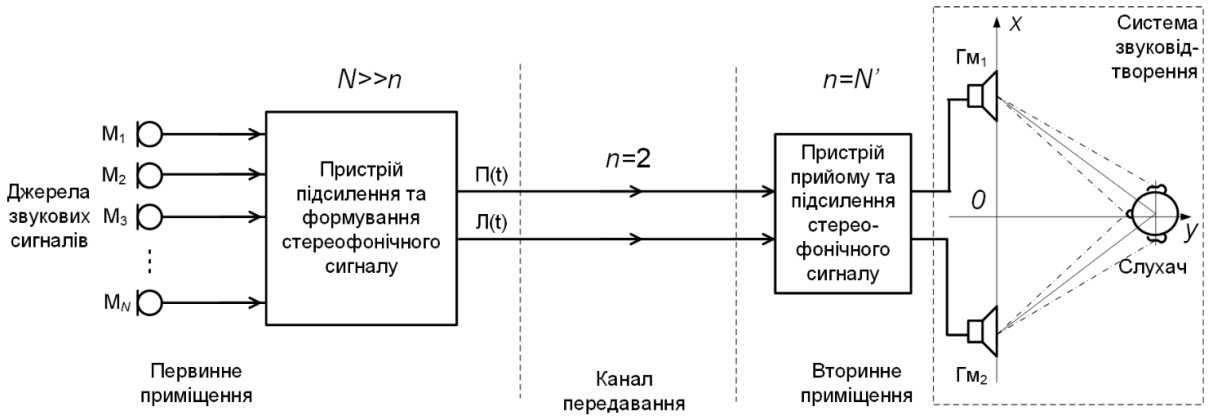


Рис. 5.5. Структурна схема звичайної стереофонічної системи звукопередавання

Поряд із гучномовцями для відтворення сигналів Л і П часто використовують стереотелефони.

Якість стереофонічного звучання. Якість монофонічного та звичайного стереофонічного звучання оцінюють методом парних порівнянь. У процесі порівняння кожен експерт має описати відмінність монофонічного і стереофонічного звучань. Для опису своїх відчуттів експерти використовували більш ніж 50 термінів. Однак після уточнення їхнього змісту все їх різноманіття було зведено до семи груп (i = 1, 2, ..., 7). У табл. 5.2 наведено ознаки якості стереофонічного звучання [12].

Крім самих груп ознак якості важливе значення мають частки s_i, їх вживання. Величини s_i' і s_i'' оцінюють значущість (ваговий коефіцієнт) кожної з цих ознак у моделі узагальненої оцінки якості звучання, причому i = 1, 2, ..., 7. Тут s_i' і s_i'' - середні значення, зокрема споживання експертами кожного i-го із термінів відповідно для груп кваліфікованих (музиканти, звукорежисери, студенти з музичною освітою) та звичайних (студенти, які не мають дефектів слуху, попередньо навчені) слухачів.

Крім самих груп ознак якості важливе значення мають частки s_i, їх вживання. Величини s_i' і s_i'' оцінюють значущість (ваговий коефіцієнт) кожної з цих ознак у моделі узагальненої оцінки якості звучання, причому i = 1, 2, ..., 7. Тут s_i' і s_i'' - середні значення, зокрема споживання експертами кожного i-го із термінів відповідно для груп кваліфікованих (музиканти, звукорежисери, студенти з музичною освітою) та звичайних (студенти, які не мають дефектів слуху,

попередньо навчені) слухачів.

Таблиця 5.2. Ознаки якості стереофонічного звучання та їх вагові коефіцієнти

Ознака якості	Номер групи	s_i'	s_i''
1. Ширина звукової панорами	1	0,13	0,24
2. Об'ємність звучання	2	0,14	0,9
3. Прозорість, чіткість, роздільність звучання різних інструментів чи їх груп	3	0,2	0,09
4. Природність і багатство тембрів інструментів і голосів	4	0,22	0,17
5. Передача басових звуків оркестру без зайвої гучності	5	0,18	0,15
6. Помітність шумів та завад	6	0,12	0,0
7. Узагальнений термін, що не відноситься до жодної з цих груп	7	0,01	0,21

Усі групи ознак якості (див. табл. 5.1), крім останнього ($i = 7$), значимі. Проте вони є статистично незалежними чинниками.

Зона стереофонічного ефекту. Якість стереофонічного звучання істотно залежить від місця розташування слухача щодо гучномовців системи відтворення. На рис. 5.6,*а* наведено криві однакової переваги, що підтверджують цей висновок. У дуже малій області (рис. 5.6,*б*) переважність становить більше 85%. Цю область називають зоною повного стереоефекту. Вона розташована довкола точки оптимального слухання. У цій області зберігається якісно правильна локалізація УДЗ, просторові спотворення малі: зсув УДЗ від свого істинного положення не перевищує 10% від розміру бази В гучномовців. В міру зсуву слухача з осі симетрії гучномовців перевага стереовідтворення падає. Вона зберігається до того часу, поки ансамбль сприймається слухачем просторово розділеним хоча б на три групи. Коли число сприйманих напрямків скорочується до одного, перевага стереовідтворення зникає. Ця закономірність підтверджує той факт, що вирішальне значення в сприйнятті стереофонічного ефекту мають механізми просторового слуху людини - утворення УДЗ, його локалізація і просторове демаскування [13].

Площу зони прослуховування, де перевага стереовідтворення (перед монофонічним звучанням) складає 60%, називають зоною часткового стереоефекту (рис. 5.6,*б*). У цій зоні число роздільно сприйманих напрямів не менше трьох.

Сукупність викладених уявлень щодо природи стереофонічного ефекту дозволяє стверджувати, що передавання просторової інформації з найбільшою точністю і в максимально можливому обсязі - найважливіша умова подальшого підвищення якості звучання. У межі необхідно прагнути до того, щоб просторові характеристики системи звукопередавання були адекватні можливостям просторового слуху людини для локалізації дійсних джерел звуку.

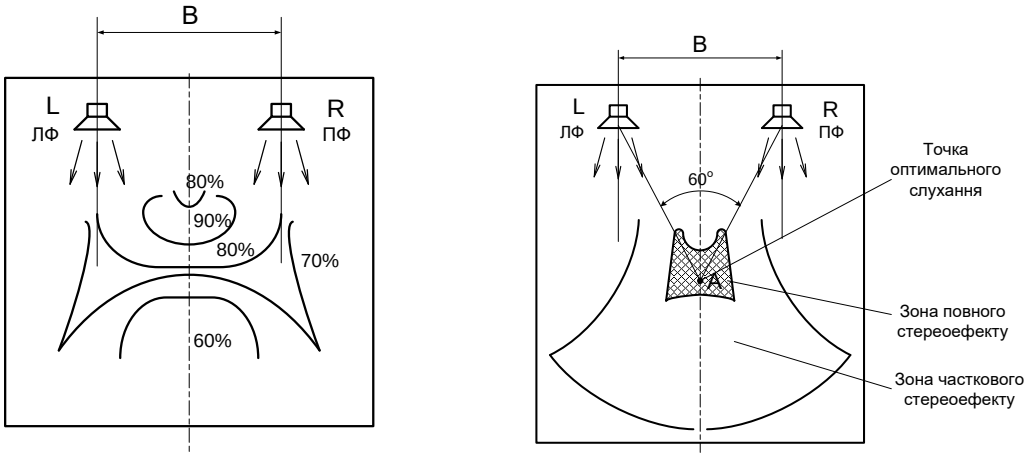


Рис. 5.6. Криві однакової переваги (а) і зони повного і часткового стереоефекту (б) (А - точка оптимального слухання $2\psi = 60°$)

5.4 Багатоканальні стереофонічні системи

Все більше і більше для систем озвучення застосовують багатоканальні стереофонічні системи. Нагадаємо, що до цього класу систем відносять ті з них, які задовольняють умові $n = N' > 2$ [13].

Двоканальні системи підвищеної якості звучання мають два канали передавання і чотири або п'ять каналів для відтворення звукових сигналів. Поширені наступні різновиди цих систем:

- стереоамбіофонічні системи - мають фронтальну і тилову пари гучномовців (рис. 5.3,*г*). Фронтальна пара гучномовців відтворює повноцінний стереофонічний сигнал звичайної двоканальної системи передачі. Тилова пара гучномовців (або один) відтворює, в основному, сигнали реверберації. Умовне позначення системи *N*-1-1-3 або *N*-2-2-4, формати відтворення "2/1" і "2/2" (рис. 5.1,*г*);

- стереосистеми з багатоканальним відтворенням - матричні системи передавання, які наведено на рисунку 5.3,*д*.

В наш час до масових належить система, яку розроблено об’єднанням "Dolby Lab". Цю система розробляли, в основному, для кінематографа. Система відтворення містить або два фронтальних (ЛФ і ПФ) і два тилових гучномовці, які випромінюють лівий (ЛТ) і правий (ПТ) тилові сигнали (рис. 5.7); або два Л, П (Dolby Surround) чи три Л, Ц, П (Dolby Pro Logic) фронтальних гучномовці і два (декілька) тилових гучномовця, які випромінюють просторові сигнали "оточення" - лівий LS (або LS_1, LS_2) і правий RS (або RS_1, RS_2) (рис. 5.8, *а* і *б*). У системі "Dolby-Stereo" реалізують формати відтворення "3/2" і "3/4" (рис. 5.7 і 5.8). Умовне позначення системи звукопередавання "Dolby-Stereo" має вид *N*-4-2-4 або *N*-4-2-5, а системи "ABC-Stereo" - *N*-2-4 або *N*-2-5. Можливі положення удаваних джерел звуку (УДЗ) на рисунку 5.7 позначено хрестиками [15].

В останні роки особливе поширення отримали системи звуковідтворення, які мають загальний канал наднизьких частот (ННЧ) і відповідний йому гучномовець (який називається "Subwoofer") і два гучномовці лівого і правого каналів. Канал ННЧ працює в смузі частот від 20...25 Гц до 80...125 Гц, а лівий і правий канали

працюють у смузі частот від 125 Гц до (18000...20000) Гц. Така система відтворення дуже зручна для розміщення в житловій кімнаті, при цьому "Subwoofer" можна розташовувати в будь-якому місці приміщення.

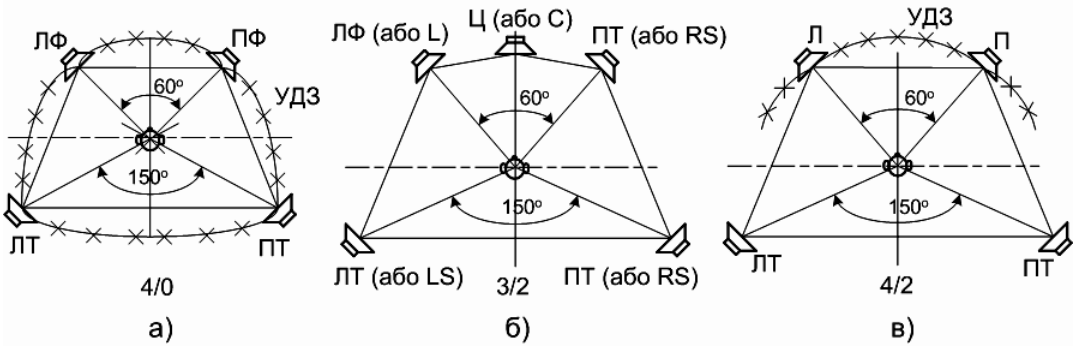


Рис. 5.7. Системи відтворення АВС-стерео (*а*) і "Dolby stereo" (*б, в*): ЛФ, ПФ - лівий і правий фронтальні гучномовці; ЛТ, ПТ - лівий і правий тилові гучномовці; L, R, C - лівий, правий, центральний гучномовці; LS, RS лівий і правий гучномовці, які випромінюють навколишні лівий і правий сигнали "оточення"

Важливо зазначити, що кожному виду звучання (моно, стерео, псевдостерео, квазістерео, стереоамбіофонічному тощо) відповідає свій набір основних статистично незалежних ознак якості і своїх значень вагових коефіцієнтів у моделі узагальненої оцінки якості звучання. Вид звучання - моно-, стерео-, квазістерео- тощо - визначають структурою системи звукопередавання. Окремі пристрої системи звукопередавання можуть вносити визначені за величиною спотворення, що змінюють лише основні ознаки якості і вагові коефіцієнти, внаслідок чого змінюють й узагальнену оцінку якості звучання.

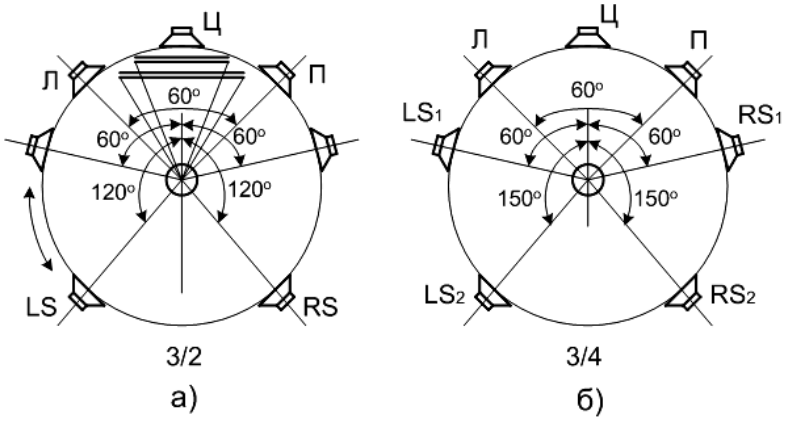


Рис. 5.8. Системи відтворення "Dolby Prologic" із трьома фронтальними гучномовцями Л, Ц, П и тиловими гучномовцями "оточення" (surround): *а* - LS і RS (формат 3/2); *б* – LS_1, LS_2 і RS_1, RS_2 (формат 3/4)

У будь-якій стереофонічній системі процеси кодування, передавання, декодування, відтворення і сприйняття просторової інформації можна представити виразом (рис. 5.9,*а*) [13]:

$$x_i(t,\varphi) = \text{ABDCG}\, x_i(t),$$

де $x_i(t,\varphi)$ - оцінка слухового сигналу, кожен такий сигнал формує у разі слухового сприйняття у житловому приміщенні i-те удаване джерело звуку; t - поточний час; φ - азимутальний кут цього удаваного джерела звуку;

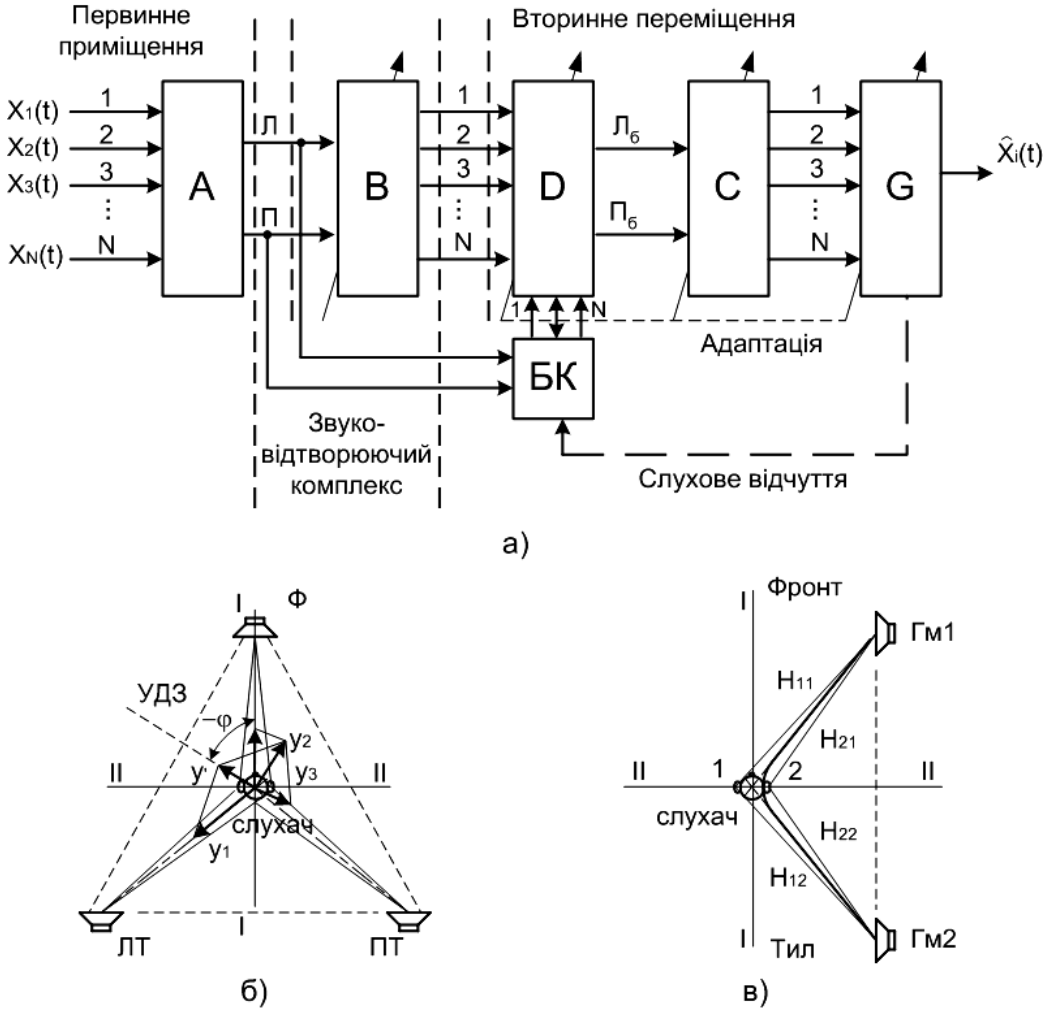


Рис. 5.9. Кодування, передавання, відтворення та сприйняття просторової інформації:
а – психофізична структура матричної системи звукопередвання з панорамним кодуванням; *б* – приклад оцінки азимуту УДЗ у системі відтворення „трикутник” на етапі асоціації форми;
в – ситуація відсутності злиття звучання пари гучномовців

А - матриця панорамного кодування множини сигналів джерел звуку $\{x_i(t)\}_N$ у лівий Л(t) і правий П(t) сигнали стереопари. Рівняння кодування при цьому мають вигляд:

$$\text{Л}(t) = \sum_{i=1}^{N} a_{1i}(t) x_i(t);$$

$$П(t)= \sum_{i=1}^{N} a_{2i}(t)x_i(t).$$

Тут $x_i(t)$ - сигнал i-го джерела звуку. Кожен такий сигнал на стороні відтворення утворить своє удаване джерело звуку; множина сигналів $\{x_i(t)\}_N$ формує стереопанораму у приміщенні прослуховування; a_{1i} й a_{2i} - пари коефіцієнтів панорамного кодування сигналів кожного джерела звуку, значення цих коефіцієнтів залежать від кута локалізації утвореного сигналами кожної з цих пар удаваного джерела звуку; φ_i - кут, під яким це удаване джерело звуку локалізує слухач під час відтворення цієї пари сигналів.

В – це матриця панорамного декодування сигналів Л(t) і П(t), якою їх перетворюють до вигляду

$$y_j(t)= b_{j1}Л(t) + b_{j2}П(t),$$

де $y_j(t)$ - сигнал, відтворений j-м гучномовцем системи відтворення (СВ) у приміщенні; N' - число гучномовців, що утворюють систему відтворення; b_{j1} і b_{j2} - пари коефіцієнтів декодування для сигналів Л(t) і П(t);

D - матриця просторового кодування сигналів гучномовців СВ в разі їх слухового сприйняття;

C - матриця просторового декодування сигналів дійсних джерел звуку - гучномовців у слуховій системі слухача;

G - матриця, що характеризує оброблення векторних сигналів гучномовців у слуховій системі людини для оцінювання азимуту УДЗ.

В разі відтворення сигнал $y_j(t)$ кожного гучномовця СВ кодує просторовий фільтр, який є голова і вушні раковини слухача. Процес просторового кодування сигналів гучномовців записують як

$$Л_б= \sum_{i=1}^{N} H_{j1,i}\, y_j(t);$$

$$П_б= \sum_{i=1}^{N} H_{j2,i}\, y_j(t),$$

де $Л_б$ і $П_б$ - лівий і правий бінауральні слухові сигнали; N' - число каналів відтворення адаптивного декодувального пристрою (АДУ) або гучномовців СВ, H_{1j} і H_{2j} - коефіцієнти передавання, які описують зміни, що отриує звукова хвиля, поширюючись від j-го гучномовця СВ до лівого (H_{1j}) і правого (H_{2j}) вух слухача. Безліч $\{H_{1j}, H_{2j}\}_N$ утворить матрицю просторового кодування D сигналів дійсних джерел звуку - гучномовців СВ.

Проблема підвищення якості звучання матричних систем вимагає пошуку оптимальних структур матриць А і В та систем відтворення, що забезпечують передачу просторової інформації в максимальному обсязі за мінімальних величин просторових спотворень. Роботу пристроїв, які визначають структуру цих матриць, потрібно аналізувати у взаємозв'язку з урахуванням умов прослуховування і властивостей просторового слуху людини. При цьому наявна в сигналах Л(t) і П(t)

інформація щодо просторового розміщення звукових образів у стереопанорамі, їх кількість й інші можливі зведення повинні бути використані для керування процесом їх декодування з метою отримання найбільш чітких і впевнено локалізованих УДЗ, максимально можливого розміру області впевненої локалізації УДЗ і зони стереофонічного ефекту. Саме комплексне врахування усієї цієї сукупності факторів має бути враховано в ефективних алгоритмах декодування сигналів Л(t) і П(t). Процес керування декодуванням сигналів стереопари не повинен бути помітним на слух.

Гранично-досяжною якістю звучання в таких системах є таке, що забезпечено у багатоканальній стереофонічній системі звукопередавання з числом роздільних каналів $n = N'$ і з ідентичною системою відтворення. Така система звукопередавання є для матричної системи еталоном.

Найкращі можливості передавання просторової інформації має система відтворення типу "трапеція" (рис. 5.7,*а*).

Напрямку "фронт" відповідають синфазні сигнали рівного рівня в каналах Л і П. Напрямку на лівий фронтальний гучномовець ЛФ - "ліворуч" - відповідає ситуація, коли рівень сигналу в каналі П (правому) дорівнює нулю, при цьому сигнал у каналі Л відмінний від нуля. Напрямку "праворуч" - звук здається таким, що виходить із правого фронтального гучномовця ПФ - відповідає умова, коли П≠0, Л=0. Напрямку "тил" відповідають протифазні сигнали Л і П у каналах.

Переміщення УДЗ у фронтальній напівплощині (між лівим і правим фронтальними гучномовцями) кодують зміною співвідношення рівнів синфазних сигналів Л і П. Переміщення УДЗ у тиловій напівплощині кодують зміною співвідношення рівнів протифазних сигналів у відповідних каналах. Інакше кажучи, джерело звуку слухач сприймає у фронтальній частині простору, якщо сигнали Л і П синфазні, і, відповідно, у тиловій частині простору, якщо вони протифазні.

Можливе також отримання відчуття руху "фронт-тил" і лівий/правий не за периметром, а безпосередньо по найкоротшій траєкторії. Ефект руху УДЗ у напрямку фронт/тил досягають зміною різниці фаз однакових за рівнем сигналів Л і П. В разі переміщенні УДЗ у напрямку "фронт-тил" різницю фаз сигналів Л і П змінено від 0° до 180°. Для переходу "тил-фронт" різницю фаз змінено від 180° до 0°.

5.4.1. Стереоамбіофонічні системи звукопередавання

Стереоамбіофонічні системи звукопередавання, які наведено на рисунку 5.9, мають наступні особливості [13]:

1. На передавальній стороні замість двох одиночних мікрофонів використовують мікрофонні системи XY (рис. 5.10,*а*), АВ (рис. 5.10,*б*) або їх об’єднання. Цими мікрофонними групами виконано розподіл усієї сприйманої інформації на дві частини - ліву і праву, окремо для сигналів прямих ($Л_d$, $П_d$) і відбитих ($Л_r$, $П_r$) звуків. Виконувані над цими сигналами перетворення наведено на цьому ж рисунку. Зазначимо, що відстань між тильними мікрофонами $М_3$, $М_4$ системи АВ (рис. 5.10,*б*) вибирають досить великою (у порівнянні з передньою парою), завдяки чому сприймані ними сигнали $Л_r$ і $П_r$ виявляються в значній мірі

некорельованими як між собою, так і відносно сигналів прямих звуків, що сприяє їх незалежному слуховому сприйняттю і зменшує маскувальну дію одного на інший.

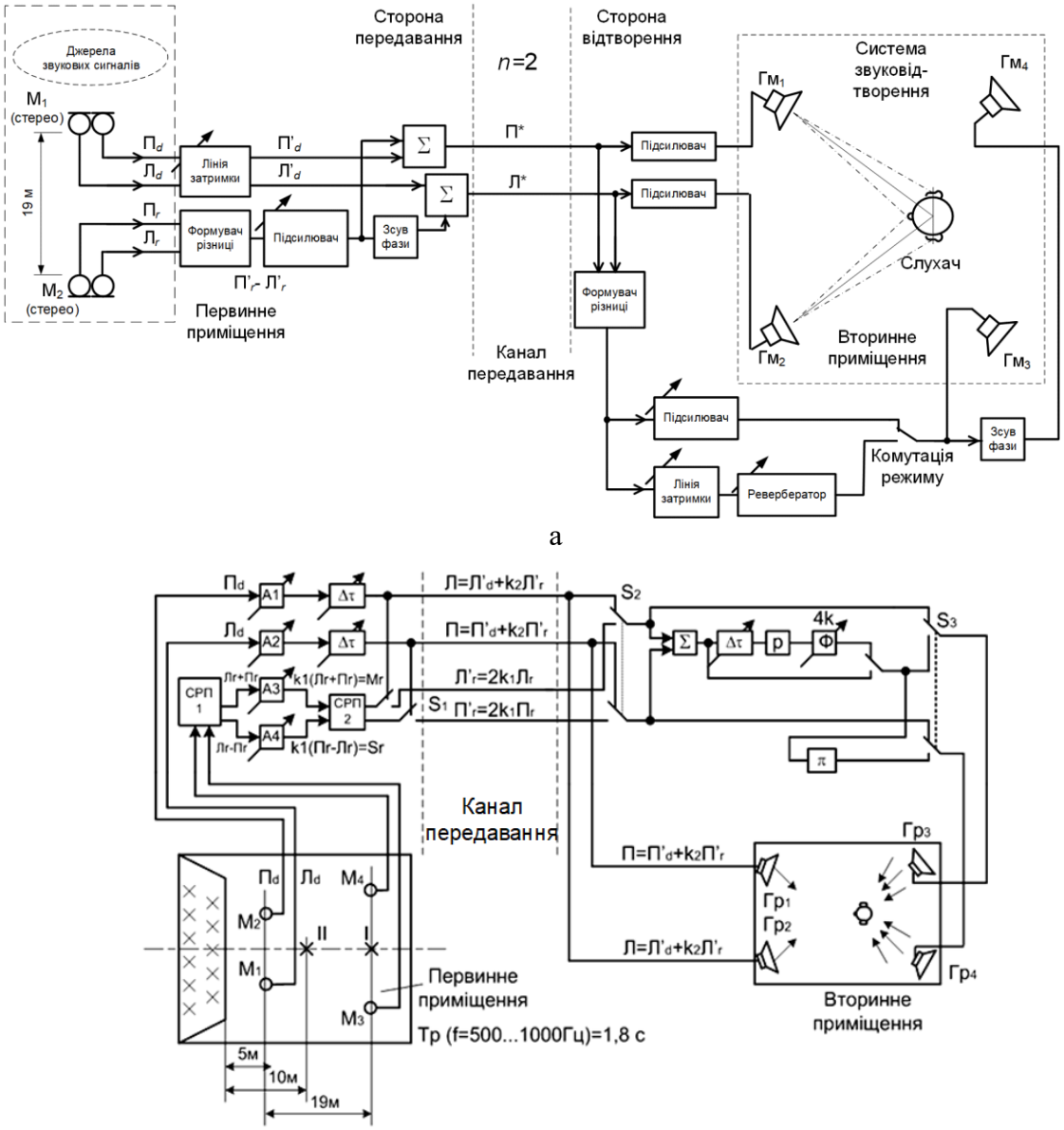


Рис. 5.10. Структурні схеми стереоамбіофонічної системи звукопередавання з використанням - мікрофонної системи XY (*а*) та мікрофонної системи AB (*б*)

2. Каналами зв'язку передають лівий $Л_d'$ і правий $П_d'$ сигнали, які сприймають стереомікрофон M_1 (рис. 5.10,*а*) або одиночні монофонічні мікрофони M_1 і M_2 (рис. 5.10,*б*), і до яких у визначеному співвідношенні в протифазі доданий різницевий сигнал ($Л'_r$-$П'_r$) від стереомікрофона M_2 (рис. 5.10,*а*) або лівий $Л'_r$ і правий $П'_r$ сигнали від мікрофонів M_3 і M_4 (рис. 5.10,*б*), які сприймають переважно відбиті звуки. Відповідно маємо:

$$Л= Л_d'+k_1(Л'_r - П'_r) \text{ або } Л= Л_d'+k_2Л'_r;$$

$$П= П_d'+k_1(П'_r - Л'_r) \text{ або } П= П_d'+k_2П'_r,$$

де k_1 і k_2 - постійні коефіцієнти.

3. На приймальній стороні системи сигнали Л і П відтворюють фронтальною парою гучномовців. Зазначимо, що додавання у визначеному співвідношенні реверберуючих звуків до прямих збагачує звучання передньої пари гучномовців, робить сприймані тембри більш багатими, м'якими і тонше нюансованими. Тильну пара гучномовців $Гм_3$ і $Гм_4$, яку орієнтовано також на просторове розсіювання звукової енергії, живлять різницевим сигналом $k\cdot[Л_d' - П_d' + 2\cdot k\cdot(Л'_r - П'_r)]$ у протифазі. Ця пара сигналів містить переважно енергію відбитих звуків, сприйнятих стереомікрофоном $М_2$ (рис. 5.10,*а*) або мікрофонами $М_3$ і $М_4$ (рис. 5.10,*б*). Включення в ланку тильної пари гучномовців додаткової лінії затримки $\Delta\tau_1$, ревербератора Р и частотного коректора (ЧК) (рис. 5.10,*б*) істотно розширює можливості цієї структури: підвищується об'ємність, прозорість звучання, стають можливими оперативні зміни акустичних умов прослуховування і перенесення слухача в приміщення з різними акустичними властивостями.

Стереоамбіофонічні системи об’єднують переваги звичайної стереофонічної і квазістереофонічної систем звукопередавання. Вони здатні в однаковій мірі донести до слухача інформацію про акустичну атмосферу первинного приміщення і про просторове розміщення інструментів ансамблю по фронту і глибині із збереженням певної і чіткої локалізації УДЗ у межах бази фронтальної пари гучномовців. Однак, можливості цих систем щодо передавання просторової інформації і забезпечувана ними якість звучання поступаються аналогічним параметрам кращих різновидів багатоканальних стереофонічних систем.

5.4.2. Бінауральна система

У бінауральній системі звукопередавання синтезують лівий $Л_б$ і правий $П_б$ сигнали стереопари, тотожні тим, що впливали б на входи слухового аналізатора слухача в разі розташування останнього в концертному залі. Новими елементами в порівнянні із звичайною стереофонічною системою, яка містить пульт звукорежисера (ПЗ) і стереофонічний підсилювач (СП), є бінауральний регулятор напрямку (БРН) на передавальній стороні і біфонічний процесор (БП) на стороні відтворення звукової інформації (рис. 5.11,*а*) [13].

Як БРН застосовують "штучну голову" (рис. 5.11,*б*), у вушних проходах якої на місце барабанної перетинки встановлено приймачі звуку - мікрофони $М_1$, $М_2$ або адекватний "штучній голові" за параметрами електричний пристрій (рис. 5.11,*в*). Останній являє собою просторовий фільтр, сукупність пар коефіцієнтів передавання $\{H_{\varphi 1,i}; H_{\varphi 2,i}\}_N$ якого однозначно визначає місце в просторі i-го джерела звуку, сформованого сигналом $x_i(t)$.

Блоки G' і H' (рис. 5.11,*в*) являють собою бінауральний регулятор напрямку для випадку, коли відтворення сигналів виконують телефони (Т), що не вносять спотворень. Тут загальний для обох каналів елемент G' з передатною функцією $H_{\varphi 1,i}$ характеризує всі зміни звукової хвилі для ситуації її поширенні від джерела звуку до найближчого вуха 1. Блок H' має коефіцієнт передавання, який дорівнює відношенню функцій $H_{\varphi 2,i}/H_{\varphi 1,i}$. Він змінює залежно від азимута джерела звуку співвідношення величин $Л_б$ і $П_б$ бінауральної пари сигналів.

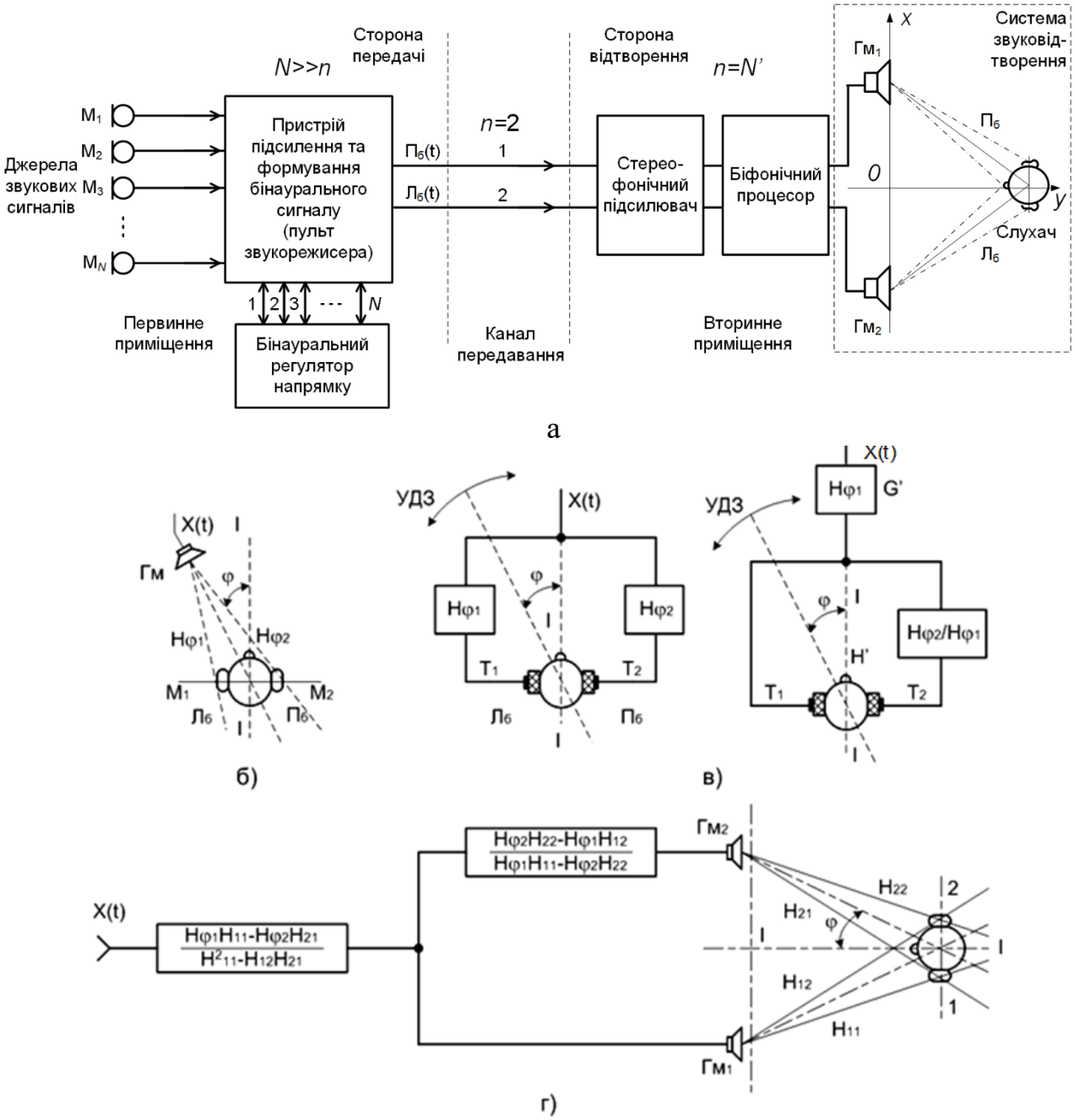


Рис. 5.11. До побудови бінауральної системи звукопередавання:
а - загальна структурна схема; *б* - просторове кодування сигналу джерела звуку; *в* - найпростіший бінауральний регулятор напрямку в разі відтворення сигналів головними телефонами; *г* - бінауральний регулятор напрямку в разі відтворенні сигналів гучномовцями

Множину пар коефіцієнтів $\{H_{\varphi 1,i};\ H_{\varphi 2,i}\}_N$ складають матрицю просторового кодування А множини первинних сигналів. Очевидно, що

$$Л_б = \sum_{i=1}^{N} H_{\varphi 1,i}\, x_i(t);$$

$$П_б = \sum_{i=1}^{N} H_{\varphi 2,i}\, x_i(t),$$

де N - число первинних сигналів; $x_i(t)$ - часова функція сигналу i-го джерела звуку.

Зазначимо, що елементи матриць просторового кодування для бінауральної і звичайної стереофонічної системи не тотожні. На відміну від останньої величини $H_{\varphi 1,i}$ та $H_{\varphi 2,i}$ мають складну частотно-часову залежність від азимутального кута φ джерела звуку. Щоб забезпечити локалізацію УДЗ в межах всієї азимутальної площини при системі відтворення, що складено з двох гучномовців $Гм_1$ і $Гм_2$ (рис. 5.11, г), необхідно застосування відповідних просторових фільтрів.

Біфонічний процесор (рис. 5.11,*а*) забезпечує підведення до лівого і правого входів слухового аналізатора бінауральної пари сигналів у своїй первісній неспотвореній формі. Він необхідний для компенсації дії завад перехресних сигналів гучномовців $Гм_1$ і $Гм_2$; змін, які відбуваються в сигналах на шляху їхнього проходження від лівого гучномовця $Гм_1$ до лівого вуха і від правого гучномовця $Гм_2$ до правого вуха; сигналів, відбитих від поверхонь приміщення. Ця сукупність сигналів відображує реверберaційний процес у приміщенні, вона впливає на ліве і праве вуха слухача, "спотворюючи" вихідну пару бінауральних сигналів $Л_б$ і $П_б$.

Основні переваги і недоліки бінауральної системи звукопередавання можна сформулювати таким чином:

1. В разі компенсації заважаючих факторів можлива впевнена і чітка локалізація УДЗ у межах усієї горизонтальної площини - попереду, ліворуч, праворуч, позаду. Однак УДЗ, що розташовані попереду, виявляються більш компактними, а в тиловій частині - більш розмитими.

2. Поява реверберації, як у первинному, так і у вторинному приміщенні погіршує (утрудняє) оцінку азимута УДЗ у тиловій області, де слухачі замість дійсного напрямку часто вказують відповідний йому дзеркальний фронтальний напрямок. Дане явище стає частим, якщо час стандартної реверберації в приміщенні прослуховування перевищує 0,3 с. Що стосується відчуттів, пов'язаних з передаванням глибинної локалізації, акустичних властивостей первинного приміщення, властивої йому гучності, теплоти, м'якості звучання, то вони виявляються у цій системі правдоподібними (якісно правильними). Бінауральній системі властиво більш точне відновлення просторової структури первинного реверберaційного процесу у порівнянні із звичайною стереофонією.

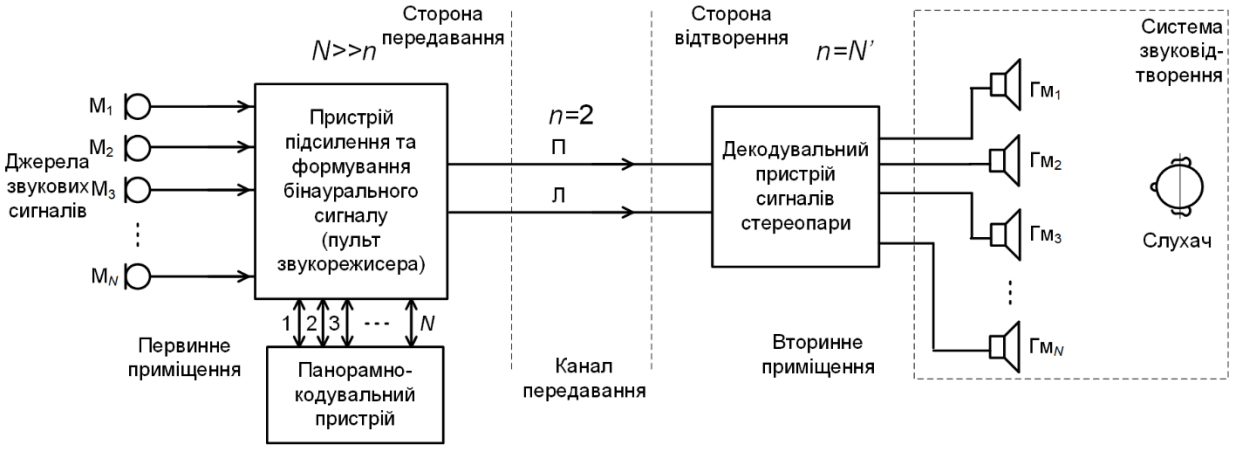
3. Вірне передавання просторової інформації в разі відтворення гучномовцями можливе практично тільки для одного місця приміщення, де за допомогою БП компенсована дія заважаючих факторів: коефіцієнтів передавання і реверберaційного процесу приміщення. Навіть незначний (близько 9...15 см) зсув центра голови слухача ліворуч або праворуч від цього місця призводить до того, що локалізація УДЗ виявляється неможливою поза кутом на гучномовці.

Не викликає сумніву той факт, що в оптимальному місці прослуховування бінауральна система забезпечує звучання, впевнено переважне звичайному стереофонічному, створює ефект присутності слухача в концертному залі з гарними акустичними властивостями. Однак у силу викладених вище причин область її застосування дуже обмежена: відтворення за допомогою головних телефонів; переносна апаратура радіомовлення і звуковідтворення для індивідуального прослуховування програм. Бінауральна система малопридатна для умов колективного прослуховування (телебачення, кіно- та відеозали).

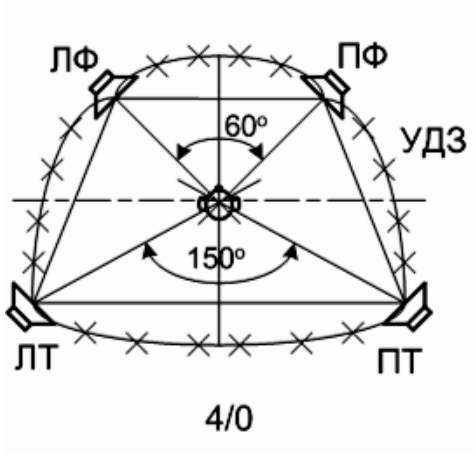
5.4.3. Системи звукопередавання з панорамним кодуванням

Серед сучасних систем звуковідтворення не можна не відмітити системи звукопередавання з панорамним кодуванням сигналів джерел звуку.

Узагальнену структурну схему системи звукопередавання з панорамним кодуванням сигналів джерел звуку наведено на рисунку 5.12,*а* [13].



а



б

Рис. 5.12. Узагальнена структурна схема системи звукопередавання з панорамним кодуванням сигналів джерел звуку (а) та розташування гучномовців (б)

На рис. 5.12: 1, 2,..., *N* - канали первинних звукових сигналів (сигналів джерел звуку); ПКП - панорамно-кодувальний пристрій, що входить до складу пульта звукорежисера і яким сигнали джерел звуку без проміжних спотворень (не маючи додаткової процедури кодування) безпосередньо перетворюють в двоканальний сигнал; ДКП - декодувальний пристрій сигналів стереопари Л и П. Гучномовці $Гм_1$,..., $Гм_N$ системи відтворення (СВ) у приміщенні прослуховування розташовані у вершинах рівнобедреної трапеції (рис. 5.12,*б*).

У системах з панорамним кодуванням замість громіздкої двоступінчастої процедури формування сигналів Л(t) і П(t), що дісталася у спадок від квадрафонії, використовують новий метод, який називають панорамним кодуванням. Кодування множини первинних сигналів $\{x_i(t)\}_N$ в лівий Л(t) і правий П(t) сигнали стереопари виконує ПКП за правилом

$$Л(t)= \sum_{i=1}^{N} a_{1i}(t)x_i(t);$$

$$П(t)= \sum_{i=1}^{N} a_{2i}(t)x_i(t),$$

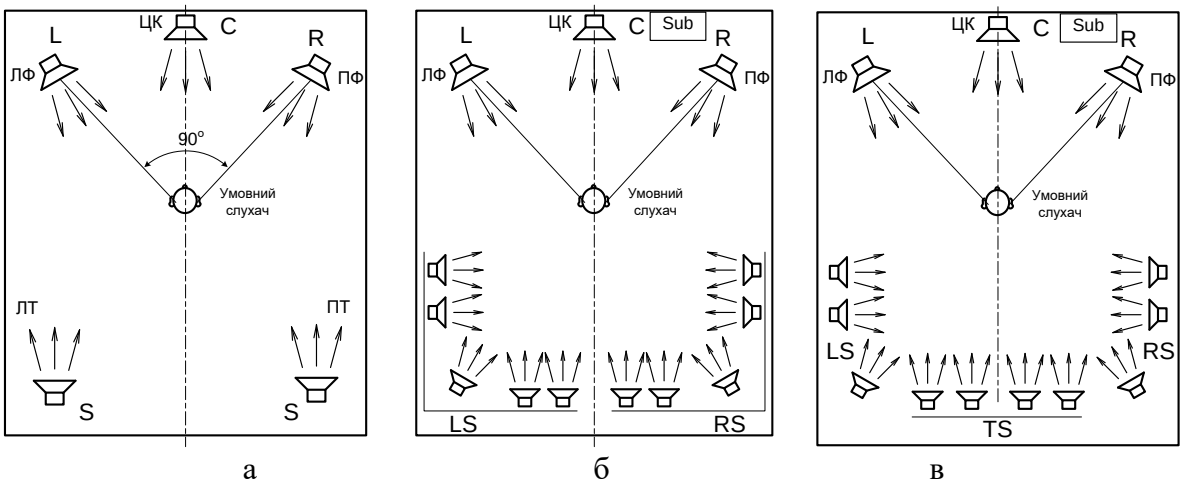
Множина пар коефіцієнтів $\{a_{1i}; a_{2i}\}$ утворює матрицю панорамного кодування А. Значення цих коефіцієнтів залежать від азимуту УДЗ та є функцією часу t в разі переміщення цього УДЗ у просторі. Розмір співвідношення фаз пари сигналів $Л_i(t)$ і $П_i(t)$ визначають оцінку азимуту УДЗ.

5.4.4. Звукові системи фірми Dolby Lab, DTS і SDDS

Системи фірми Dolby Lab

Міцне місце на ринку телекомунікацій та шоу-бізнесу займають системи просторового звучання Dolby Stereo (формат 3/1), Dolby Surround (3/2), Dolby Pro Logic (3/2), Dolby Digital (5.1) та Dolby EX (6.1). Застосовне такими системами розташування гучномовців у приміщенні прослуховування наведено на рис. 5.13.

На першому етапі розвитку систем фірми Dolby Lab коли в руках розробників було тільки два канали передавання-запису інформації, на основі матричної технології була розроблена двоканальна стереофонічна система підвищеної якості звучання Dolby Stereo, а трохи пізніше і система Dolby Surround. Обидві вони орієнтовані, перш за все, на кінематограф і містять кодувальний пристрій (КП) на стороні передавання і декодувальний пристрій (ДКП) - на стороні відтворення (рис. 5.14,*а*) [15].



а б в

Рис. 5.13. Розташування гучномовців у системі Dolby: *а* - Dolby Stereo, формат "3/1", *б* - Dolby Surround, Dolby Pro Logic (формат "3/2") та Dolby Digital (5.1), *в* - Dolby EX, формат "6.1"

На входи КП подають чотири сигнали: L, C та R - лівий, правий і центральний фронтальні сигнали, а також сигнал оточення S (Surround). Сигнали L, R і C отримані від мікрофонів, встановлених поблизу від естради відповідно в лівій та правій фронтальних частинах звукового поля студії. У цій зоні звукового поля основну роль грають сигнали прямих звуків, що надходять від виконавців по

найкоротшому шляху. Сигнал S отримано від мікрофонів, розташованих у віддаленій від естради області і він містить переважно реверберуючий звук приміщення.

Лівий L і правий R сигнали (рис. 5.14,*б*) через суматори $\Sigma_1 \ldots \Sigma_4$ без будь-яких змін, крім рівня, надходять на вихід КП. До кожного з них додано в рівному співвідношенні сигнал фронтального каналу, послаблений атенюатором А $дБ_1$ за рівнем на 3 дБ. Сигнал оточення S проходить атенюатор А $дБ_2$ де його послаблюють за рівнем також на 3 дБ. Далі цей сигнал надходить на смуговий фільтр СФ з частотами зрізу 100 і 7000 Гц, після чого його обробляє процесор системи шумозаглушення Dolby Noise Reduction і потім подають на вхід широкосмугового двоканального фазообертача ШФ, де в кожному з каналів зсувають за фазою відповідно на +90° і -90°. Далі обидва ці протифазні сигнали надходять на входи суматорів Σ_3, Σ_4. Сигнали L_1 та R_1, отримані на виходах КП, називають комплексними стереофонічними сигналами.

У разі прослуховуванні вихідних сигналів кодера Dolby через гучномовці $Гм_1$ і $Гм_2$ звичайної двоканальної стереофонічної системи звук каналу С існує однаково в обох каналах відтворення. Він утворює віртуальний гучномовець, розташований у центрі бази $Гм_1$ і $Гм_2$. Звук каналу S випромінюють ці гучномовці у протифазі. Цей звук сприймають як ледь помітний, примарний, розмитий між $Гм_1$ і $Гм_2$.

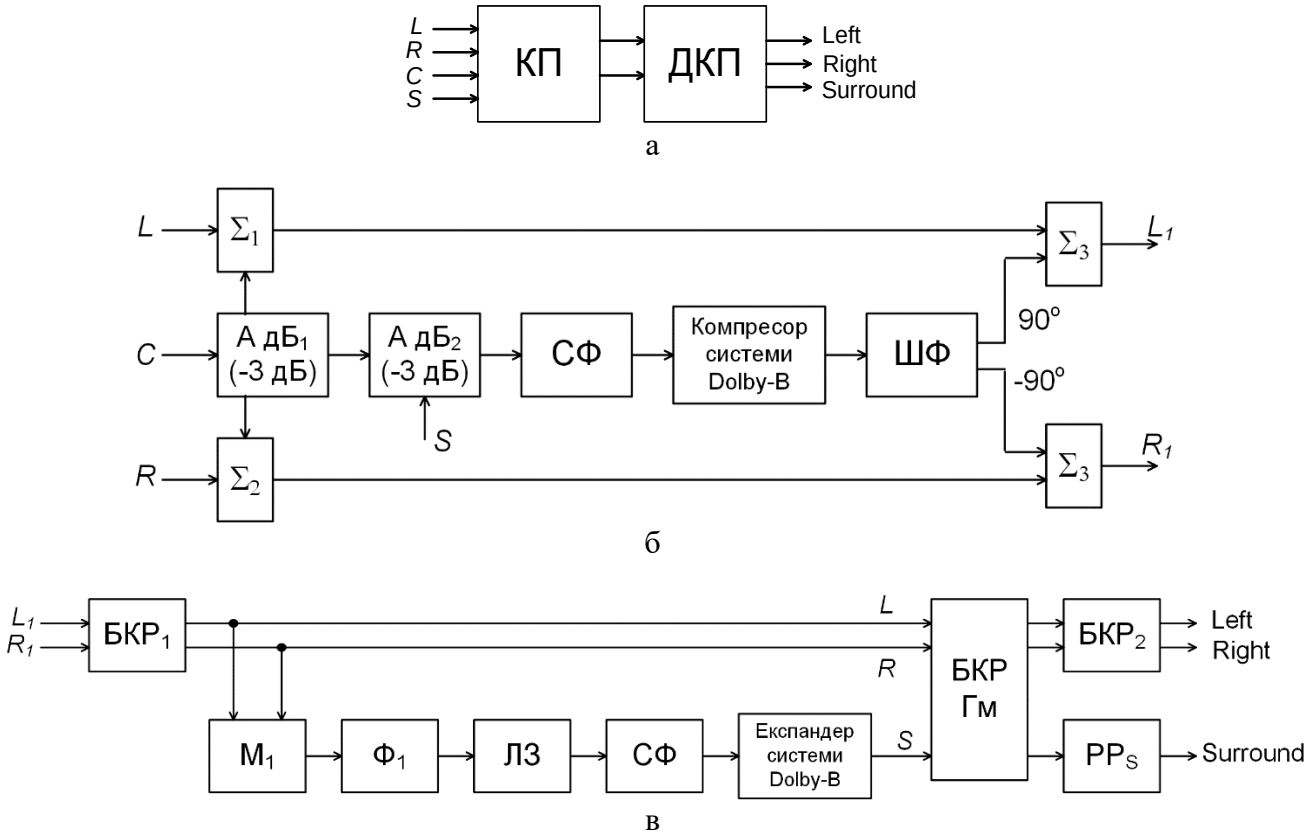


Рис. 5.14. Система Dolby Surround:
а - спрощена структурна схема;
б – кодувальний пристрій, *в* - пасивний декодувальний пристрій

Пасивний декодер системи Dolby Surround (рис. 5.14,*в*) відновлює вхідні сигнали КП. Він містить блок контролю балансу рівнів сигналів L_1 і R_1 ($БКР_1$),

матрицю $М_1$, що виділяє сигнал оточення S і є, по суті, віднімальним пристроєм, фільтр $Ф_1$, лінію затримки ЛЗ, смуговий фільтр СФ зі смугою частот 100...7000 Гц, експандер компандерної системи Dolby, блок контролю рівня гучності сигналів L, R і S ($БКР_{Гм}$), блок регулювання балансу рівнів сигналів L і R ($БКР_2$) і регулятор підстроювання рівня сигналу S ($РР_S$). Сигнал оточення S з виходу ДКП подається на одну (Dolby Stereo) або дві (Dolby Surround) розподілені системи гучномовців.

Гучномовець каналу наднизьких частот ННЧ (Soobwufer), що працює в смузі частот від 20 Гц до 125 Гц, можна розташовувати у будь-якому місці приміщення, бо він не впливає на просторову структуру стереопанорами. Проте фірма Dolby Lab рекомендує встановлювати не один, а два гучномовці каналу ННЧ. Один з них - на відстані однієї п'ятої ширини приміщення від однієї бічної стіни, а другий - на відстані однієї третини ширини приміщення ближче до іншої бічної стіни. Це дозволяє уникнути превалювання низьких частот у одній стороні приміщення, а також усунути можливість виникнення резонансів у приміщенні, які могли б з'явитися у разі центрального розміщення лише одного гучномовця ННЧ.

Смугу частот гучномовця фронтального каналу обмежено зверху значенням 9000 Гц. Лівий і правий фронтальні гучномовці випромінюють повну смугу частот (20…20000) Гц, тоді як гучномовці каналу оточення S працюють у смузі частот від 100 Гц до 7 кГц. Зауважимо, що компоненти сигналу S відтворюють додатково також лівий L і правий R фронтальні гучномовці, але вони випромінюють їх у протифазі і практично не впливають на сприйняття слухачем звуку каналу оточення.

Основним недоліком будь-якої матричної системи звукопередавання є наявність сигналів, що заважають і які спотворюють просторову структуру стереопанорами. Тому їхній рівень має бути якнайменшим. Зауважимо, що за умови впливу тільки одного із сигналів L, або C, або R, або S на вхід КП (рис. 5.14, а) на виходах ДКП будуть з'являтися поряд з корисним і сигнали, що заважають. Наприклад, якщо на вхід КП надходить сигнал L, то корисним на виході ДКП буде сигнал лише лівого фронтального гучномовця (Left): інші сигнали повинні розглядатися в цьому випадку як такі, що заважають (шкідливі).

Останні випромінюють сусідні відносно до основного гучномовці, вони ослаблені за рівнем щодо основного сигналу лише на 3 дБ. Інакше кажучи, роздільність (ізольованість) будь-якого основного каналу від сусідніх становить тут лише 3 дБ. КП та ДКП системи ідеальні. Цю умову, особливо в області верхніх частот, виконати дуже важко за наявності сумарного та різницевого перетворень вихідних сигналів у КП та ДКП. Саме з цієї причини смуга частот у каналах C та S обмежена зверху. Відомо, що високочастотні компоненти сигналів утворюють чіткі добре локалізовані компактні УДЗ. Тому їх видалення, особливо в каналі S, призводить до того, що слухачі не пов'язують сприйняття сигналу S з направленням на гучномовці оточення. Звукові образи каналу S здаються їм у такому випадку розмитими і розподіленими у просторі.

Система шумозниження Dolby Noise Reduction B додатково притлумлює в каналі S проникаючі в них компоненти сигналів L і R, якщо рівні останніх істотно нижче рівня сигналу S. Крім того, до канал S підключено також лінію затримки ЛЗ з часом запізнювання, що обирають в межах від (10...15) мс до (25...30) мс залежно

від об’єму приміщення і від відстаней до фронтальних (L, C, R) та тилових (S) гучномовців. Наявність ЛЗ гарантує, що звук фронтальних гучномовців досягне вух слухача раніше, ніж звук тилових, а значить, можливість помилки в оцінці фронтального і тилового напрямів буде виключена. Тим самим усувається можливість помилкової оцінки напрямку на звуковий образ внаслідок властивого слуху ефекту Хааса. З урахуванням всього викладеного реальна роздільність каналів L від R і C, від C, і навіть C від S і навпаки становить реально щонайменше 40 дБ.

Застосування пасивних декодерів не здатне забезпечити правильну локалізацію джерел звуку в просторі на значній площі прослуховування. За цією ознакою певну перевагу мають активні декодери з регульованим підсиленням каналу відтворення, так само як це зроблено в адаптивних стереофонічних системах звукопередавання.

Структурну схему активного ДКП системи Dolby Pro Logic наведено на рис. 5.15 [15]. Вона містить смуговий фільтр СФ з частотами зрізу 100 Гц і 7000 Гц, матрицю M_1, де виконують сумарно-різницеве перетворення вхідної пари сигналів L_1 і R_1, формувач сигналів керування (ФСК) , керовані підсилювачі КП та матрицю M_2 формування вихідних сигналів декодера (Left, Right, Center, Surround). Основну частину ДКП утворюють елементи СФ та ФСК, що виконують аналіз вхідної пари сигналів та формування сигналів керування і лише відносно невелика їх частина M_1, КП та M_2 бере участь у обробленні вхідної пари сигналів для отримання вихідних сигналів декодера.

Основне завдання ДКП - правильно визначити домінуючий напрямок, якщо такий є. Перед обробленням сигнали L_1 і R_1 нормують, щоб унеможливити помилки, пов'язані з неідентичністю характеристик каналів передавання-запису інформації.

Смуговий фільтр СФ відсікає високочастотні компоненти вхідних сигналів з тим, щоб виключити їх з наступного аналізу, так як саме вони найбільш схильні до фазових спотворень, що виникають в каналах передавання. Крім того, нагадаємо також, що на частотах вище 7000 Гц енергія звукових сигналів істотно нижча, ніж на середніх частотах, тому їх внесок в оцінку азимуту УДЗ незначний.

Далі сигнали L_1, R_1, L_1+R_1 і L_1-R_1 випрямляють та усереднюють (випрямлячі B_1, B_2, B_3, B_4), а отримані в результаті цієї операції їх обвідні надходять попарно на входи двох диференційних підсилювачів $ДП_1$ та $ДП_2$. При цьому напруга, що повільно змінюється на виході $ДП_1$, пропорційна логарифму відношення амплітуд обвідних і сигналів L_1 і R_1, а напруга на виході $ДП_2$ відповідно пропорційна логарифму відношення амплітуд обвідних сигналів.

Зауважимо, кожен із цих двох сигналів є біполярним, тобто, позитивним (якщо >) і негативним (коли = або <).

Очевидно, що якщо сигнал на виході $ДП_1$ позитивний, то це означає, що джерело звуку знаходиться праворуч від медіанної площини голови слухача, якщо при цьому ще й сигнал на виході $ДП_2$ також позитивний, то джерело звуку розташовано праворуч у фронтальній частині простору. При цьому його азимут у просторі повністю визначено цією парою сигналів. Якщо ці сигнали дорівнюють нулю, то домінування якогось у цьому випадку немає. Величину кожного з цих

сигналів у блоці порівняння БП порівнюють з пороговою напругою $E_{\text{п}}$ і, якщо один з цієї пари сигналів або обидва вони виявляються вище деякого порогового значення, це говорить про наявність домінуючого напрямку локалізації. Як тільки його наявність ідентифіковано, пристрій переходить в швидкий режим роботи і навпаки. Перемикання сталих часу виконують одночасно у блоках, позначених на рис. 5.15 буквою τ.

При роботі у швидкому режимі вона становить 3...5 мс, у повільному режимі - вже близько 1...2 с. Перетворювачі полярності сигналів і (ППС_1 і ППС_2) утворюють з двох біполярних сигналів відповідно чотири однополярних E_{L}, E_{R}, E_{C}, E_{S}.

Тепер вектор домінуючого напрямку виявляється вже представленим чотирма сигналами, які вже можна використовувати для регулювання коефіцієнтів передавання керованих підсилювачів КП для компенсації сигналів, що заважають. Вони утворюють матрицю, що складено з восьми таких підсилювачів, на виходах якої маємо відповідно вісім сигналів $E_{\text{L}}\text{L}_1$, $E_{\text{L}}\text{R}_1$, $E_{\text{R}}\text{L}_1$, $E_{\text{R}}\text{R}_1$, $E_{\text{C}}\text{L}_1$, $E_{\text{C}}\text{R}_1$, $E_{\text{S}}\text{L}_1$, $E_{\text{S}}\text{R}_1$. З урахуванням вхідних сигналів L_1 і R_1 на вихідну матрицю M_2 декодера системи Dolby Pro Logic надходить в цілому десять сигналів, де їх підсумовують і віднімають з різними ваговими коефіцієнтами, утворюючи, зрештою, вихідні сигнали ДКП - Left, Right, Center та Surround. Декодер забезпечує точне передавання домінуючого напрямку, перерозподіл потужності вихідних сигналів так, щоб виключити зміну гучності звучання і зробити регулювання коефіцієнтів передачі непомітними на слух.

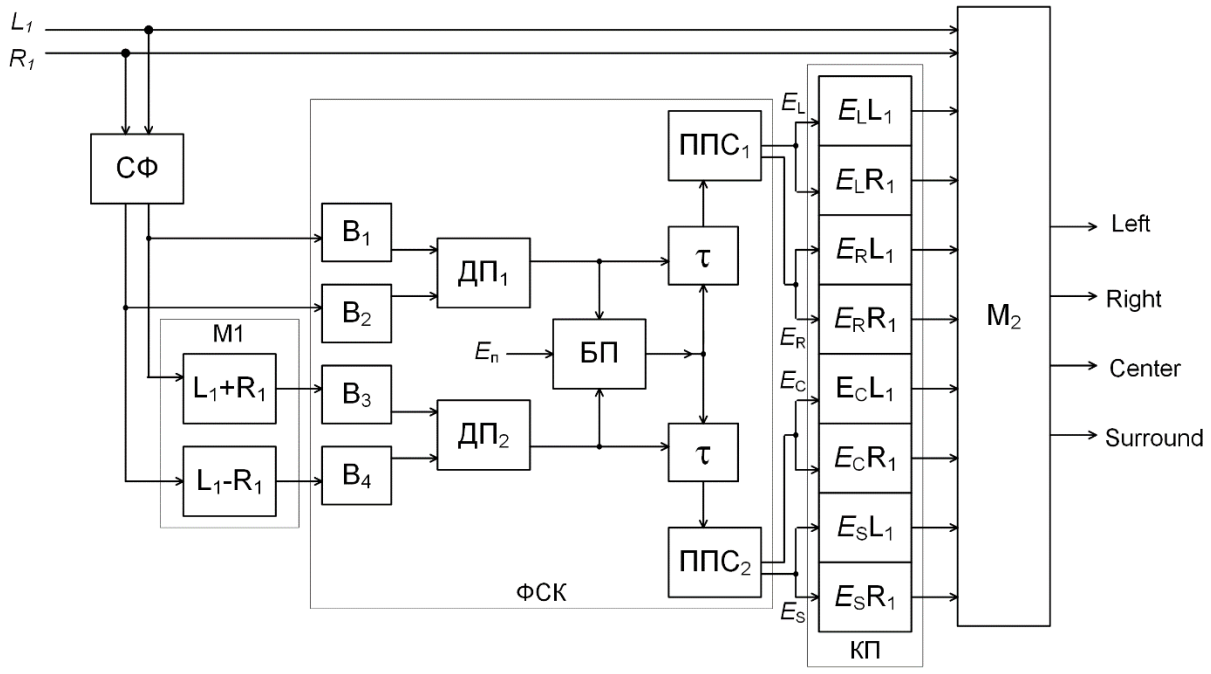


Рис. 5.15. Структурна схема активного декодера системи Dolby Pro Logic

Зазвичай у системи Dolby вводять також додатковий канал наднизьких частот (ННЧ) і відповідний йому гучномовець ННЧ (Subwoofer), що забезпечує відтворення сигналів у смузі частот до 80…125 Гц. Нижня межа смуги частот, відтворюваних фронтальними гучномовцями підвищена до 80...125 Гц без втрати якості. При цьому тракт наднизьких частот оптимізовано для отримання

мінімальних спотворень на нижчих частотах. Інші канали відтворення визначають можливості системи з передавання просторової інформації та їх оптимізують саме за зазначеним критерієм.

Системи Dolby Digital і Dolby EX є дискретними системами звукопередавання, тобто, вони мають відповідно 5 та 6 каналів передавання-запису інформації. У них відсутні КП і ДКП, але залишено ННЧ канал.

Сучасні системи Dolby Digital базовано на шестиканальних і семиканальних фонограмах (рис. 5.16). Лівий, центральний і правий фронтальні канали дозволяють точно визначити позицію джерела звуку на екрані. Окремі "розділені" лівий, правий, задні канали оточення залучають глядача до фільму своїми навколишніми і оточуючими звуками. А додатковий низькочастотний канал додає напруження сприйняття події на екрані. Dolby Digital - цифровий формат, розроблений, в першу чергу, для кінематографу. Блоки цифрових даних складено з множини невеликих темних і прозорих крапок, розташованих між перфорацією і кодують 6 каналів цифрового звуку. Завдяки цифровій формі представлення сигналу досягають чіткішої локалізації звукових образів.

Новий вигляд кінофільму з шестиканальним цифровим об'ємним звуком занурює глядача прямо в центр дії. Система Dolby дозволяє продукувати настільки високоякісний звук в кінозалі, що у глядача виникає ефект присутності і участі у дії, яку він бачить на екрані. Глядач оточений тією звуковою атмосферою, яка була створена режисером під час створення кінофільму. Природно, для того, щоб повністю відчути всі можливості Dolby Digital, треба вибирати місця в центрі залу, де звук повністю "охоплюватиме" глядача. У кінотеатрах - це VIP-місця.

Основною зоною озвучування глядацьких залів в режимі кінопоказу є партер. Принцип отримання звукової інформації глядачем відмінний від концертного. Заекранна фронтальна система забезпечує високий рівень звукового тиску, ясність відтворення музичного матеріалу, розбірливість мови, чистоту і багатство спецефектів і повний частотний діапазон.

Сучасні кінотеатри, зазвичай, обладнують тими або іншими багатоканальними звуковими системами відтворення фонограми кінофільму.

Dolby Stereo Digital - одна з сучасних систем багатоканального відтворення фонограм кінофільмів, розроблена в 1992 р. Зчитування фонограми здійснюють спеціальним цифровим рідером (зчитувачем) з кіноплівки (звукова інформація розташована між перфораціями кіноплівки). У системі застосовано цифрове кодування фонограми AC-3, що дозволяє усунути вплив потертості плівки, забезпечує точне декодування сигналу і якісне перетворення в аналоговий сигнал, що надходить на підсилювачі й далі на гучномовці залу. Dolby Stereo Digital - система 6-ти канального відтворення фонограми кінофільму. Три гучномовці розташовані за екраном (Центральний, Лівий і Правий), два ланцюжки з декількома гучномовцями розташовані з боків і позаду (на лівій і правій сторонах) - це гучномовці "оточення" - Surround, і один гучномовець (або декілька) розташовано за екраном для відтворення наднизьких частот.

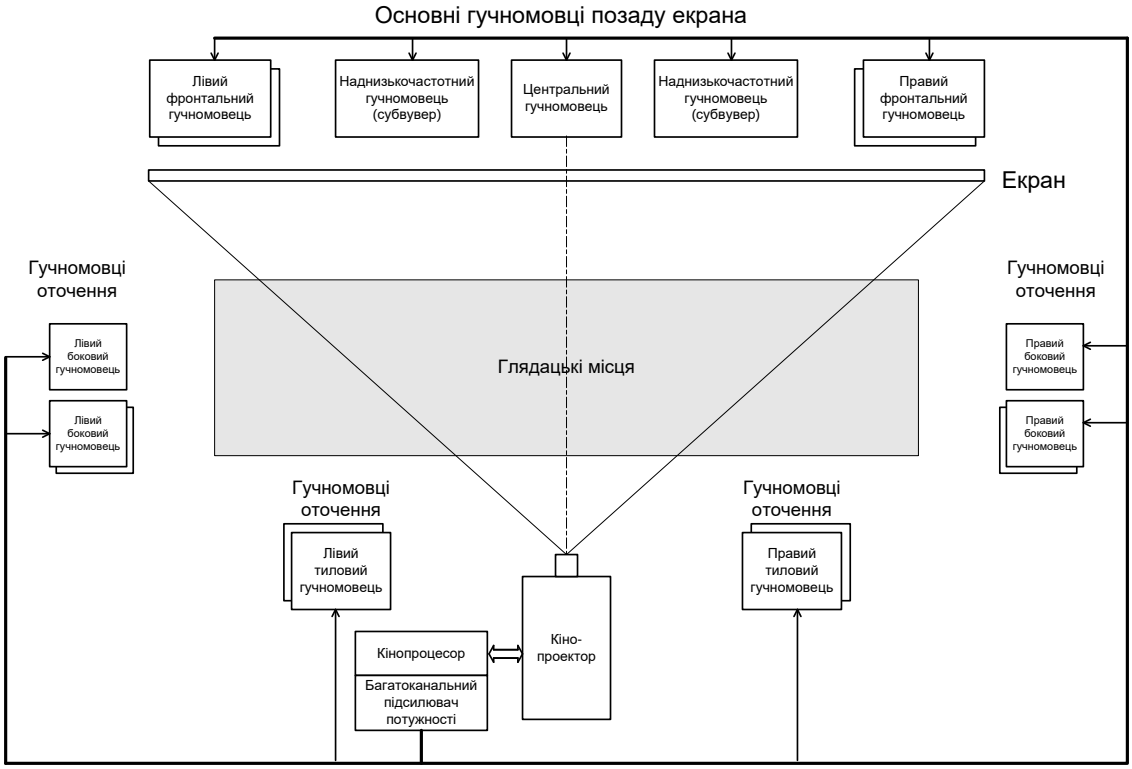


Рис. 5.16. Звукопідсилювальний комплекс кінотеатру

Dolby Stereo Digital Surround EX - найновіша система, модернізована на базі Dolby Stereo Digital. Прем'єра цієї системи відбулася в травні 1999 р. під час початку прокату фільму Дж. Лукаса "Зоряні війни: Епізод 1". Основна відмінність від Dolby Stereo Digital у наявності додаткового каналу оточення безпосередньо на задній стінці залу (у такий спосіб глядач перебуває в повному оточенні 6-ти каналів звуку (попереду: центр, лівий, правий; з боків: лівий і правий; а позаду - центральний канал оточення). Ця система не вимагає демонтажу встановленої Dolby Stereo Digital, а тільки додаткової установки одного блоку-декодера (SA-10), ще одного каналу підсилення і перекомутації гучномовців оточення [15].

Dolby Stereo - система, розроблена компанією Dolby Laboratories на початку 70-х років. Повністю аналогова система. Зчитування фонограми здійснюють аналоговим рідером, установленим замість звичайної моно системи кінопроектора. Фонограма Dolby Stereo розташована на місці звичайної монофонограми кінофільму.

Кодер Dolby Digital здатний обробити вхідний сигнал, принаймні, 20-ти розрядним динамічним цифровим сигналом з діапазоном частот від 20 Гц до 20 кГц ±0.5 дБ (-3 дБ на 3 і 20300 Гц). Низькочастотний канал покриває діапазон від 20 Гц до 120 Гц ±0.5 дБ (-3 дБ на 3 і 121 Гц). Підтримує частоти дискретизації (32, 44.1 і 48) кГц. Ширина вихідного потоку даних може варіюватися від мінімуму в 32 Кбіт/с для одного монофонічного каналу, до максимуму в 640 Кбіт/с, що задовольняє всьому можливому діапазону вимог. Типовими є швидкості в 384 Кбіт/с для "5.1" канального Dolby Digital споживчого формату, і 192 Кбіт/с для двоканального передавання звуку.

Системи DTS і SDDS.

DTS - Digital Theatrical System - система, розроблена американською фірмою DTS у 1993 р. Принципова відмінність цієї системи від всіх описаних вище в тому, що фонограму кінофільму зчитують не з кіноплівки, а з лазерного CD-диска. Зчитування здійснюють спеціальним CD-програвачем, який синхронізовано з кіноплівкою спеціальною доріжкою синхронізації, нанесеної на кінокопію [15].

Розроблювачі формату порахували, що виділяти на кіноплівці (де вже розмістилися

аналогова доріжка і Dolby Digital) додаткове місце для запису багатоканального цифрового звуку не має сенсу, тому було прийняте рішення записати звук на CD-ROM, і з нього відтворювати фонограму в кінотеатрах. Для точної синхронізації з зображенням на кіноплівку друкують часовий (тайм) код. Тайм-код містить не тільки стандартну синхронізаційну інформацію (години, хвилини, секунди, кадри), але і кодовий номер фільму і рулона кіноплівки. Кінопроцесор звіряє цю інформацію з коду на кіноплівці з інформацією, що утримується на диску, і допускає відтворення тільки в тому випадку, якщо диск відповідає фільмові, що демонструють. Для зчитування часового коду з кіноплівки потрібно відносно проста насадка на проектор (рідер), що підключають до DTS-кінопроцесора з вбудованими дисководами CD-ROM. Сам тайм-код через великі розміри сигнальних точок дуже стійкий до зносу і може бути зчитаний навіть в разі ушкодження плівки. Якщо ж часовий код в силу якихось причин перестає надходити на процесор, він відтворює звук з CD-ROM ще чотири секунди, після чого (якщо не відновився часовий код) переключає на резервну аналогову доріжку з Dolby Stereo.

В DTS для кінопоказу застосовують схему компресії apt-X100, розроблену компанією Advanced Processing. У стандартному варіанті DTS кодують п'ять незалежних каналів цифрового звуку з розрядністю 16 біт і частотою дискретизації 44,1 кГц. Шостий (сабвуферний) канал просто підмішують в лівий і правий surround-канали, частота розділу - 80 Гц. Таким чином, у кінотеатральному DTS сабвуферний канал не є цілком незалежним, однак ця обставина не дуже впливає на результат - у більшості кінотеатрів surround-гучномовці і не розраховано на передавання частот нижче 80 Гц.

Завдяки apt-X100 для кодування в DTS вдалося досягти ступеня стиснення даних 4:1 і потоку даних 882 Кбіт/с без помітної втрати якості звучання. Таким чином, на один CD-ROM (а використовують саме CD-ROM, а не аудіо-CD, через більшу завадостійкість і, отже, надійність першого) міститься до 100 хвилин багатоканального звуку. Якщо фільм триває довше 100 хв., то звуковий супровід розміщують на двох або більш дисках. Сучасні кінопроцесори DTS мають два або три вбудованих дисководи CD-ROM.

SDDS - Sony Dynamic Digital Sound - система, розроблена компанією Sony в "противагу" системам Dolby. Основні принципи роботи аналогічні Dolby Stereo Digital. Зчитування фонограми здійснюють спеціальним цифровим рідером із краю кіноплівки, де розташовано фонограму SDDS. Від Dolby Stereo Digital система SDDS відрізняється також розташуванням каналів гучномовців у залі. Усього каналів вісім: п'ять за екраном (лівий, напівлівий, центр, напівправий, правий) два канали оточення як і в Dolby Stereo Digital – лівий та правий і канал наднизьких частот.

Таблиця 5.3 Характеристики сучасних форматів запису фонограм в фільмах

Порівнювані параметри	Dolby Stereo	Dolby Surround (Pro Logic)	Dolby Digital	DTS	SDDS
Алгоритм стиснення	-	-	AC3	apt-X100	Atrac
Число незалежних каналів	2	2	6	6	8
Всього каналів	3	5	6; 7*;8**	6; 7***	8
Число surround-каналів	-	1	2;3*;4**	2; 3***	2
Частотний діапазон surround-каналів, Гц	-	100-7000	20-20000	80-20000	20-20000
Наявність незалежного низькочастотного каналу	немає	є	є	є	є
Бітрейт для кіноплівки, Кбіт/с	-	-	320	882	-

* для формату Dolby Digital Surround EX

** для формату Dolby Digital THX Surround EX

*** для формату DTS-ES

SDDS є в даний час є найбільш потужним і технологічним форматом, тому що дозволяє кодувати на кіноплівку до восьми незалежних каналів звуку за схемою 6.1. Два «зайвих» канали розробники з Sony віддали для додаткових лівого і правого гучномовців за екраном. Цифрову доріжку SDDS розташовано на самому краю кіноплівки за перфорацією, а біти представлено все тими ж пікселями, хоча і меншого розміру, ніж у Dolby Digital. Через те, що доріжка проходить по всій довжині плівки і розмір пікселів досить невеликий, у SDDS вдалося вмістити 8 каналів звуку з досить низьким коефіцієнтом стиснення (використовують алгоритм ATRAC, що вперше з'явився на міні-диску), тому якість звучання фільмів у цьому форматі дуже висока. В SDDS втілена дуже мотужна система корекції помилок, крім того, цифрову звукову доріжку дублюють по обидва боки плівки, що створює подвійну надлишковість. Якщо ж раптом цифрова доріжка все-таки відмовить, декодер перемикає на резервну аналогову, як і в усіх сучасних цифрових форматах. На жаль, SDDS доступний тільки в кінотеатрах, для побутового застосування цей формат не був адаптований, що є принциповою позицією Sony.

У табл. 5.3 наведено порівняльні характеристики сучасних форматів фонограм звукового супроводу фільмів [15].

5.5. Універсальний формат звукопередавання

Для оцінювання якості звучання форматів звуковідтворення залежно від кількості та місця розташування гучномовців було проведено ряд експертних досліджень. Результатом експертиз з'явилася узагальнена оцінка якості звучання Q [13].

На рисунку 5.17,*а* та *б* зображено відповідне розташування мікрофонів у приміщенні запису і гучномовців у приміщенні відтворення. Варіанти систем позначено на рис. 5.17,*б* цифрами 0, 1,..., 11.

Узагальнену оцінку якості звучання Q залежно від системи відтворювання наведено на рис. 5.17,*в*. На осі абсцис зазначено порядковий номер системи. За базовий варіант для порівняльного прослуховування прийнято звучання звичайної стереофонічної системи ($n = N' = 2$), тому для неї $Q = 0$. Розташування мікрофонів і гучномовців однакове, кожен мікрофон окремим каналом пов'язаний з відповідним гучномовцем.

Результати експертиз дозволяють зробити такі висновки:

1) збільшення числа окремих каналів передавання підвищує якість звучання; кращі варіанти багатоканальних систем (6, 7 і 11 на рис. 5.17,*в*) упевнено переважають звичайну стереофонічну систему звукопередавання, їх впровадження може забезпечити новий якісний стрибок у розвитку радіомовлення, телебачення, кінематографа;

2) для кожного числа окремих каналів передавання існує свій оптимальний за критерієм просторового слуху людини варіант розміщення гучномовців у приміщенні для прослуховування, яке забезпечує гранично досяжну для даного значення n якість звучання Q. При цьому, чим більше область простору, у межах якої система звукопередавання здатна забезпечити сприйняття напрямків приходу звуків, тим вища (за інших рівних умов) забезпечувана нею якість звучання;

3) у разі багатоканального звукопередавання основну роль відіграють ознаки якості, пов'язані з просторовим сприйняттям: глибиною звукових образів, повнотою звучання, ясністю звучання.

Найбільш очевидним шляхом підвищення якості звучання є збільшення числа окремих каналів передавання звуку *n* і відповідно з цим числа гучномовців системи відтворення за умови оптимального розміщення останніх відносно слухача.

Все різноманіття систем передавання і відтворення звукових сигналів охоплює новий універсальний формат, що отримав назву "Musicam-Surround-compatible multi channel coding" (рис. 5.18). Перше й останнє слова означають спосіб цифрового представлення звукових сигналів (ISO/IEC 11172-3, MPEG-1), а всі інші слова відносять до формату їх відтворення в житловому приміщенні. Важливо, що даний формат містить всі зазначені вище формати, використовує однаковий метод кодування для кожного із звукових сигналів і з цієї причини може бути введений поетапно, шляхом доповнення і розвитку вже існуючих систем передавання звукових сигналів. Він універсальний і призначений для використання в радіомовленні, телебаченні, кінематографі, у домашніх аудіовідеокомплексах. Універсальність та сумісність із вже існуючими форматами звукопередавання - його важлива перевага. Рекомендоване розміщення гучномовців у приміщенні прослуховування для кожного з цих форматів наведено на рисунках 5.3,*в*, 5.7 і 5.17.

Відповідно до цього формату, наведеного на рис. 5.18, на стороні передавання формують п'ять звукових сигналів:

- лівий L (містить в основному інформацію щодо лівої фронтальної частини звукового поля первинного приміщення - студії);
- правий R (містить переважно інформацію щодо правої фронтальної частини звукового поля студії);
- фронтальний C (містить інформацію щодо фронтальної частин звукового поля студії);
- лівий ефектний тиловий LS (містить в основному інформацію щодо реверберуючих звуків лівої тилової частини звукового поля студії);
- правий ефектний тиловий RS (містить в основному інформацію щодо реверберуючих звуків правої тилової частини звукового поля студії).

Тут важливо зазначити те, що на пари сигналів L і R вимогу сумісності не поширено.

Матрицею 1 (рис. 5.18) з цієї сукупності сигналів формують лівий Л і правий П базисні сигнали стереопари за правилом

$$Л = L + 0{,}7071C + 0{,}7071LS;$$
$$П = R + 0{,}7071C + 0{,}7071RS.$$

Зауважимо, що сигнали Л і П утворюють сумісний стереосигнал, їх сума дає повноцінний монофонічний сигнал виду М = Л + П.

Всього на стороні передавання матрицею 1 формують наступні п'ять звукових сигналів, представлених у форматі "3/2":

$$Л = L + 0{,}7071C + 0{,}7071LS;$$
$$П = R + 0{,}7071C + 0{,}7071RS.$$
$$C_1 = 0{,}7071C;$$

$$S_1 = 0{,}7071LS + 0{,}7071RS;$$
$$S_2 = 0{,}7071LS - 0{,}7071RS.$$

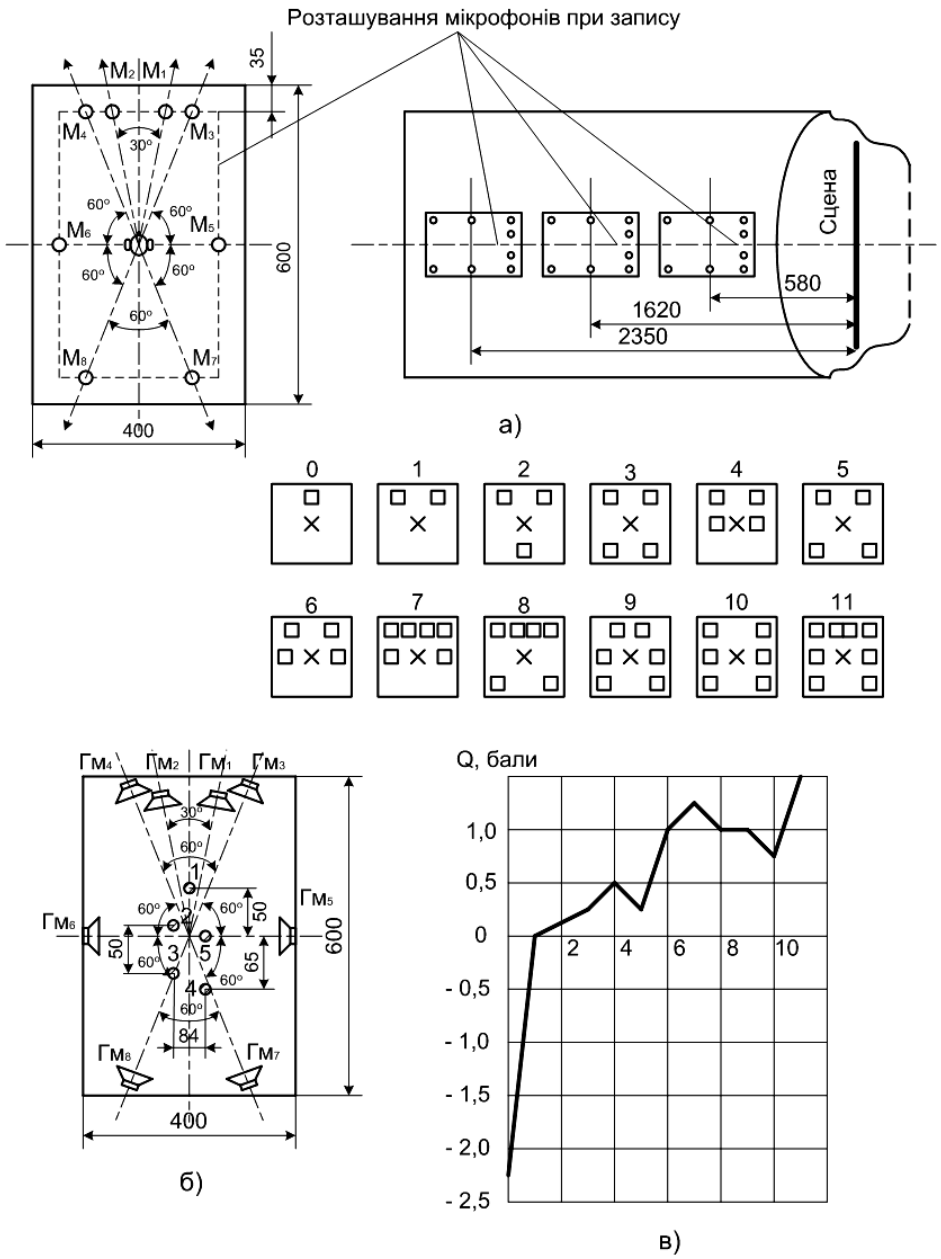


Рис. 5.17. Розташування мікрофонів (*а*), гучномовців (*б*) і узагальнена оцінка якості звучання (*в*) для досліджених варіантів багатоканальних стереофонічних систем

Цифрове передавання цих сигналів виконують у форматі MUSICAM відповідно до європейського стандарту ISO/IEC 13818-3. У разі цифрового передавання сигнали Л, П, C_1, S_1 і S_2 поєднують MUSICAM-кодером у два окремих цифрових потоки, один із яких (основний) являє собою базисний сигнал стереопари Л/П звичайної стереофонії, а інший забезпечує передавання додаткових фронтального C_1 і просторових ефектних сигналів S_1 і S_2 (цифровий потік додаткових сигналів $C_1/S_1/S_2$). У цю групу додають також сигнали керування процесом декодування і сигнали ідентифікації формату передавання і відтворення. Після матриці 2 маємо (рис. 5.14):

$$L' = 1{,}000Л - 1{,}000C_1 - 0{,}500S_1 - 0{,}500S_2;$$
$$R' = 1{,}000П - 1{,}000C_1 - 0{,}500S_1 - 0{,}500S_2;$$
$$C' = 1{,}4142C_1;$$
$$LS' = 0{,}7071S_1 + 0{,}7071S_2;$$
$$RS' = 0{,}7071S_1 - 0{,}7071S_2.$$

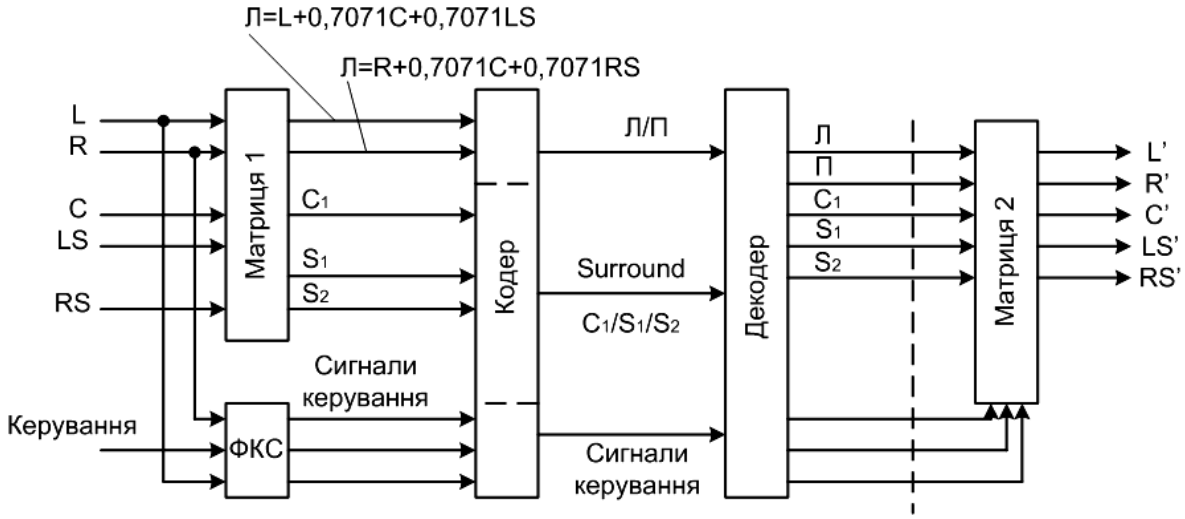


Рис. 5.18. Універсальний формат формування, передавання і відтворення звукових сигналів

Відновлені сигнали підводять до відповідних гучномовців системи відтворення (див. рис. 5.7,*б*).

5.6. Апаратне забезпечення систем звукопередавання

5.6.1. Звукові процесори

У кінотеатрі кінопроцесор є серцем звукової системи. Всі звукові джерела підключають до процесора, що відповідним чином обробляє сигнали й подає їх на підсилювачі потужності. Кінопроцесор здійснює цифрове і аналогове оброблення сигналів. Програмне забезпечення, функції якого легко програмують, забезпечує керування всіма існуючими звуковими форматами, як на кіноплівці, так і на інших альтернативних носіях.

В наш час чільне місце на ринку зайняли багатоканальні системи стереофонічного відтворення, які мають від трьох до шести гучномовців. Сигнали для живлення додаткових гучномовців формують найчастіше з двох сигналів спеціальної, наприклад Dolby-Stereo, або звичайної стереофонічної фонограми, або беруться безпосередньо, якщо мова йде про формат "Surround-compatible multi-channel system". Задачі оброблення сигналів вирішують так званими кінопроцесорами або звуковими процесорами (ЗП).

Структурну схему комплексу апаратури для відтворення стереофонічних сигналів з підвищеною якістю звучання наведено на рис. 5.19. Апаратура цього класу звичайно має чотири або п'ять основних каналів відтворення з гучномовцями ЛФ, Ц, ПФ, ЛТ (або LS), ПТ (або RS) (рис. 5.19,*б*). Фронтальні гучномовці ЛФ, ПФ

відтворюють сигнали в смузі частот від (20...30) Гц до (20...30) кГц; центральний і тилові - від (80...100) Гц до (15...20) кГц. Часто в систему звуковідтворення вводять також додатковий канал наднизьких (ННЧ) частот (Subwoofer) і відповідний йому гучномовець ННЧ, що забезпечує відтворення сигналів у смузі частот до (80...125) Гц. Нижня границя смуги частот, відтворених фронтальними гучномовцями, у даному випадку може бути підвищена до (80...125) Гц без втрати якості. При цьому тракт наднизьких частот оптимізують з метою забезпечення мінімальних спотворень на нижніх частотах. Інші канали відтворення визначають можливості системи для передавання просторової інформації й оптимізують саме за зазначеним критерієм.

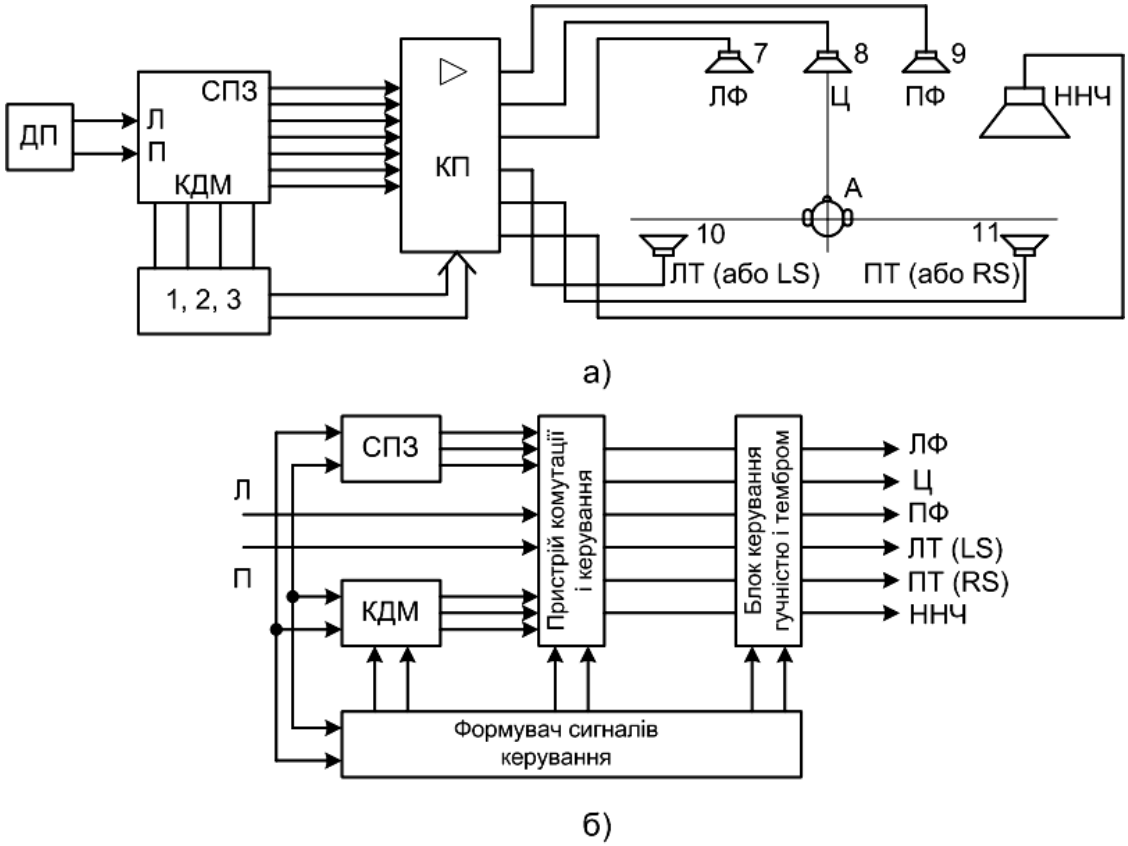


Рис. 5.19. Структурна схема комплексу апаратури для відтворення стереофонічних сигналів з підвищеною якістю звучання (*а*) та структура звукового процесора (*б*):
ДП - джерело програми; СПЗ - синтезатор просторового звучання (блок оброблення сигналів звичайної стереофонії); КДМ - керована декодувальна матриця (блок оброблення сигналів кодованої фонограми, наприклад системи "Dolby-Stereo"); КП – керовані підсилювачі 1, 2, 3,...6-го каналів відтворення; 7, 8, 9, 10, 11, 12 - гучномовці системи відтворення; Л, П - лівий і правий сигнали стереопари; $Л_ф$, Ц, $П_ф$ - лівий, центральний і правий фронтальні сигнали системи відтворення; ЛТ, ПТ - лівий і правий тилові сигнали або лівий і правий просторові сигнали "оточення" LS, RS; НН - канал наднизьких частот; А - оптимальне місце прослуховування

Удосконалення звукових процесорів з багатоканальними системами відтворення ведуть за двома напрямками, які передбачають розробку декодувальних пристроїв, призначених для оброблення спеціальних, кодованих фонограм, наприклад системи "Dolby-Stereo", Dolby Pro Logic і пристроїв для

оброблення сигналів звичайних двоканальних фонограм. Ці два блоки є основними в складі ЗП.

КДМ заснована на використанні сумарно-різницевих перетворювачів і керованих підсилювачів, що формують фронтальні, тилові і центральні сигнали, в залежності від сигналів керування.

Блок керування ЗП формує: сигнали керування для роботи пристрою в режимі "Dolby-Stereo-Decoder"; сигнали керування для регулювання рівня гучності і балансу каналів відтворення; тестові сигнали, необхідні для слухової оцінки працездатності пристрою у цілому. Крім того, він може формувати сигнали відеоряду, що відображають режим роботи апаратури звуковідтворення (бібліотеку мальованих зображень, які відображають поточний стан сигналів стереопари, погоджений з особливостями просторового слухового сприйняття).

5.6.2. Пристрої оброблення стереофонічних сигналів

Пристрої для оброблення сигналів традиційної стереофонії називають синтезаторами просторового звучання (СПЗ). СПЗ вирішують дві задачі: збільшення ширини стереопанорами та створення у слухача відчуття більшої просторовості, об'ємності звучання, ефекту оточення звуком (рис. 5.20). Первинні УДЗ, що складають окремі звукові образи стереопанорами, зображено тут як деякі об'єми, що мають визначені розміри, хрестиками позначено так називані вторинні УДЗ, формовані реверберaційними продовженнями сигналів відтворених сигналів. На рис. 5.20,*а* наведено вихідну стереопанораму, властиву відтворенню сигналу формату "2/0", на рис. 5.20,*б* - її розширення (розтягування) і на рис. 5.20,*в* - ситуація, коли тилові гучномовці використовують для створення ефекту оточення звуком і відтворюють сигнали з підвищеною гучністю звучання, і які формують розмиті, об'ємні звукові образи в тиловій частині простору. При цьому просторова структура вихідної стереопанорами може залишатися незмінною або піддаватися додатковому розширенню. В останньому випадку довжини кожного з УДЗ також змінюються [15].

Сигнали для формування УДЗ у тиловій частині простору утворюють із сигналів стереопари Л(t) і П(t). Умовою їх появи є відсутність кореляційного зв'язку між сигналами тилових ЛТ, ПТ і фронтальних ЛФ, Ц, ПФ каналів відтворення. Ці сигнали можуть бути отримано з реверберatора, ліній затримок, фільтрів з різними АЧХ і ФЧХ. Сигнали LS і RS створюють відчуття об'ємності, просторовості звучання, ефект оточення звуком.

Будова синтезаторів просторового звучання основана на застосуванні сумарно-різницевих перетворювачів. Наприклад формування сигналів для тилових каналів забезпечується таким чином. Сигнали Л и П подають на СРП1 і СРП2 (рис. 5.21). Вихідні сигнали СРП мають вид RS = 0,7П - 0,5Л та LS = 0,7Л - 0,5П. Таке перетворення дає змогу одержати різні сигнали для лівого і правого тилових каналів відтворення. Ці сигнали несуть інформацію щодо акустичних особливостей первинного приміщення. Вони мають підвищену гучність. У найпростіших СПЗ їх можна використовувати безпосередньо для живлення тилових гучномовців. Зауважимо, що протифазне живлення тилових гучномовців підсилює ефект оточення, охоплення звуком.

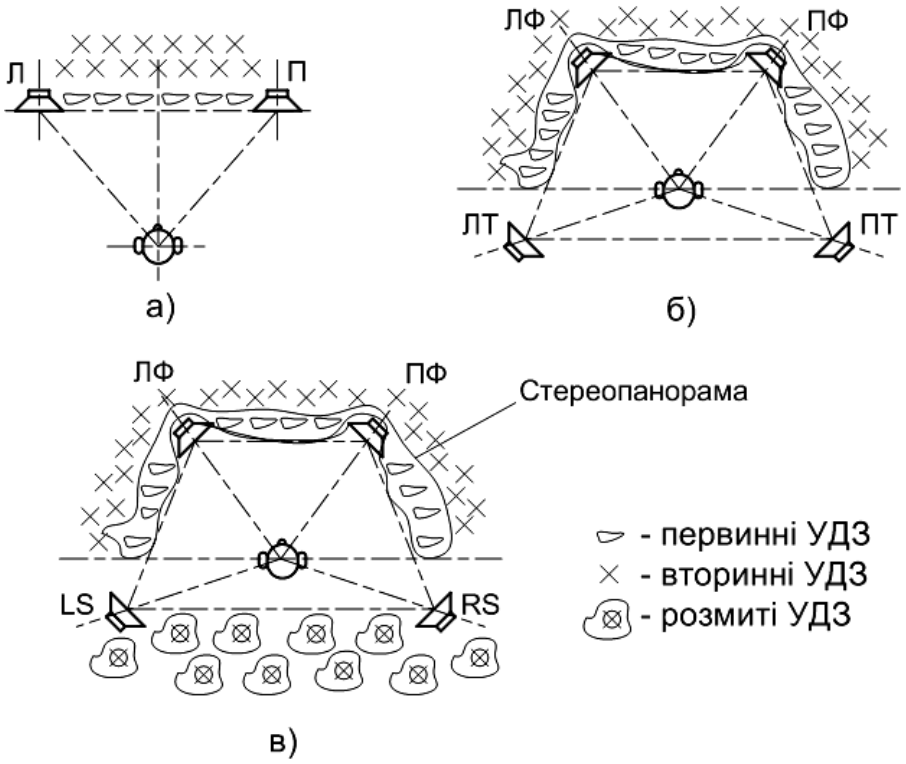


Рис. 5.20. Різновиди стереопанорам з відображенням УДЗ для стереофонічної системи формату 2/0 (*а*), багатоканальної системи формату 4/0 (*б*) та формування розмитих УДЗ (*в*)

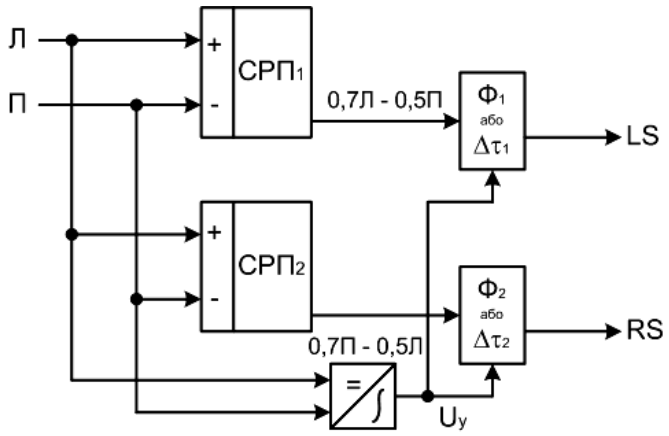


Рис. 5.21. Схема формування просторових сигналів для живлення тилових гучномовців із застосуванням фазових фільтрів або ліній затримок

Для обмеження кореляційного зв'язку сигналів фронтальних і тилових гучномовців застосовують фазові фільтри. У разі використання фільтра другого порядку модуль коефіцієнта кореляції R між сигналами тилових і фронтальних каналів не перевищує значення 0,5. У цьому випадку спостерігають стійкий ефект розтягування стереопанорами (рис. 5.20,*б*) за одночасного деякого збільшення довжини крайніх УДЗ. Якщо ж застосовують фазові фільтри четвертого порядку, то модуль R для даних сигналів не перевищує значення 0,1. При цьому в тильній частині простору утворюються додаткові УДЗ (рис. 5.20,*в*) і виникає відчуття оточення слухача звуком, причому більш об'ємним і просторовим. Підвищення

якості можна оцінити як таке, що упевнено сприймається слухачами.

Для керування об'ємністю звучання можна використовувати зміну частоти настроювання фазового фільтра. У випадку, коли частота настроювання останнього виходить за межі діапазону частот, значимого для слуху в разі передавання просторової інформації (вище 7 кГц або нижче 200 Гц), зростає величина кореляційного зв'язку між сигналами фронтальних і тилових каналів. Стереопанорама при цьому стягується до фронтальної пари гучномовців. Однак, її довжина все-таки тут більше, ніж за умови роботи лише фронтальної пари гучномовців. Якщо ж частота настроювання фільтра лежить у межах 300...500 Гц (для фільтра другого порядку) або 200 Гц і 3 кГц (для першої і другої ланок фазового фільтра четвертого порядку), то ступінь кореляційного зв'язку сигналів фронтальних та тилових каналів мінімальний і слухач відчуває появу розмитих додаткових УДЗ у тиловій частині простору (рис. 5.20,*в*). Виникає ефект оточення звуком, звучання стає більш об'ємним і просторовим.

Кращі результати дає застосування в колах живлення тилових гучномовців ліній затримок (ЛЗ). Введення часового зсуву $\Delta\tau$ зменшує кореляційний зв'язок між фронтальними ЛФ, ПФ і тиловими ЛТ, ПТ парами сигналів, сприяючи їх роздільному сприйняттю і зменшуючи їх взаємну маскувальну дію. Значення, в більшості, складає (9...35) мс, іноді до 100 мс і більш. Наявність запізнілих на (12...35) мс сигналів з рівнем, зниженим на 6...9 дБ, набагато поліпшує прозорість звучання, створює враження розширення розмірів стереопанорами, відчуття об'ємності звучного простору.

Більш кращі результати забезпечують пристрої імітації реверберaційного процесу концертного залу (студії). Їх також реалізують на основі ЛЗ. Принцип формування сигналу імітації реверберaційного процесу у цих пристроях заснований на рециркуляції вхідних сигналів петлями зворотного зв'язку. При цьому сигнали тилових гучномовців будуть містити прямий сигнал, сигнал, затриманий на інтервал часу $\Delta\tau_1$ або $\Delta\tau_2$, та сукупність затриманих сигналів, яку утворено як згортку вихідної реверберації у вхідному сигналі й в імпульсній характеристиці рециркулятора, який є гребінчастим або всепроникним фільтром.

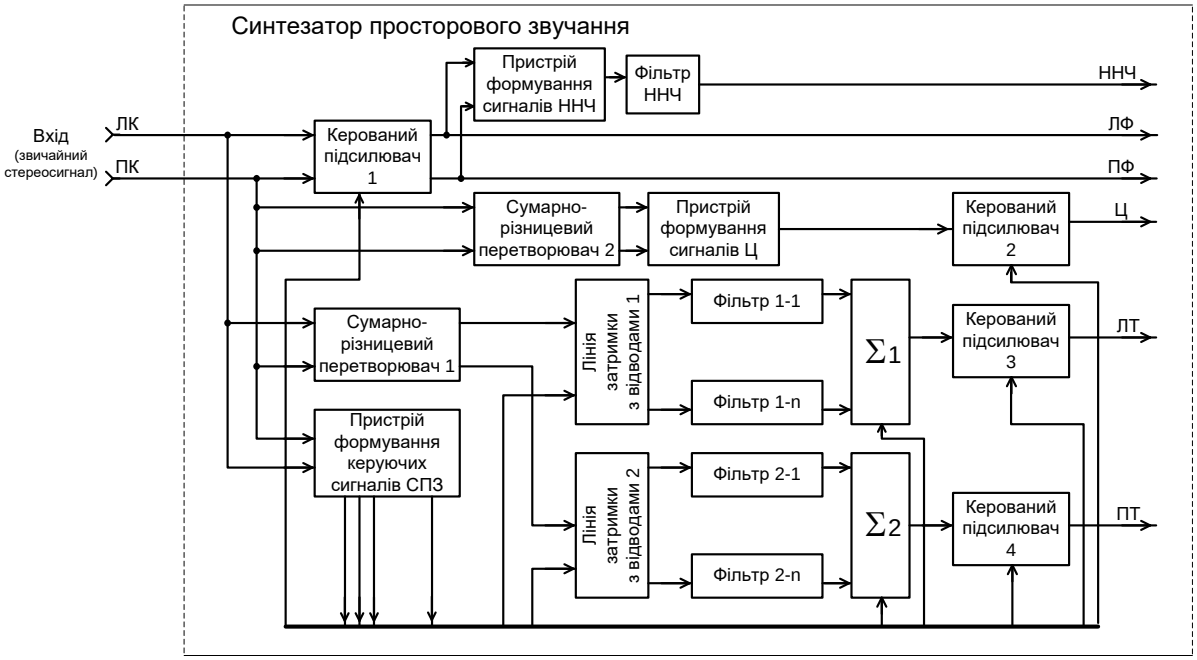
Як основний елемент у формувачі просторових сигналів може бути ЛЗ з відводами. В ланку кожного такого відводу підключено всепроникні фільтри Φ_1, Φ_2,..., Φ_n. Вони служать для синтезу груп відзвуків, що надходять періодично, і які є найважливішою частиною реверберaційних процесів приміщень та визначають слухову оцінку геометричних розмірів залу, властиве йому специфічне забарвлення звучання.

Завдяки всім цим пристроям створюють сигнали, які некорельовані з вихідними. Зауважимо, що в даному випадку не виконують копіювання реверберaційних процесів реальних конкретних концертних залів, а створюють сигнали, здатні викликати слухові відчуття просторовості, об'ємності звучання, ілюзію оточення, охоплення звуком, оперативного переносу слухача в приміщення з різними акустичними властивостями, а також створюють звукові ефекти, можливо навіть такі, що не виникають в умовах прослуховування в концертному залі.

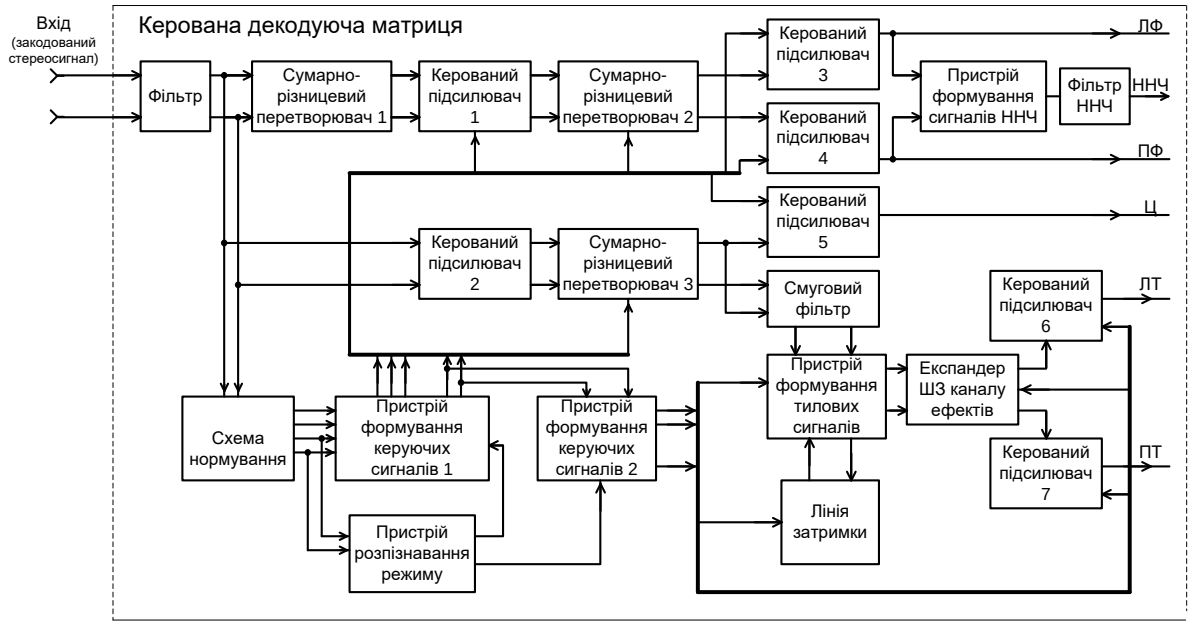
Структурні схеми синтезатора просторового звучання та керованої

декодувальної матриці, що входять до складу звукового кінотеатрального процесора наведено на рис. 5.22.

Прикладом звукового процесора для забезпечення звукового супроводу кінофільму може бути процесор Dolby CP850. Кінотеатральний процесор DOLBY CP850 - звуковий процесор цифрових форматів Dolby Digital Surround EX і Dolby Digital та інших. Процесор CP850 забезпечує роботу з усіма форматами Dolby-фонограм, дозволяє легко оновити версії програмного забезпечення, тим самим постійно розширюючи функціональні можливості встановленого процесора, не вимагаючи заміни будь-яких плат і елементів.



а



б

Рис. 5.21. Структура СПЗ (*а*) та КДМ (*б*)



Рис. 5.22. Зовнішній вигляд процесора CP850

Калібровані установки для конкретного кінотеатру можуть бути збережені в процесорі CP850. Оновлені варіанти кодування звуку, використовуваного на звукових доріжках Dolby Digital, які час від часу з'являються на фільмокопіях у форматі Dolby Digital, автоматично завантажуються в процесор при першій демонстрації цього кінофільму в кінотеатрі. DOLBY CP850 дозволяє забезпечити більше інтегровану й гнучку установку звуку у кінотеатрі. Карта робить складне фільтрування і може використовуватися як для двосмугової, так і для багатомугової установки гучномовців у кінозалі.

Програмне забезпечення процесора DOLBY CP850 містить базу даних за всіма популярними типами кінотеатральних гучномовців, базу часових установок затримок як для двосмугових систем, так і для багатосмугових.

Контрольні запитання**.**

1. Як формують якість звуковідтворення?
2. Назвіть основні відчуття або ознаки якості звучання.
3. Як впливають різноманітні умови прослуховування на якість сприйняття звукового контенту?
4. Яку модель найчастіше використовують для оцінювання якості звучання та як графічно її відображають?
5. Якими методами та засобами здійснюють оцінювання якості звучання?
6. Назвіть основні критерії суб’єктивної оцінки якості звучання фонограм відповідно міжнародним стандартам.
7. Опишіть поняття критеріїв якості просторового враження та стереовраження.
8. Опишіть поняття критеріїв якості музичний баланс та художня якість.
9. Опишіть поняття критеріїв якості прозорість та тембр.
10. Опишіть поняття критеріїв якості техніка звуку та аранжування.
11. Які існують звукові шуми та завади та як вони впливають на якість звучання фонограм?
12. Наведіть графічно узагальнену структуру системи звукопередавання.
13. Зазначте вимоги до трактів звукопередавання.
14. Наведіть класифікацію та позначення систем звуковідтворення за кількістю каналів передавання та відтворення.
15. Наведіть графічно структуру звичайної одноканальної системи звукопередавання (звуковідтворення) та назвіть характерні особливості такої системи.
16. Наведіть графічно структуру звичайної стереофонічної системи звукопередавання (звуковідтворення) та назвіть характерні особливості такої системи.
17. Опишіть якість стереофонічного звучання та наведіть графічно зони оптимального стереоефекту.
18. Наведіть графічно структуру кодування, передачі, відтворення і сприйняття просторової інформації та зазначте особливості складових структури.
19. Наведіть графічно структуру стереоамбіофонічної системи звукопередавання (звуковідтворення) та назвіть характерні особливості такої системи.

20. Наведіть графічно структуру бінауральної системи звукопередавання (звуковідтворення) та назвіть характерні особливості такої системи.
21. Наведіть графічно структуру системи звукопередавання (звуковідтворення) з панорамним кодуванням та назвіть характерні особливості такої системи.
22. Зазначте особливості і графічно надайте розташування гучномовців в різноманітних звукових системах фірми Dolby Lab.
23. Наведіть графічно і опишіть структуру кодування та декодування сигналів в системі Dolby Surround.
24. Наведіть графічно і опишіть структуру декодування сигналів в системі Dolby Pro Logic.
25. Опишіть особливості систем DTS і SDDS.
26. Наведіть експертне оцінювання якості звуковідтворення різноманітними системами та зазначте його основні результати.
27. Наведіть структуру та математичні вирази формування сигналів в універсальному форматі формування, передачі і відтворення звукових сигналів.
28. Наведіть графічно структуру комплексу апаратури для відтворення стереофонічних сигналів із застосуванням звукових процесорів.
29. Зазначте основні характеристики звукових процесорів просторового звучання.
30. Наведіть графічно формування удаваного джерела звуку у стереофонічних системах звуковідтворення.
31. Наведіть структуру та зазначте призначення основних вузлів синтезатора просторового звучання.
32. Наведіть структуру та зазначте призначення основних вузлів керованої декодувальної матриці.

6. ЗВУКОТЕХНІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ. АНАЛОГОВИЙ ЗВУКОЗАПИС

Ключові слова: амплітудно-частотна характеристика, аналоговий, апарат магнітного запису-відтворення, балансний, відтворення, генератор стирання й підмагнічування, грамплатівка, електромагнітний, електропрогравальний пристрій, електрорушійна сила, завади, запис, звукозапис, звукознімач, звуконосій, звукотехнічне обладнання, інтерфейс, кабель, канал, кінематика, компланарний, лінійний, магнетизм, магнітна головка, магнітна стрічка, магнітний запис, магнітофон, механічний звукозапис, петля гістерезису, підмагнічування, підсилювач, п'єзоелемент, плівка, рознімач, сендаст, стереофонічний, стрічкопротягувальний механізм, стирання, студійний магнітофон, технічні параметри, тиражування, тракт звуковідтворення, ферит, феромагнетик, фонограма, фотографічний, шум.

6.1. Узагальнена структура тракту звуковідтворення

Тракт звуковідтворення охоплює джерела звукового сигналу, комутатор джерел сигналів, засоби підсилення, перетворення, оброблення, запису, збереження, передавання та відтворення сигналів звукового діапазону частот [7].

Як джерела звукового сигналу використовують різноманітні пристрої звуковідтворення сигналів в електричній формі, записаних на відповідних носіях запису, сигнали, отримані після електроакустичного (точніше, акустоелектричного) перетворення мікрофоном, сигнали, передані зовнішніми трактами передавання тощо.

Як засоби підсилення, перетворення, оброблення, запису, збереження, передавання сигналів застосовують, відповідно, підсилювачі, регулятори гучності та тембру, апаратура звукозапису, передавальні та приймальні пристрої, аналого-цифрові та інші перетворювачі сигналів тощо.

Як засоби відтворення акустичних сигналів застосовують гучномовці.

Узагальнену структуру тракту звуковідтворення наведено на рис. 6.1.

Як джерела звукових сигналів (ДС - джерела сигналів) в трактах звуковідтворення можуть бути (рис. 6.1):

М – мікрофон – електроакустичний перетворювач, призначений для перетворення акустичних сигналів в електричний сигнал;

МП - мікрофонний підсилювач - попередній підсилювач, призначений для підсилення низькорівневих сигналів (приблизно, 1…10 мВ, -60…-40 дБ) до рівня лінійного значення (0,775 В, 0 дБ);

ЕПП - електронний програвальний пристрій - пристрій для відтворення механічних фонограм (грамофонних платівок);

ПКД - програвач компакт-дисків – пристрій для відтворення оптичних фонограм, записаних на компакт-диску форматів CD-audio, DVD-audio, Super Audio CD;

Т - тюнер (радіоприймач);

АМЗВ - апарат магнітного запису/відтворення – пристрій відтворення магнітних фонограм, записаних на магнітну стрічку;

МДД - мінідискова дека - пристрій відтворення магнітооптичних фонограм;

ПВКП - пристрій відтворення карт пам'яті – інформації, записаної на флеш-накопичувачах.

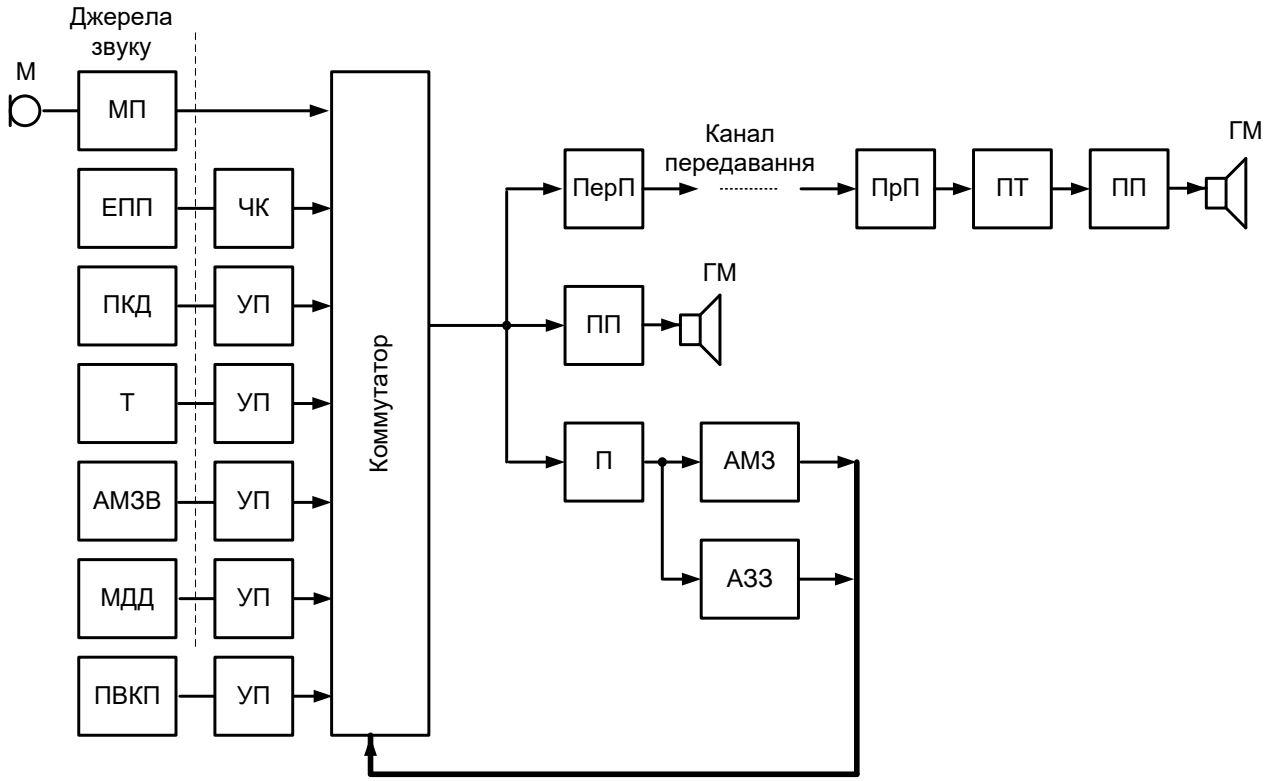


Рис 6.1. Узагальнена структура тракту звуковідтворення

Для узгодження джерел звукових сигналів з трактом звуковідтворення в структурі застосовують:

УП - узгоджувальний пристрій, для узгодження за вхідним/вихідним опором або напругою;

ЧК - частотний коректор – пристрій формування і узгодження за АЧХ сигналу.

К – комутатор – пристрій, призначений для вибору джерела відтворюваного звукового сигналу, а також мікшування мікрофонного сигналу з одним із пристроїв відтворення.

Пер.П - передавальний пристрій – пристрій для безпроводового (радіомовного) передавання звукових сигналів споживачам.

Пр.П - приймальний пристрій (тюнер, радіоприймач) .

ПТ – перетворювач радіомовного сигналу, наприклад, FM-мовлення, в низькочастотний звуковий інформаційний сигнал.

ПП - підсилювач потужності – пристрій, призначений для підсилення звукових сигналів при навантаженні на низькоомний гучномовець.

П - попередній підсилювач – підсилювач, що забезпечує, в першу чергу, узгодження в разі підключення пристроїв тракту звуковідтворення до пристроїв звукозапису, а також формування необхідних параметрів сигналу для запису на відповідний носій.

Як апаратуру звукозапису в трактах звуковідтворення застосовують:

АМЗ - апарат магнітного запису – пристрій, призначений для запису звукової інформації на магнітний носій. Сигнал запису може бути в аналоговому або цифровому вигляді;

АЗЗ - апарат звукозапису – пристрій, призначений для запису звукової інформації на носій звукозапису. Як носій звукозапису може бути компакт-диск, фотоплівка, твердотільний накопичувач (флеш-карта), магнітооптичний диск, а також магнітний диск або плівка.

6.2. Класифікація звукотехнічного обладнання та пристроїв і узагальнені технічні параметри

Класифікація звукотехнічного обладнання можлива за різними ознаками.

Щодо сфери використання: професійне обладнання; напівпрофесійне; побутове.

За призначенням: пристрій запису або реєстрації, зберігання та відтворення, підсилення, перетворення, оброблення, передавання або пристрій випромінювання, приймальний, для комутації звукових сигналів, імітації звукових сигналів, комбіновані.

За принципом роботи зі звуком: аналогові; цифрові; комбіновані.

За технологією побудови: реальні; віртуальні; комбіновані.

За наявності додаткових функцій: з регулюванням параметрів або без; з візуальним відображенням режимів роботи або без відображення.

За конструкцією: конструктивно об'єднані з іншими пристроями або залежні; стаціонарні; переносні, що носяться (портативні або малогабаритні); моноблоки і багатоблокові; модульні.

Серед параметрів звукотехнічного обладнання виділяють функціональні параметри та технічні показники. Технічні параметри відображають групу складності або рівень (клас) якості апаратури. Найвищими показниками якості характеризуються пристрої 0 групи складності. Серед моделей звукотехнічної апаратури (ЗТА) часів СРСР найкращі показники мали моделі 001, 003, 010, першу групу складності позначали 101, 110, другу групу - 201, 232, 240 і т.д. (Закордонна апаратура найвищої якості позначалась цифрою 9 - максимальний рівень якості і вище - ручна збирання. Закордонні моделі вищої якості - 999, 950, нижче - 707, 770, найгірші -110, 150 тощо).

Функціональні параметри характеризують наявністю будь-яких функціональних можливостей - запис і відтворення, перехід з одного треку на інший, дистанційне керування, пам'ять режимів роботи, наявність регулятора тембру, наявність шумознижувача тощо.

Технічні показники - це чисельні значення окремих параметрів. Серед них визначають такі:

1. Частотний діапазон (основний параметр) в герцах (20...200000) Гц або (40…16000) Гц, і нерівномірність частотної характеристики в децибелах (-3 дБ або гірше ± 6 дБ).

2. Коефіцієнт гармонік (коефіцієнт нелінійних спотворень), коефіцієнт інтермодуляційних спотворень; коефіцієнт спотворення у відсотках (0,002% або гірше 1,5%.).

3. Рівень власного шуму або відношення сигнал/шум в децибелах (-60 дБ, краще -80 дБ, відношення сигнал/шум – не менше, 70 дБ).

4. Динамічний діапазон в децибелах (не менше, 70 дБ).

5. Перехідна перешкода між каналом в децибелах, проникнення з каналу в канал (-30 дБ).

6. Вихідна потужність для підсилювачів або споживана потужність для пристроїв у ватах або вольт-амперах (100 Вт на канал або 30 ВА).

7. Чутливість входу для запису (1 мВ для ЕПП, 250 мВ для побутового магнітофона, 1 В для ПКД).

8. Вхідний / вихідний опір у омах (1000 Ом / 100 Ом).

Умова оптимального узгодження по опору - $R_{вих} << R << R_н$

Вихідні опори пристроїв - одиниці - десятки - сотні ом.

Вхідні опори - одиниці - десятки - сотні кілоом.

9. Швидкість руху носія (33 і 1/3 об/хв, 4,76 см/с, 38,1 см/с). Відхилення від номінальної швидкості (0,1%).

10. Коефіцієнт детонації. Максимальний коефіцієнт детонації 0,1% (для високоякісних магнітофонів - 0,01%).

11. Час запису-відтворення або об’єму записуваної інформації.

12. Для деяких пристроїв межі регулювання тембру, в децибелах: мінімум ± 6 дБ, максимум ± 20 дБ.

13. Запас по перевантаженню визначається пік-фактором (12…20 дБ).

14. Кількість каналів запису-відтворення.

15. Параметри перетворювачів АЦП і ЦАП - частота дискретизації (44,1; 48 кГц), розрядність квантування (16; 20 біт), кодери захисту від помилок тощо.

6.3. Підсилювач звукових частот

Підсилювач звукових частот (ПЗЧ) або підсилювач низьких частот (ПНЧ) може бути попереднього підсилення, кінцевого підсилення і комбінований [11].

ПЗЧ - призначений для підсилення сигналів звукової частоти, що працює на низьке навантаження - гучномовець. Додатковими можливостями ПЗЧ є попереднє посилення сигналів різного рівня (від 1 мВ - мікрофон, до, приблизно, 1В - апаратура звуковідтворення).

Структуру ПЗЧ наведено на рис. 6.2.

Підсилювач звукових частот складено з комутатора джерел звукових сигналів, попереднього підсилювача та підсилювача потужності.

Комутатор передбачає для кожного джерела сигналу відповідний вхідний інтерфейс з узгоджувальним вузлом (пристроєм). Попередній підсилювач складається з блоку фільтрів, регулятора тембру, регуляторів гучності та балансу. Підсилювач потужності має попередній підсилювач потужності, кінцевий підсилювач потужності і схему захисту.

Як джерела звукового сигналу для ПЗЧ застосовують такі пристрої (визначення та призначення зазначено в описі рис. 6.1):

М - мікрофон,

МП - мікрофонний підсилювач,

ЕПП - електропрогравальний пристрій,

ПКД - програвач компакт-дисків,

Т - тюнер,
ЧК (КП) – частотний коректор (коригувальний пристрій),
УП – узгоджувальний пристрій (підсилювач),
К - комутатор джерела сигналу,

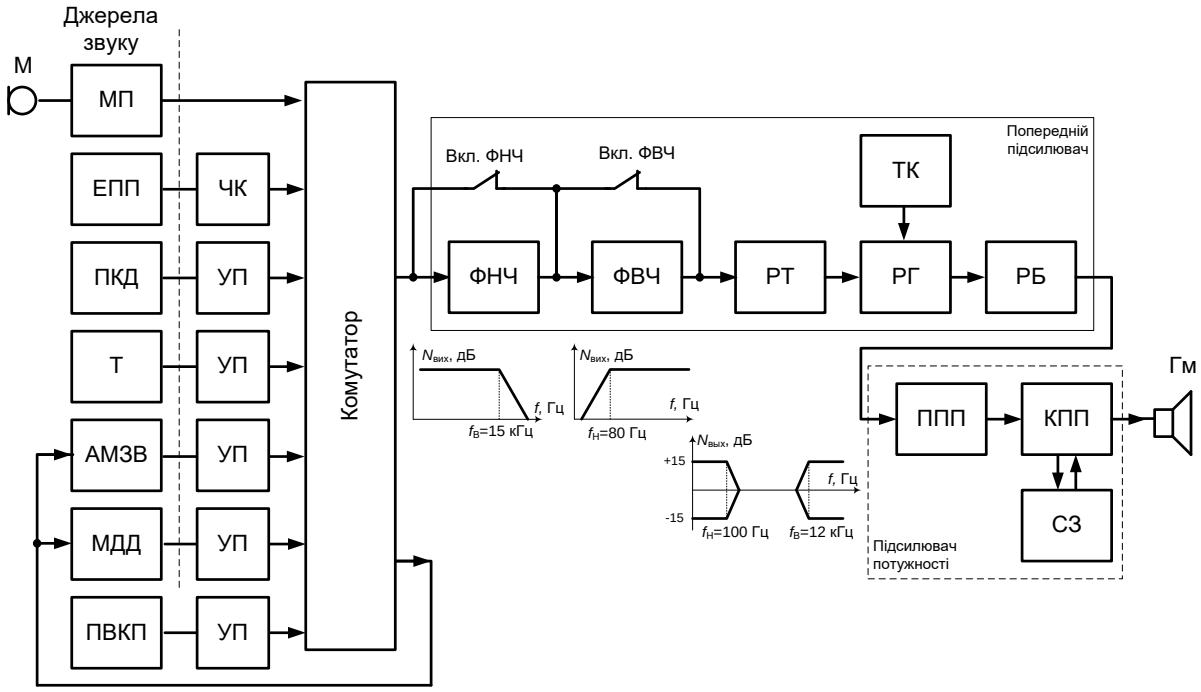


Рис. 6.2. Структурна схема підсилювача звукових частот

Фільтр – пристрій для обмеження частотного діапазону звукового сигналу. Фільтр, як правило, визначає смугу пропускання.

ФНЧ - фільтр низьких частот – вузол, призначений для обмеження частотного діапазону звукового сигналу в області верхніх частот. ФНЧ пропускає в канал звуковідтворення нижні частоти сигналу і не пропускає сигнали з частотами, вище частоти зрізу фільтра (частота зрізу може бути приблизно 15…20 кГц);

ФВЧ - фільтр високих частот – вузол, призначений для обмеження частотного діапазону звукового сигналу в області низьких частот. ФВЧ пропускає в канал звуковідтворення верхні частоти сигналу і не пропускає сигнали з частотами, нижче частоти зрізу фільтра (частота зрізу може бути приблизно 25...120 Гц);

В англомовній термінології існують позначення LPF (low pass filter) – фільтр, що пропускає низькі частоти (ФНЧ), LCF (low cut filter) – фільтр, що зрізає нижні частоти (ФВЧ), HPF (hi pass filter) – фільтр, що пропускає високі частоти (ФВЧ), HCF (hi cut filter) – фільтр, що зрізає високі частоти (ФНЧ). Назву фільтру визначено контекстом формування сигналу – якщо необхідно вирізати смугу частот, то використовують фільтри зрізу, якщо необхідно пропустити смугу частот – фільтри пропускання.

РТ - регулятор тембру - вузол, призначений для коригування частотної характеристики сигналу – збільшення або зменшення рівня сигналу в окремих смугах частот. Складається, як правило, з двох регуляторів – НЧ та ВЧ, для підсилення або приглушення частотних складових в смугах, приблизно, до 120 Гц

(НЧ) і вище 12 кГц (ВЧ). Збільшення або зменшення рівня сигналу у відповідних смугах здійснюють в межах ± 12 дБ;

РГ - регулятор гучності – вузол, призначений для зменшення або збільшення рівня звукового сигналу в разі прослуховування звукової інформації слухачем. Регулювання рівня здійснюють в межах від, приблизно -80 дБ (відсутність чутного звуку) до 0 дБ електричного сигналу (максимальна гучність);

ТК - тонкомпенсація (тонкорекція) – вузол, призначений для автоматичного коригування частотної характеристики звукового сигналу в разі зміни гучності сигналу, відповідно кривим однакової гучності;

РБ - регулятор балансу – вузол, призначений для коригування гучності сигналу в каналах стереофонічного відтворення залежно від розташування слухача відносно гучномовців лівого та правого каналів.

ППП - попередній підсилювач потужності, в більшості випадків є підсилювачем напруги і призначений для узгодження попереднього підсилювача з кінцевим підсилювачем;

КПП - кінцевий підсилювач потужності, в більшості випадків є підсилювачем струму, адже працює на низькоомне навантаження, опір якого може бути в межах (2…12) Ом;

СЗ - схема захисту підсилювача від короткого замикання на виході і гучномовця від перевантаження.

Обов’язковим вузлом будь-якого звукотехнічного пристрою є блок живлення (БЖ, на рисунку не показано), що призначений для забезпечення напругою живлення всі вузли і блоки підсилювача.

Доцільно нагадати співвідношення електричних параметрів в електроніці стосовно потужності [11]:

$$P = UI; \qquad P = I^2 R_н; \qquad P = \frac{U^2}{R_н}.$$

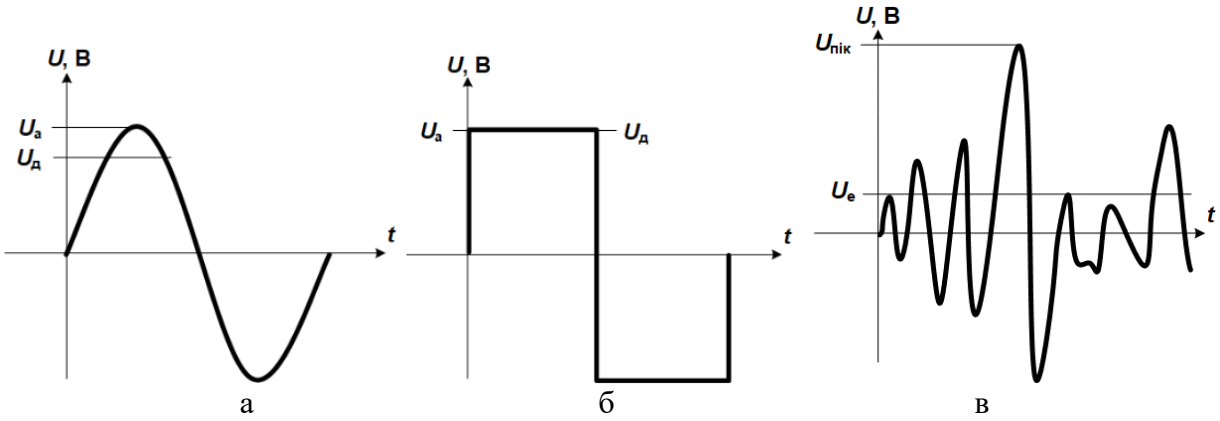
Звукові сигнали для звукотехнічного обладнання аналізують за напругою U (у В) або відносним рівнем сигналу N (у дБ) та за потужністю P (у Вт). Форму аналогового сигналу, що може бути інформаційним сигналом в трактах звукопередавання і підсилення, можна представити як тональний сигнал у вигляді простої синусоїди, тональний сигнал у вигляді прямокутного змінного сигналу та умовно музичного сигналу (рис. 6.3).

Для синусоїдного сигналу характерні такі співвідношення за напругою та потужністю:

$$U_д = U_е = \frac{U_м}{\sqrt{2}} = \frac{U_а}{\sqrt{2}} = 0,707U_а = U_{СКВ} = U_{RMS} = U_{СВ};$$
$$U_{пік} = U_м = U_а = \sqrt{2} \cdot U_д = 1,4 \cdot U_д;$$
$$P_д = \frac{U_д^2}{R_н}; \qquad P_{пік} = \frac{U_{пік}^2}{R_н} = \frac{2U_д^2}{R_н} = 2P_д,$$

де $U_д$ – дієве значення напруги; $U_е$ – ефективне значення напруги; $U_{СКВ}$ – середньовипрямлене значення напруги; $U_{СВ}$ – середнє значення напруги (не

плутати з середнім для напівхвилі); U_{RMS} – (Root Mean Square) середньоквадратичне значення напруги; $U_{\text{пік}}$ – пікове значення напруги; $U_{\text{а}}$ – амплітудне значення напруги; $P_{\text{д}}$ – дієве значення потужності; $P_{\text{пік}}$ – пікове значення потужності; $R_{\text{н}}$ – опір навантаження.



а б в

Рис. 6.3. Форма аналогового сигналу у вигляді синусоїди (*а*), прямокутного змінного сигналу (*б*) та музичного сигналу (*в*)

Для прямокутного сигналу характерні такі співвідношення за напругою та потужністю:

$$U_{\text{д}} = U_{\text{м}} = U_{\text{а}} = U_{\text{СКВ}} = U_{\text{RMS}} = U_{\text{СВ}} = U_{\text{пік}}$$

$$P_{\text{д}} = \frac{U_{\text{д}}^2}{R_{\text{н}}} = P_{\text{пік}} = \frac{U_{\text{пік}}^2}{R_{\text{н}}}.$$

Тобто такі визначення як дієве, максимальне, пікове значення напруги і, відповідно, потужності для прямокутного сигналу зазначати не зовсім коректно.

Для звукового сигналу характерні такі співвідношення за напругою та потужністю:

$$U_{\text{д}} \cong U_{\text{е}} \cong U_{\text{СКВ}} \cong U_{\text{RMS}} \cong U_{\text{СВ}} = \frac{U_{\text{пік}}}{n}$$

$$P_{\text{д}} = P_{\text{RMS}} = P_{\text{е}} = \frac{U_{\text{д}}^2}{R_{\text{н}}}; \qquad P_{\text{пік}} = \frac{U_{\text{пік}}^2}{R_{\text{н}}} = \frac{n^2 U_{\text{д}}^2}{R_{\text{н}}}.$$

$$P_{\text{пік}} = n^2 P_{\text{е}} = n^2 P_{\text{RMS}}.$$

Для музичного сигналу визначення дієвого значення сигналу не зовсім коректно. Для музичного сигналу більш коректно зазначати середнє або середньоквадратичне значення напруги, що часто називають ефективним значенням, а також максимальне або пікове значення напруги і, відповідно, ефективне і пікове значення потужності.

Для музичного сигналу пікова напруга може бути в n раз більше середньої або ефективної напруги, де n може приймати значення мінімум 3 ($n \geq 3$). Тоді пікова потужність для музичного сигналу може бути в 9 разів і більше середньої потужності.

Наведемо технічні параметри умовного комбінованого підсилювача потужності, що найчастіше застосовують у побутовому високоякісному

підсилювачі.

Технічні параметри підсилювача:

- номінальна потужність (на 1 кГц) – 50 Вт на опорі навантаження 8 Ом;
- опір навантаження 8 Ом;
- коефіцієнт нелінійних спотворень за номінальної потужності в робочому діапазоні 0,5 %;
- діапазон відтворюваних частот (ефективна смуга підсилення) – 20 Гц…30 кГц;
- нерівномірності АЧХ - -3 дБ;
- чутливість входів мВ/кОм ($R_{вих} << R << R_н$):
  · звукознімач ЕПП - 2,5/50;
  · мікрофон - 1/2;
  · універсальний вхід магнітофона, тюнер - 150/50;
- відношення сигнал/шум – 81 дБ;
- діапазон регулювання тембру ± 10 дБ;
- тонкомпенсації при зменшенні гучності на 30 дБ - +10 дБ на НЧ (100 Гц), а на ВЧ +4 дБ (1 кГц);
- напруга і вихідний опір лінійного виходу - 150/4,7 (мВ/кОм);
- споживана потужність - 130 Вт.

6.4. Пристрої запису-відтворення звукових сигналів

6.4.1. Механічний звукозапис

Механічний запис звуку для грамофонних платівок (грамзапис) являє собою процес, в якому на носії запису, що обертається і має форму диска, різцем рекордера вирізають відповідної форми канавку.

В разі запису диск обертається з постійною частотою обертання, а рекордер переміщається уздовж радіуса диска від краю до центру.

Звуконосій (рис. 6.4) у формі диска 3 знаходиться на круглому столі, що обертається 2, сталість швидкості якого контролюють за допомогою стробоскопічної шкали 1. Запис здійснюють рекордером 5, що перетворює електричні коливання в механічні. Коливальна система (каретка) 4 рекордера закінчується різцем 6. Одночасно з обертанням диска рекордер 5 черв'ячною передачею переміщається від периферії до центру, а різець вирізає звукову канавку [16].

В разі відсутності сигналу на рекордері різець не коливається і тому вирізає спіральну канавку, без звивин. Таку канавку називають німою. Вона відповідає паузам, крім того, нею звичайно починається і закінчується будь-який запис.

Від електричного сигналу, поданого на рекордер, різець приходить в коливання і вирізає звивисту канавку, яку називають модульованою.

На рис. 6.5,*а* наведено німі канавки. У поперечному розрізі канавки мають ширину *a*, глибину *h*, кут розкриття α і радіус заокруглення дна ρ. Проміжок *b* між двома сусідніми канавками називають полем, а відстань *k* - кроком запису.

Вид модульованих канавок визначено напрямом коливань різця, які можуть бути поперечними - уздовж радіуса диска, глибинними - перпендикулярно поверхні

диска і комбінованими, тобто поперечно-глибинними. Модульовані канавки наведено на рис. 6.5,*б*.

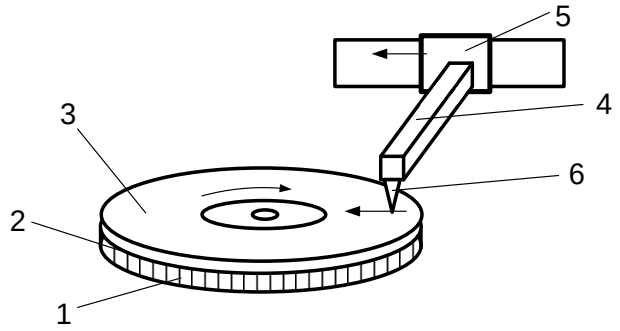
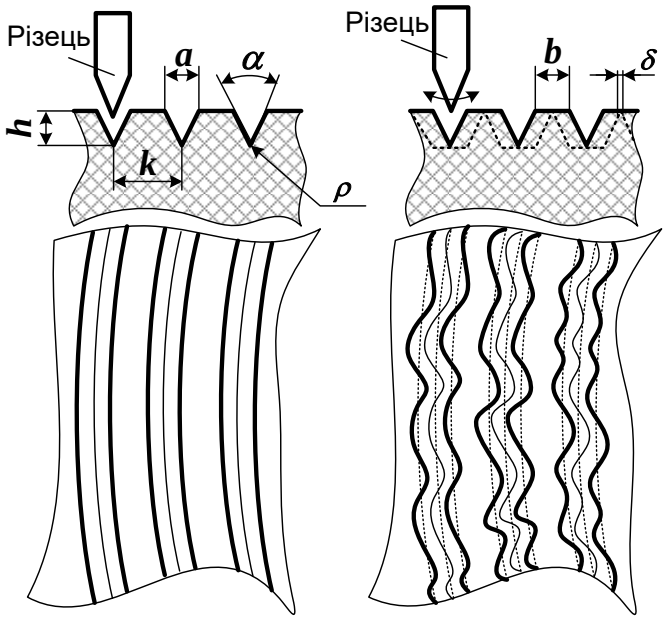


Рис. 6.4. Принцип запису на диск, що обертається

У разі глибинного запису різець, занурюючись в матеріал, зустрічає все зростаючий опір різанню, що призводить до нелінійних спотворень. Динамічний діапазон глибинного запису менше, ніж поперечного, а знос платівки і шуми під час відтворення - великі. Внаслідок цього наразі застосовують тільки поперечний запис.



а б

Рис. 6.5. Форма німих (а) та модульованих (б) канавок у разі механічного запису

Під час відтворення записаний диск або отримана з нього грамофонна платівка обертається з тією ж частотою, як і диск у разі запису, що необхідно для збереження правильної тональності звуку. Зафіксовану у вигляді канавки звукова інформація при цьому «зчитує» звукознімач, голка якого ведеться обома стінками канавки, що надають їй вимушені механічні коливання. Ці коливання перетворює головка звукознімача в електричні сигнали і після підсилення їх подають на один або кілька гучномовців.

У напрямку від борта до центру ряд канавок являє собою безперервну спіраль: вступна канавка, на яку встановлюють голку звукознімача на початку програвання, переходить в канавки зони запису. Починається зона запису однією-двома німими канавками, за якими йдуть модульовані; ці канавки завершено також однією-двома німими канавками, що переходять в свою чергу в вивідну канавку, яка закінчується концентричною замкнутою канавкою.

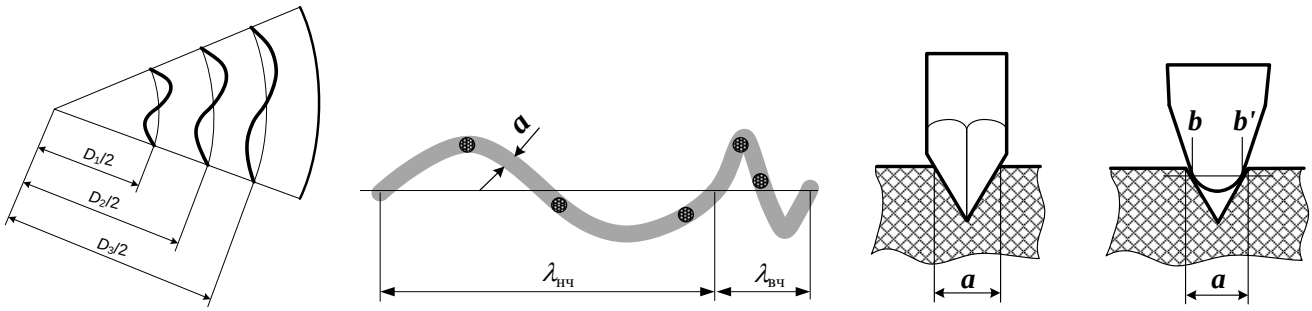
Якщо на одній стороні платівки є кілька записів, то їх розділяють між собою проміжком, в якому проходить німа канавка, звана з'єднувальною.

Оскільки частота обертання диска під час запису постійна, запис від краю до центру платівки безперервно стискається, що видно на рис. 6.6,*а*, де наведено канавки запису одного і того ж сигналу, отримані на різних діаметрах платівки. Лінійна швидкість платівки

$$V_{\text{лін}} = \frac{\pi D n}{60} \ [\text{см}/\text{с}],$$

$$n = 33\,\tfrac{1}{3} \ [\text{об}/\text{хв}], \quad (n = 45,\ n = 78 \ [\text{об}/\text{хв}]),$$

де D - діаметр канавки, см; n = const - частота обертання платівки (кількість обертів), об/хв.



а б в

Рис.6.6. Зміна стиснення запису в залежності від діаметра канавки (*а*), ділянка запасу двох періодів синусоїдного коливання (*б*), і положення різця під час запису і голки під час відтворення (*в*)

З формули можливий висновок, що зі зменшенням діаметру D пропорційно знижується лінійна швидкість $V_{\text{лін}}$, тому модуляція стає більш стиснутою, а отже, зростають крутість канавки і кривизна на гребнях. Очевидно, що для повного огинання відтворювальною голкою модульованої канавки стиснення має бути обмежене. З цих міркувань встановлені мінімальні діаметри канавок зони запису і максимальні, але припустимі амплітуди коливальної швидкості - 14 см/с для монофонічного поперечного запису і 10 см/с для кожного каналу стереозапису [17].

Якщо поле запису займає за радіусом платівки ділянку довжиною l, то при n оборотах диска за хвилину і щільності запису, що дорівнює p канавок на сантиметр, тривалість програми τ, записана на одному боці диска, може бути визначено за формулою

$$\tau = lp/n.$$

Зрозуміло, що тривалість запису можна збільшити, збільшивши діаметр диска, щільність запису або зменшивши число оборотів двигуна.

Стандартні розміри грамплатівки: d = 30 см; n = 33 і 1/3 об/хв..; t = 25 хв. - час запису/відтворення на одному боці.

Мінімально припустима відстань між канавками (або максимальна щільність запису) визначено максимальною амплітудою зміщення різця під час запису і необхідним гарантійним проміжком δ, що розділяє сусідні канавки.

Динамічний діапазон запису визначено відношенням максимальної амплітуди відхилення різця до мінімальної. Мінімальна амплітуда корисного сигналу лімітована шумами під час відтворення, які головним чином обумовлені зернистістю структури матеріалу носія запису. Характерні шуми, які супроводжують прослуховування грамплатівки, викликані паразитними коливаннями голки звукознімача, що виникають внаслідок неоднорідної (зернистої) структури стінок канавки.

Максимальна амплітуда - обмежена відстанню між доріжками або канавками.

Таким чином, у області великих амплітуд динамічний діапазон обмежено неможливістю збільшення відстані між сусідніми канавками (адже зменшення щільності запису скорочує тривалість програми), а в області малих амплітуд - шумами платівки.

Значно зменшився рівень шумів, і, відповідно, розширився динамічний діапазон запису із застосуванням для виготовлення платівок вініліта. На вінілітових платівках лінійні розміри канавки зменшені (мікрозапис), а внаслідок збільшення щільності запису значно збільшилася тривалість звучання.

Збільшення тривалості звучання можна отримати, зменшивши число оборотів диска n. Це видно з залежності довжини звукової хвилі для механічного запису

$$\lambda = \frac{2\pi Rn}{f},$$

де: R - радіус канавки запису (радіус розташування канавки), який зменшується в міру наближення поля запису до центру диска; n - кількість обертів за хвилину, f - частота сигналу; λ - довжина хвилі запису.

На рис. 6.6,*б* наведено ділянку запису двох періодів синусоїдного коливання з різною довжиною хвилі, але однаковою амплітудою зміщення різця. Положення різця під час запису і голки у разі відтворення наведено на рис. 6.6,*в*. Голка відтворювального пристрою торкається бічних стінок канавки в двох точках, що лежать на прямій bb'.

Ширина канавки на поверхні платівки дорівнює a. Якщо різець робить гармонічні коливання за незмінної глибини різання, то край і дно канавки мають вигляд синусоїд, зміщених на постійну величину a. Якщо довжина хвилі мала, то радіус кривизни канавки для її граничного відхилення може виявитися менше радіуса кривизни голки. У цьому випадку голка не зможе зайняти нормальне положення в канавках на вершинах запису, що викликає ефект неогинання, у результаті якого виникають частотні і нелінійні спотворення. Зрозуміло, що причина цих спотворень криється у невідповідності форми записувального різця і

відтворювального вістря голки, а ефект неогинання зумовлює межу можливого зменшення довжини хвилі запису.

Якщо час програвання нормальної платівки (d = 25 см) з широкою канавкою для n = 78 об/хв. становить лише 3 хв., то час програвання платівки «гігант» (d = 30 см) з мікрозаписом для n = 33 і 1/3 об/хв. збільшено до 25 хв. (довгограюча платівка) [17].

Ще більше збільшує тривалість звучання змінна щільність запису. Її здійснюють спеціальною системою, що управляє зміщенням рекордера. Запис паузи або сигналів з малими амплітудами проводять з підвищеною щільністю, а запис великих амплітуд - зі зменшеною. Така система збільшує тривалість звучання приблизно на (20…25)%.

Оскільки коливальну швидкість мембрани визначено коливальною швидкістю різця під час запису, то частотною характеристикою запису слід вважати залежність амплітуди коливальної швидкості різця $\nu_р$ від частоти записуваних коливань.

Відтворення запису провадять звукознімачем, що перетворює механічні коливання голки в електричні. Чутливість звукознімача $\eta_з$ - це відношення амплітуди напруги на виході звукознімача $U_{вих}$ до амплітуди швидкості коливань голки u_ν (ν - коливальна швидкість голки)

$$\eta = \frac{U_{вих}}{u_\nu}.$$

Існує міжнародний стандарт амплітудно-частотних характеристик механічного запису і відтворення для платівок широкого застосування (рис. 6.7). За віссю ординат відкладено відносну коливальну швидкість різця в разі запису або рівень напруги у разі відтворення. За віссю абсцис - частота. Крива 1 відповідає частотній характеристиці каналу запису, крива 2 відповідає АЧХ каналу відтворення, крива 3 - АЧХ магнітного звукознімача. Як видно з наведених кривих, зменшення коливальної швидкості різця з пониженням частоти має коригувати відтворювальний пристрій - звукознімач або підсилювач відтворення.

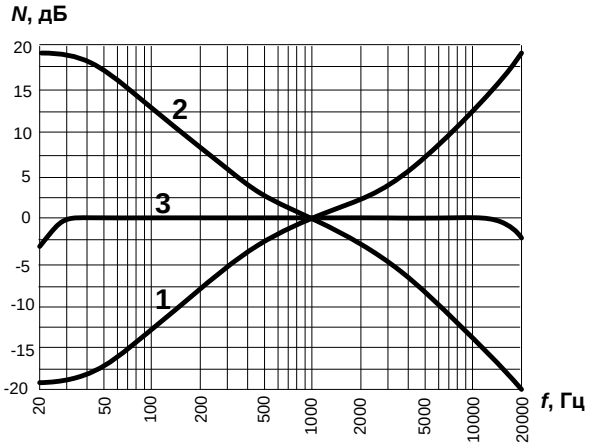


Рис.6.7. Амплітудно-частотні характеристики механічного запису і відтворення

6.4.1.1. Технологія виготовлення платівок

Запис, зроблений на лаковий диск, тиражують у вигляді грамофонних платівок. Тиражування являє собою складний виробничий процес з такими основними операціями: металізацією поверхні лакового диска, зняттям з нього гальванічним способом металевих оригіналів і формуванням друкованим оригіналом матриць грамплатівок [16].

З лакового диска знімають зазвичай один перший оригінал і з нього кілька других, а з кожного другого оригіналу знімають треті оригінали - матриці, кількість яких можна довести до 40 шт.

Застосовують наступні способи формування платівок: пресування, штампування, лиття під тиском.

Основний спосіб - пресування, оскільки цей спосіб придатний для будь-яких форматів платівок і забезпечує достатньо якісні показники. Однією матрицею можна відпресувати в середньому 700 платівок діаметром 30 см і до 2000 платівок діаметром 17,6 см.

Платівки пресують з гранул пластмаси. Гранули виготовляють з порошкоподібної суміші компонентів на екструзійних машинах. Пластмаса для платівок є композицією з плавких компонент і барвника, наприклад, сажі. До плавких компонентів відносять з'єднувальні і спеціальні добавки; завдання з'єднувальних - зцементувати в єдине ціле масу, що входить до складу платівки, а добавки вносять для поліпшення здатності до формування та підвищення зносостійкості платівки. З'єднувальним матеріалом є зазвичай синтетична смола вініл, що являє собою сополімер вінілхлориду з вінілацетатом.

Сучасні платівки не б'ються, що є однією з переваг в порівнянні з першими платівками, зроблених з мас з твердим наповнювачем що бились,; застосування наповнювача було необхідно для підвищення твердості платівок, які в той час програвалися важкими звукознімачами і грамофонними мембранами.

У наш час широке поширення знаходить новий спосіб виготовлення наддовгограючих платівок - різання опалюванням. Різець підігрівають струмами високої частоти, що призводить до оплавлення звукової канавки тондиска. Нагрівальним елементом є високочастотний контур, усередині якого і розміщують різець. В разі запису з опалюванням швидкість обертання диска може бути знижена до 8 і 1/3 об/хв. Відтворення механічною запису полягає в тому, що голка, що ковзає від периферії до центру звивистої канавки платівки, що обертається, приходить в коливальний рух, який важелем передається конічній мембрані. Мембрана викликає звукові коливання в вузькогорлому рупорі подібно до того, як це відбувається в рупорному гучномовці.

6.4.1.2. Звукознімачі

Найбільшого поширення у наш час отримали звукознімачі електромагнітної і п'єзоелектричної систем [17].

П'єзоелектричними перетворювачами механічних коливань у електричні є кристалічні і керамічні біморфні п'єзоелементи.

Кристалічні п'єзоелементи виконують у вигляді пластин, які вирізають з кристалів, що мають природний п'єзоефект, наприклад з кристалів сегнетової солі.

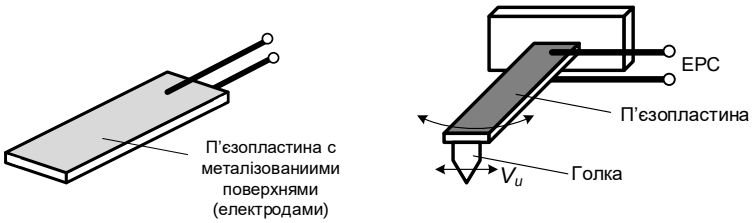
Вони працюють як на вигин, так і на скручування, розвиваючи при цьому велику ЕРС, тобто мають високу чутливість. Однак кристалічні п'єзоелементи схильні до впливу кліматичних умов, а саме – вони не працездатні за температури вище 40° С і за відносної вологості середовища понад 75%. Тому звукознімачі з кристалічними п'єзоелементами практично витіснені звукознімачами з керамічними елементами, що мають високу тепло- і вологостійкість.

У сучасних п'єзоелектричних звукознімачах використовують керамічні п'єзоелементи з титанату барію або більш чутливі з кераміки ЦТС (на основі цирконату-титанату свинцю). Їх роблять як пластини або трубки. У керамічних п'єзоелементах п’єзоелектричні властивості формують під час виготовлення штучно, поляризацією елементів високою напругою.

Біморфний пластинчастий п'єзоелемент складено з пари металізованих з двох сторін керамічних пластин (рис. 6.8,*а*), що дотикаються площинами, на яких в разі деформації, спричиненої коливаннями голки, виникають заряди одного і того ж знаку; на зовнішніх площинах при цьому утворюються заряди зворотного знаку. Виводи роблять смужками з срібної фольги. Для підвищення механічної міцності п’єзоелемента між пластинами розташовують тонку металеву прокладку. Розміри п’єзоелемента 17х3х1 мм.

На рис. 6.8,*б* наприклад, наведено узагальнену конструкцію рухомої системи звукознімача, в якій основним видом деформації п'єзоелектричного елемента є кручення. Голка, що ковзає канавкою грамофонної платівки закріплена у голкотримач, який жорстко зв’язаний з п’єзоелементом. Під час поперечних коливань голки голкотримач здійснює крутильні коливання навколо осі, викликаючи закручування п'єзоелемента. Протилежний кінець п'єзоелемента жорстко закріплений в корпусі звукознімача. Оскільки механічна коливальна система має високу резонансну частоту, то у робочому діапазоні частот вона має достатній динамічний опір.

Оскільки п'єзоелектричний звукознімач відносять до амплітудних звукознімачів, то частотна характеристика його ЕРС у разі незмінної швидкості коливань голки має спад від низьких частот до високих.



а б

Рис. 6.8. П'єзоелемент у вигляді пластини (*а*)
та узагальнена конструкція п'єзоелектричного звукознімача (*б*)

Частотна характеристика п'єзоелектричного звукознімача на різних навантажувальних опорах іноді на верхніх частотах робочого діапазону має підйом внаслідок резонансу механічної рухомої системи.

Під час деформації п'єзопластинок на виводах пластинки формується ЕРС (електрорушійна сила).

П'єзоелектричні звукознімачі використовують зазвичай в дешевих ЕПП, в моделях же високого класу застосовують магнітні звукознімачі, перевагою яких є малі спотворення у широкій смузі частот. Магнітні звукознімачі мають, нажаль, малу чутливість, що ускладнює схемотехніку підсилювача, але це не перешкоджає застосуванню їх в апаратах високого класу.

Недолік п'єзопластинок - це залежність від температурних умов, вузький частотний діапазон, досить високі нелінійні спотворення. Перевага - висока чутливість.

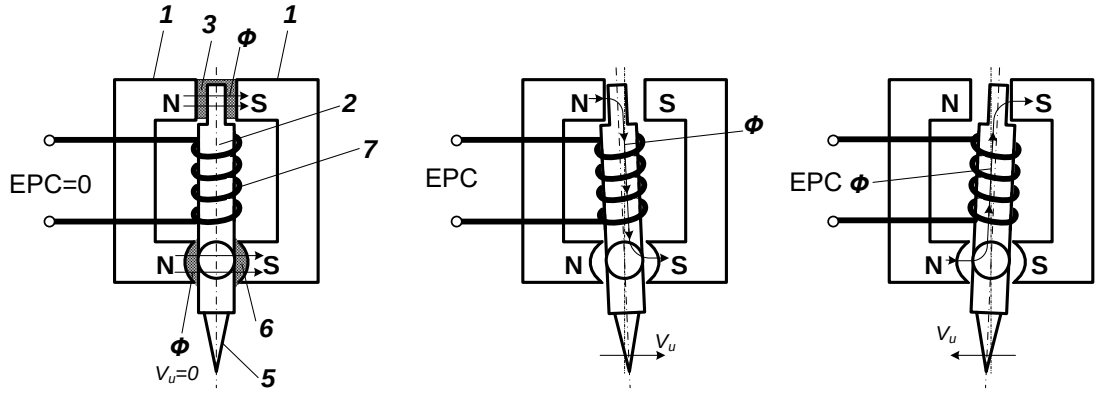
Звукознімачі магнітного типу поділяють на звукознімачі зі змінним магнітним опором, з рухомим магнітом, з рухомими котушками [17].

Одну з конструкцій звукознімача електромагнітної системи наведено на рис. 6.9,*а*. Постійний магніт забезпечений полюсними наконечниками 1, які утворюють два повітряні зазори. У верхньому зазорі між гумовими прокладками 3 знаходиться верхній плоский кінець якоря 2, який може гойдатися навколо осі, укріпленої в нижньому зазорі в гумових підшипниках 6. Нижній кінець якоря має канал для голки 5, яку жорстко закріплено в якорі гвинтом. Між виступами полюсних наконечників (див. рис. 6.9) нерухомо закріплена котушка 7, намотана на круглий каркас. Через отвір в каркасі проходить якір, діаметр якого менше діаметра цього отвору.

Гумові прокладка 3 та підшипник 6 створюють немагнітні зазори між якорем та полюсними наконечниками магніту.

У положенні спокою магнітні силові лінії проходять з північного полюсного наконечника в південний через верхній і нижній зазори перпендикулярно осям якоря і голки.

У разі відтворення механічного запису вістря голки, ковзаючи звивинами канавки зміщується щодо стану спокою, наближаючись верхньою частиною якоря до одного або іншого полюса постійного магніту. Силові лінії магнітного поля в цьому випадку проходять від одного полюсного наконечника до іншого через металевий якір, на якому розташована котушка. Тобто, робочий магнітний потік Ф проходить з північного полюсного наконечника у південний так, як це схематично наведено на рис. 6.9,*б* та *в*.



а б в

Рис. 6.9. Звукознімач електромагнітної системи (*а*) і ілюстрація процесу створення ЕРС в обмотці звукознімача під час зміщення голки праворуч (*б*) і ліворуч (*г*)

Зміни магнітного потоку, що проходить уздовж якоря, спричиняють появу індукованої електрорушійної сили в обмотках котушки, величина якої безпосередньо пов'язана зі швидкістю переміщення верхнього кінця якоря щодо полюсних наконечників.

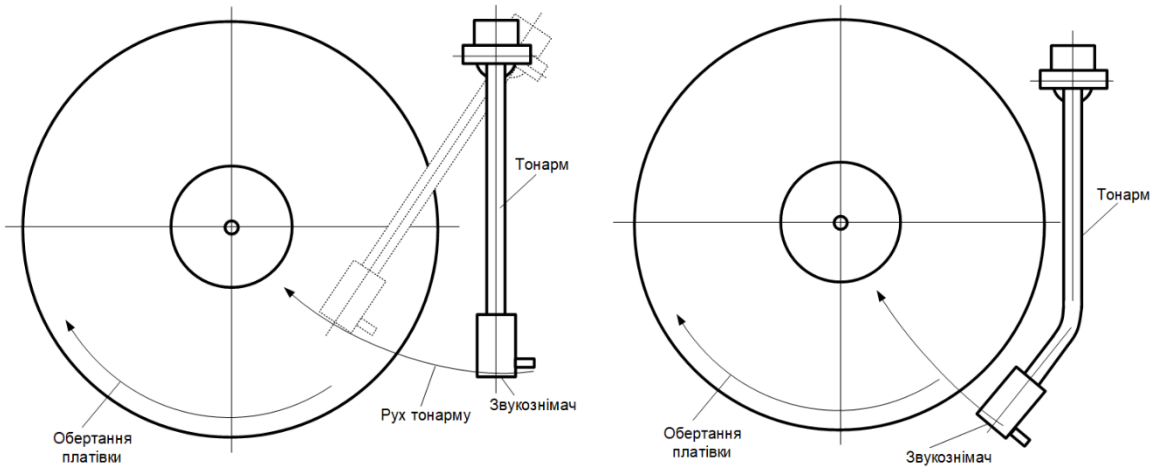
Збільшення маси звукознімача підвищує тиск голки на платівку. Це у свою чергу призводить до збільшення шумів і скорочення терміну служби платівки. Зазвичай у такій ситуації розрізняють дві сили, що впливають через голку звукознімача на платівку: вертикальну - обумовлену вагою звукознімача, і бічну - виникає внаслідок механічного опору рухомої системи звукознімача поперечним коливань якоря.

Для відтворення мікрозапису приведена до кінця голки вага звукознімача повинна бути від 7 г до 5 г, а для звичайного запису (15...20) г. Крім того, необхідний тиск на платівку залежить і від її матеріалу, ступеня її зносу, механічного опору поперечним коливанням голки, а також від матеріалу голки. Регулювати тиск можна переміщенням противаги. Дуже малий тиск призведе до вискакування голки з канавки, надмірно великий - збільшить шуми і знос платівки.

Важливим для якості звуковідтворення є форма тонарму звукознімача. Тонарми можуть бути прямими та вигнутими (рис. 6.10) [17].

Крім платівок з поперечним записом однієї програми (монофонічні платівки), застосовують платівки, в яких на одній канавці записані сигнали, що відповідають як лівому, так і правому каналам стереофонічного тракту. При відтворенні ці сигнали розділяють [18].

Існують дві системи запису стереофонічних сигналів. Одна поперечно-глибинна позначається «+» або «0/90», тобто один канал записують за глибиною, інший - поперечно глибині. А саме, сигнали першого стереоканалу фіксують у цій ситуації поперечним записом, а другого - глибинним. Різні показники якості цих видів записів перешкоджають широкому застосуванню такої системи.



а б

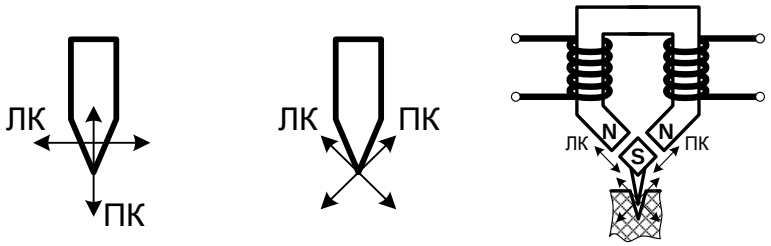
Рис. 6.10. Вигляд прямого (*а*) та вигнутого (*б*) тонарму та його проходження щодо платівки

Інша система - «х» або «45/45» поперечно-поперечна. У цій системі запис сигналів правого і лівого стереоканалів наносять відповідно на двох взаємно перпендикулярних стінах канавки, розташованих під кутом 45° до поверхні

платівки. Положення різця в канавці і напрямок його основних рухів наведено на рис. 6.11.

Якщо у правому й лівому каналах сигнали ідентичні, вийде звичайний поперечний запис, якщо ж вони знаходяться у протифазі - глибинний.

Рекордер для стереофонічного запису забезпечено двома обмотками, якими відповідно проходить струм, спричинений сигналами правого і лівого каналів. Струм у першій обмотці управляє записом на одній стінці канавки, а струм в другій обмотці - на інший стінці.



а б в

Рис. 6.11. Зсув голки для різних систем стереозапису – «+» (*а*), «х» (*б*) та будова стереозвукознімача електромагнітної системи (*в*)

Відтворення стереозапису здійснюють звукознімачами різних систем.

Стереозвукознімач електромагнітної системи побудовано із застосуванням двох обмоток, розташованих на одному полюсному наконечнику постійного магніту. Інший полюс магніту з’єднаний з голкою. Якщо запис зроблено тільки на одній стінці канавки, вістря голки буде рухатися у напрямку полюсного наконечника відповідного каналу, змінюючи ширину зазору і магнітне поле у котушці цього каналу (рис. 6.11,*в*). Інший зазор - залишається незмінним. Електрорушійна сила у цьому випадку наводиться тільки в одній котушці. Запис на іншій стінці канавки, відповідно, спричинить появу електрорушійної сили в інший котушці [18].

Конструкція стереозвукознімача п'єзоелектричної системи передбачає наявність двох незалежних п’єзоелементів - п’єзопластин або п’єзотрубок. Одні кінці п'єзоелементів закріплені нерухомо, а інші з'єднано з рухомою рамкою, до якої жорстко закріплено голку. Завдяки особливим конструктивним вирізам кути рамки можуть згинатися. Запис тільки на правій стінці канавки зумовить рух вістря голки в відповідну сторону, внаслідок чого деформації підлягатиме тільки один п'єзоелемент, який і з'явиться джерелом змінної електрорушійної сили в одному каналі звуковідтворення. У свою чергу запис на лівій стінці канавки зумовить деформацію іншого п'єзоелемента. Таким чином, кожен п'єзоелемент є джерелом змінної ЕРС у відповідному каналі відтворення.

Для відтворення стереозапису знаходять застосування і звукознімачі магнітоелектричної системи. Такий звукознімач містить дві рухомі кільцеві котушки, що розташовано у взаємно перпендикулярних площинах і один нерухомий постійний магніт. Запис на одній стінці канавки змушує вістря рухатися у відповідному напрямку, а важіль, що зв'язує голку з котушками зумовить коливання котушки, витки якої будуть перетинати магнітні силові лінії поля, створеного постійним магнітом. Інша котушка у цій ситуації буде повертатися

навколо свого центру вздовж напрямку магнітного поля, не перетинаючи його. Запис на іншій стороні канавки відповідно змінить характер руху котушок, і електрорушійна сила виникне у витках другої котушки.

Для побудови звукознімачів механічного запису використовують також системи з рухомим магнітом, системи з напівпровідниковими або ємнісними елементами, фотоелектричні системи тощо.

Чутливість п'єзоелектричних звукознімачів найбільш висока і в кращих зразках доходить до 100 мВ/см/с. Чутливість звукознімачів магнітоелектричної системи значно менше. Крім того звукознімачі п'єзоелектричної системи не потребують частотної корекції, що і пояснює їх широке застосування.

6.4.1.3. Показники якості ЕПП

Побутову апаратуру для відтворення грамзапису випускають різних класів щодо технічних показників.

Основними технічними показниками ЕПП, що впливають на якість відтворення, є: відповідність середньої частоти обертання диска заданій, рівномірність частоти обертання, рівень завад від власних вібрацій. Крім цих показників, що залежать, головним чином, від конструкції рухомого механізму і точності його виготовлення, істотні також показники встановленого в ЕПП звукознімача.

Крім забезпечення певної середньої частоти обертання диска потрібно ще і максимально можлива рівномірність цього обертання. Під час нерівномірного обертання відтворений сигнал спотворюється: він виявляється частотно-модульованим; відбувається періодична зміна висоти тону, що називають детонацією. Детонація може мати різний характер; її сприймають як «плавання» звуку, якщо частота детонації знаходиться в межах (0,2...10) Гц, і відчувають як «дроблення» звуку, що нагадує трелі, на частотах (10...30) Гц. На ще більш високих частотах детонації звук стає «жорстким».

Здатність чути детонацію залежить від її частоти; найбільш помітна детонація з частотою 4 Гц. Причиною нерівномірного обертання диска є недостатня точність виготовлення елементів рухомого механізму: незбалансованість ротора двигуна, ексцентриситети обертових деталей, нестабільність тертя у фрикційних зчепленнях тощо. Тому детонація зазвичай відбувається з декількома частотами одночасно, кожну з яких обумовлено дефектом тієї чи іншої деталі механізму. Спеціальний прилад детонометр дозволяє визначити коефіцієнти детонації і тим самим виявити дефектні деталі. Крім того, детонометр вимірює загальний коефіцієнт детонації, який завдяки обраній вимірювальній кривій приладу досить чітко відображає слухове сприйняття детонації.

У ЕПП хорошої якості загальний коефіцієнт детонації становить (0,1...0,2)%, в кращих апаратах він не перевищує 0,1%, а для дешевих побутових ЕПП допускається 0,3%.

Під час відтворення грамзапису, особливо у паузах, у гучномовцях прослуховується рокіт. Цю низькочастотну заваду створюють вібрації двигуна або інших деталей механізму, які через ряд ланок у результаті передаються голці звукознімача.

Причиною вібрацій є незбалансований ротор двигуна, недостатня механічна розв'язка двигуна від плати програвача, недостатня амортизація тонарму, а також дефекти виконання і збирання деталей ЕПП, що обертаються. Для притлумлення вібрацій двигун підвішують до плати ЕПП зазвичай через подвійну амортизацію: статор двигуна кріплять до металевої пластини через втулки з еластичного матеріалу, а саму пластину разом з укріпленими на ній деталями передавання кріплять до основної плати ЕПП через гумові втулки або пружини циліндричної або конічної форми. Радикальним заходом боротьби з вібраціями є застосування двигунів з малим числом обертів за хвилину і рушійних механізмів зі зменшеною кількістю осей обертання.

На відміну від детонації завади від вібрацій не мають періодичного характеру, хоча їх спектр зазвичай припадає на область (30…500) Гц з найбільш вираженими складовими на частотах (50…100) Гц. Оскільки ця завада найбільш помітна в паузах звучання, то в основу її оцінки покладено вимірювання напруги, що розвиває звукознімач під час програвання німої канавки, з віднесенням її до вихідної напруги звукознімача в разі відтворення запису деякого нормованого сигналу.

В табл. 6.1 наведено узагальнені особливості механічного звукозапису, а у табл. 6.2 наведено узагальнені характеристики електрофона (ЕПП), що відповідає вищій групі складності [14].

Таблиця 6.1. Особливості пристроїв запису-відтворення на грамплатівку

№ п.п.	Елементи і вузли пристроїв запису-відтворення аналогових фонограм	Механічний запис
1	Принцип формування сигналу запису	Вирізання різцем рекордера на носії запису, що обертається, який має форму диска, відповідної форми звивистої (модульованої) канавки. Різець механічно коливається під впливом електричного сигналу, який повторює коливання звукового сигналу запису.
2	Принцип формування сигналу відтворення	Грамофонна платівка обертається з тією ж частотою, як і диск при запису. Зафіксована у вигляді канавки звукова інформація «зчитується» голкою звукознімача. Коливання голки перетворюються в електричні сигнали звукової частоти.
3	Механізм пересування носія	Механізм обертання диска з постійною швидкістю обертання
4	Механізм пересування перетворювача запису	Механізм примусового пересування різця запису від краю платівки до центру.
5	Механізм пересування перетворювача відтворення	Механізм пересування звукознімача від краю платівки до центру за рахунок взаємодії певних сил, що виникають між канавкою платівки і голкою звукознімача під час програвання.
6	Формування (перетворювач) сигналу запису і принцип нанесення інформації на носій	Різець зі сталі або сапфіру з певною формою вістря нарізає канавку або створює канавку оплавленням.
7	Формування (перетворювач) зчитування сигналу	Звукознімач, до складу якого входить головка звукознімача і тонарм певної форми. Головка перетворює механічні коливання голки в електричні сигнали. Тонарм підтримує і спрямовує головку з урахуванням сил, що діють на головку. Матеріал голки - корунд або алмаз.
8	Необхідність попередньої оброблення носія	Ні, крім технологічних вимог (абсолютно гладка поверхня диска, відсутність пилу тощо).
9	Специфіка запису-відтворення	Використання ВЧ-передспотворень під час запису (тонкорекція) і зворотне перетворення АЧХ в разі відтворення (IEC 98 (3180-318-75 мкс).
10	Можливість перезапису на одному і тому ж носії	Не передбачено.
11	Носій запису	Вінілітова грамплатівка з досить однорідною і дрібнозернистою структурою.

Таблиця 6.2. Типові значення параметрів механічного запису на грамплатівці

№ п/п	Найменування параметру	Значення параметру
1.	Робочий діапазон частот, Гц, не вужче	20 ... 20000
2.	Нерівномірність (припустимі відхилення) АЧХ від номінальної, дБ, не більше, в діапазоні частот, Гц: 50-12500/20-50 і 12500-16000/16000-20000	+1,5/-3...+1,5/-6...+1,5
3.	Чутливість з електромагнітної головки без коригуючого підсилювача, мВ/см/с	0,7 ... 2,0
4.	Швидкість (частота) руху носія, об./хв.	33,1 / 3.
5.	Відхилення швидкості (частоти) від номінального значення, %	+/- 0,5
6.	Коефіцієнт детонації запису (відтворення), %	+/- 0,04 (0,08)
7.	Відносний рівень рокоту, дБ, без зваженого фільтра (із фільтром)	-45 (-69)
8.	Відносний рівень завад каналу запису, дБ	-63
9.	Відносний рівень завад каналу відтворення, дБ	-40
10.	Відносний рівень завад немодульованих «німих» канавок, дБ	-68
11.	Відношення сигнал-рокіт (рівень завад від власних вібрацій), дБ	70
12.	Відношення сигнал-фон без вбудованого коректора (рівень фону), дБ	70
13.	Відношення сигнал/шум, не менше, дБ	52...55
14.	Динамічний діапазон, дБ	36
15.	Коефіцієнт гармонік, %, не більше, на частотах, Гц: 30-60/60-8000/більше 8000	1,5/3/3
16.	Перехідне загасання між стереофонічними каналами під час запису, дБ, на частотах, Гц: 20-200/250...8000/8000...12500/12500...20000	30/40/30/15
17.	Перехідне загасання між стереофонічними каналами ЕПП, дБ, на частотах, Гц, відповідно: 315/500/1000/10000	20/25/20/15
18.	Розбаланс (неузгодженість) стереоканалів за рівнем запису на частоті 1000 Гц, не більше, дБ	1
19.	Розбаланс (неузгодженість) чутливості стереоканалів звукознімача за рівнем запису на частоті 1000 Гц, не більше, дБ	1
20.	Неузгодженість частотних характеристик стереофонічних каналів під час запису, дБ, не більше, в діапазоні частот, Гц: 20...5000/5000...20000	1/2
21.	Неузгодженість частотних характеристик стереофонічних каналів звукознімача, дБ, не більше, в діапазоні частот, Гц: 315...6300	2
22.	Притискна сила для електромагнітної головки, мН	15
23.	Амплітуда коливальної швидкості механічного запису на частоті 1000 Гц, на якій забезпечено здатність проходження відтворювальною голкою канавкою, см/с	25
24.	Частота основного (механічного) резонансу головки, Гц	не менше 6, не більше 12
25.	Добротність основного резонансу тонарму	3
26.	Спектр шуму носія, Гц	300...8000
27.	Ексцентриситет центрового отвору диска, мм	0,15
28.	Викривлення платівки, мм, не більше	1,5
29.	Термін зберігання в оптимальних умовах, років	умовно необмежений
30.	Кількість програвань (в залежності від пило/волого захищеності, до появи неприпустимо високого рівня шуму)	100...300
31.	Час запису на одній стороні, хв.	20...30

6.4.2. Магнітний запис

Під магнітним записом звуку розуміють процес створення залишкової намагніченості у звуконосії, який переміщують з постійною швидкістю відносно головки запису. Залишкова намагніченість має бути точною копією записуваних акустичних процесів [19].

У сучасних пристроях магнітного запису звуку найбільше поширення отримав звуконосій на магнітній стрічці.

Відтворення магнітного запису здійснюють зворотним перетворенням, але у цьому випадку звуконосій переміщують відносно відтворювальної головки з тією ж швидкістю, що і під час запису. Оскільки величина залишкової намагніченості змінюється уздовж стрічки відповідно до записаного звуку, то аналогічно змінюється і величина магнітного потоку в осерді відтворювальної головки. Зміна магнітного потоку викликає ЕРС у обмотці відтворювальної головки.

Безсумнівним достоїнством апаратів магнітного запису є можливість багаторазового використання звуконосіїв для запису різних програм. Це пояснюють здатністю магнітної стрічки розмагнічуватись у змінному магнітному полі. Для розмагнічування стрічки використовують головку стирання, яка звільняє стрічку від запису перед записом нової програми.

Принцип магнітного запису полягає у наступному.

Тонку стрічку, яка покрита шаром з магнітотвердої речовини, протягують з постійною швидкістю повз магнітну головку. Магнітна головка є кільцевим осердям, на якому розміщено обмотку (рис. 6.12,*а* та *б*).

У разі запису в обмотку головки подають змінний струм записуваного сигналу. Осердя головки має немагнітний зазор, який щільно прилягає до поверхні стрічки. Магнітний потік, що створює в осерді струм обмотки, в області зазору виходить назовні і намагнічує феромагнітний шар стрічки залежно від зміни струму запису.

Під час відтворення стрічку знову протягують повз магнітної головки, виводи якої підключають до підсилювача відтворення. За законом електромагнітної індукції, внаслідок зміни у часі потоку, що проходить через осердя головки, в обмотці останньої виникає ЕРС. Магнітний потік стрічки, проходячи через осердя головки, наводить в її обмотці ЕРС самоіндукції у повній відповідності з записуваним сигналом.

У каналі магнітного запису-відтворення (КМЗВ) відбуваються фізичні перетворення сигналу, що становлять сутність запису-відтворення. Процес МЗВ - це здійснення складних перетворень поточних координат сигналу в часовій та просторовій областях із зміною масштабу їх відображення [20]:

$$U_{\text{вх}}(t) \to i_{\text{з}}(t) \to \Phi_{\text{з}}(t) \to \Phi_{r}(x) \to \Phi_{\text{в}}(x) \to \Phi_{\text{в}}(t) \to e_{\text{в}}(t) \to U_{\text{вих}}(t),$$

де $U_{\text{вх}}(t)$, $U_{\text{вих}}(t)$ – вхідна і вихідна напруга сигналу; t - поточний час; x - шлях, пройдений носієм; $I_{\text{з}}(t)$ – струм запису; $\Phi_{\text{з}}(t)$ – магнітний потік у осерді головки запису; $\Phi_{r}(t)$ – залишковий магнітний потік сигналограми; $\Phi_{\text{в}}(x)$, $\Phi_{\text{в}}(t)$ - магнітний потік у осерді головки відтворення, представлений у просторовій та часовій

областях відповідно; $E_в(t)$ – електрорушійна сила (ЕРС) на виході головки відтворення.

Таким чином, у процесі магнітного запису відбувається перетворення змін амплітуди сигналу у зміни намагніченості носія, а часові зміни перетворюють в відстань на стрічці між ділянками намагніченості.

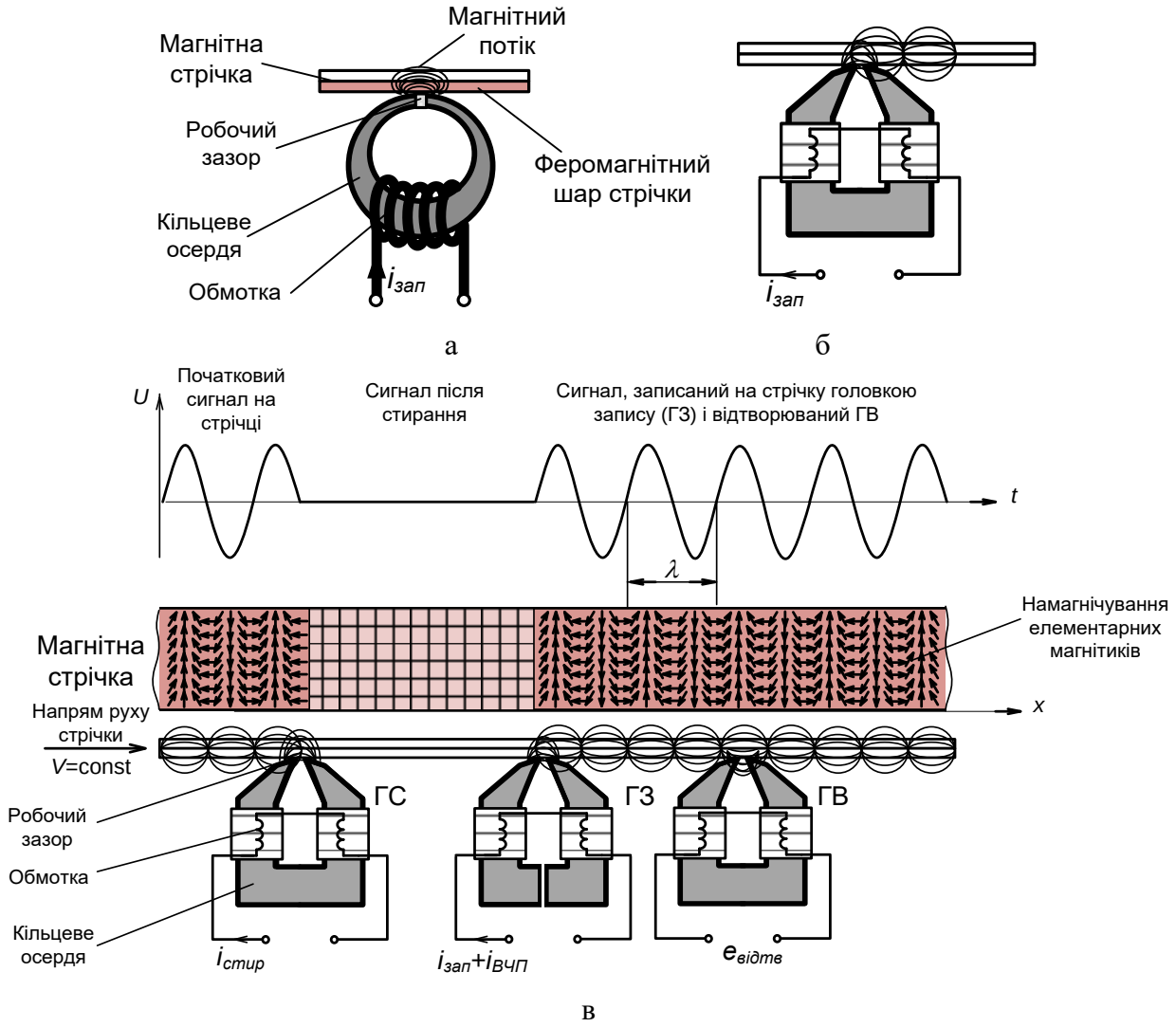


Рис. 6.12. Ілюстрація процесу формування магнітного поля в зазорі головки запису (*а, б*) та принципу магнітного запису з використанням магнітних головок і магнітної стрічки (*в*)

Для правильного відтворення сигналів необхідно забезпечити рівність швидкостей руху носія під час запису і сигналограми під час відтворенні. Зазор відтворювальної головки також повинен бути досить малим (δ = (3...5) мкм).

Сигнал з постійною частотою, що подають у головку запису, утворює на плівці регулярну структуру намагніченості, яку начебто складено з елементарних магнітиків (доменів), тобто магнітну хвилю. Довжина хвилі записаного на плівці сигналу залежить від частоти сигналу і швидкості руху стрічки відносно головки і її визначають за формулою

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

де λ - довжина хвилі, м; f - частота сигналу, Гц; V - швидкість руху стрічки м/с - для касетного магнітофона V = 4,76 см/с, для котушкового - 9,53 см/с і 19,05 см/с, для студійних - 38,2 см/с і 76,4 см/с.

На швидкості руху стрічки в звичайному касетному магнітофоні 4,76 см/с і верхній частоті звукового сигналу (14…16) кГц мінімальна довжина хвилі запису дорівнює (3,0…3,5) мкм. Щоб цей сигнал був записаний на стрічці, необхідно, щоб ширина зазору магнітної головки була не більше половини довжини хвилі. Діапазон частот запису виявляється обмеженим зверху мінімальною величиною зазору головки запису.

Нагадаємо, що 1 мкм - це тисячна частка міліметра. Діаметр волоса складає – (60…100) мкм, довжина хвилі видимого світла - в межах (0,4…0,8) мкм.

Носій з сигналами, записаними як залишкова намагніченість, що змінюється, називають магнітною сигналограмою (СГ). В разі запису звукових і відеосигналів відповідно отримуємо фонограму і відеограму.

В апаратах магнітного запису-відтворення за напрямом руху носія встановлюють головку «стирання», що створює поле розмагнічування носія, головка запису і головка відтворення (рис. 6.12,*в*).

Апарат запису містить механізм, що забезпечує рух носія з даною швидкістю, і привід (зазвичай електродвигун змінного або постійного струму). Для запису і відтворення слабких електричних сигналів в пристрої передбачено підсилювачі запису і відтворення, а для стирання запису або розмагнічування носія - спеціальний генератор струму стирання-підмагнічування. Оскільки в даний час широко використовують запис з високочастотним підмагнічуванням (ВЧП), в пристрої є генератор, що створює струм високої частоти. У побутових апаратах звукозапису генератор високої частоти застосовують одночасно для стирання і підмагнічування. Особливістю магнітного запису є можливість багаторазового використання носія для запису і подальшого відтворення записаного сигналу.

Для виготовлення магнітних головок і магнітного шару стрічки використовуються феромагнетики. Для головок магнітно-м’які, а для стрічки – магнітно-тверді феромагнетики. Магнітно-тверді феромагнетики після впливу магнітного поля зберігають намагніченість. Магнітно-м’які феромагнетики сприймають (проводять), але не зберігають намагніченість [19].

6.4.2.1. Магнітні властивості матеріалів

У магнітних матеріалах елементарними носіями магнетизму є всі елементарні частинки атома (електрони, протони, нейтрони) і їх комбінації (атомні ядра, електронні оболонки). Магнітні моменти електронів значно більше магнітних моментів інших частинок, тому вважають, що магнітні властивості атома (речовини) обумовлені в основному магнітними властивостями його електронів. Електрони мають спіновий і орбітальний магнітні моменти. Взаємодія між цими моментами і зовнішнім магнітним полем визначає магнітний ефект, властивий тому чи іншому магнітному матеріалу. Залежно від характеру цієї взаємодії розрізняють два основних ефекти зовнішнього поля: діамагнітний і парамагнітний [20].

Діамагнетизм. За відсутності зовнішнього магнітного поля власні магнітні моменти атомів дорівнюють нулю, оскільки магнітні моменти всіх електронних орбіт і спінів взаємно скомпенсовані (через хаотичний тепловий вплив вони розташовані безладно). Дія зовнішнього поля призводить до появи відмінного від нуля додаткового орбітального моменту, який завжди спрямований проти зовнішнього магнітного поля. Магнітний ефект при цьому досить слабкий. Оскільки електронні орбіти існують у атомах будь-яких речовин, то і діамагнетизм притаманний усім речовинам. Те, що на практиці діамагнетизм спостерігають не у всіх речовин, пояснюють тим, що діамагнітний ефект поглинає більш сильний магнітний ефект.

Парамагнетизм. За відсутності зовнішнього магнітного поля сумарний (інтегральний) момент речовини дорівнює нулю. В разі дії зовнішнього магнітного поля атоми прагнуть до орієнтації своїх магнітних моментів в напрямку дії поля. У результаті виникає інтегральний магнітний момент, відмінний від нуля. Магнітний ефект слабкий, хоча і сильніше діамагнітного.

На магнітні властивості речовини істотно впливає внутрішня взаємодія між атомними магнітними моментами. Ця взаємодія є електричною обмінною взаємодією і має квантово-механічну природу. Сили обмінної взаємодії прагнуть орієнтувати магнітні моменти сусідніх атомів в певному напрямку, а тепловий рух перешкоджає цій орієнтації. Залежно від переважної величини (сила обмінної взаємодії або тепловий рух) атомні магнітні моменти можуть мати або певний спонтанний (що не залежить від зовнішнього магнітного поля) магнітний порядок, або можуть бути орієнтовані хаотично. У цьому разі речовина є парамагнітною.

Феромагнетизм. Речовини, у яких за відсутності зовнішнього магнітного поля магнітні моменти атомів розташовані паралельно один одному, називають феромагнетиками. Якщо магнітні моменти атомів однакові за величиною, але розташовані антипаралельно, речовини називають антиферомагнетиками. При антипаралельному розташуванні не рівних за значенням магнітних моментів речовини називають феримагнетиками. Загалом феримагнетики - це некомпенсовані антиферомагнетики. Отже, феро- і феримагнетики характеризують наявністю інтегрального магнітного моменту або спонтанної намагніченості за відсутності зовнішнього магнітного поля, що обумовлено упорядкуванням атомних магнітних моментів під дією сил обмінної взаємодії.

Феромагнетизм спостерігають тільки в кристалічних тілах. Серед кристалів чистих елементів тільки три метали мають колінеарний феромагнітний порядок. Це 3d-метали: Fe, Ni, Co.

Кожен з зазначених металів (або сплавів на їх основі) має свою кристалічну решітку, яка і визначає їх магнітні властивості. Характерним є те, що магнітні властивості різні у різних напрямках кристала. Так, залізо найбільш легко намагнічується в напрямку ребра куба, нікель - в напрямку діагоналі куба, кобальт - уздовж осі симетрії.

Відмінною особливістю поведінки феромагнетиків у зовнішніх полях є велика магнітна сприйнятливість, нелінійність і неоднозначність (гістерезис) залежності намагніченості від напруженості зовнішнього поля. Магнітні властивості феромагнетика послаблюються зі збільшенням температури і за температури, яка

дорівнює точці Кюрі ($T_к$), переходять у парамагнітні. Електричний опір металевих феромагнетиків малий.

Загалом, феромагнетики можна розподілити на магнітно-м'які і магнітно-тверді.

Магнітно-м'які матеріали зазвичай однофазні за структурою, тобто не містять немагнітних фаз, а складаються тільки з одних багатодоменних феромагнітних зерен (областей). Магнітний стан при цьому змінюють зміщенням стінок між доменами.

Типовими магнітно-м'якими феромагнітними матеріалами, що використовують в техніці магнітного запису, є металеві сплави типу пермалоїв 80 НХС, 79 НМ, 76 НХД, альфенола, мюметалу. Зазначені сплави використовують для осердь магнітних головок [22].

Магнітно-тверді матеріали за структурою двофазні. Одна фаза немагнітна, інша - феромагнітні однодоменні частки, які на деякій відстані одна від одної розподілені рівномірно у товщі немагнітної фази. Кожна частка спонтанно намагнічена.

Магнітно-твердих феромагнітних матеріалів, використовуваних у техніці магнітного запису, досить мало. Типовим матеріалом є двоокис хрому CrO_2, який застосовують як робочий шар носіїв запису. Кристали CrO_2 мають структуру рутилу. У порівнянні з металевими сплавами CrO_2 має коерцитивну силу, що приблизно дорівнює 40 кА/м, меншу електропровідність, $T_к \sim 400$ К.

Феримагнетизм. За кристалічною структурою феримагнетики істотно відрізняються як від феромагнетиків, так і від антиферомагнетиків. Для феримагнетиків характерна наявність двох або більше спонтанно-намагнічених підрешіток. Феримагнетики мають одну кристалічну решітку; їх підрешітки відрізняються від підрешіток антиферомагнетиків як кристалографічною структурою, так і значенням і упорядкуванням магнітних моментів. Підрешітки антиферомагнетиків еквівалентні і відрізняються тільки орієнтацією магнітних моментів. Оскільки у феримагнетиків спонтанні намагніченості підрешіток мають різне значення, їх сумарна намагніченість відмінна від нуля.

До числа типових феримагнітних речовин відносять ферити зі структурою шпінелі, наприклад магнетит Fe_3O_4. У феримагнетика типу шпінелі спостерігають, як правило, дві нееквівалентні підрешітки. Феримагнетизм шпінелей обумовлений самою кристалічною структурою. Тому такі феримагнетики називають речовинами з власним феримагнетизмом.

У техніці магнітного запису для осердь магнітних головок використовують нікелево-цинкові $(NiZn)Fe_2O_4$ і марганцево-цинкові $(MnZn)Fe_2O_4$ ферити, а ферити γ-Fe_2O_3 і $CoFe_2O_4$ - для робочих шарів магнітних стрічок. Ці ферити мають кристалографічну структуру типу шпінелі. Наприклад, окис γ-Fe_2O_3 отримують з магнетика Fe_2O_4 його окисленням. Частинки γ-Fe_2O_3 зберігають ту ж кристалічну решітку, форму і розміри, що і частинки Fe_2O_4.

Ферити $(NiZn)Fe_2O_4$ і $(MnZn)Fe_2O_4$ є двофазним магнітно-м'якими матеріалами, а γ-Fe_2O_3 і $CoFe_2O_4$ - двофазними магнітно-твердими матеріалами.

За зовнішнім проявом магнітних властивостей зазначені феримагнетики близькі до феромагнетиків (за винятком меншої електричної провідності,

обумовленої наявністю немагнітної фази).

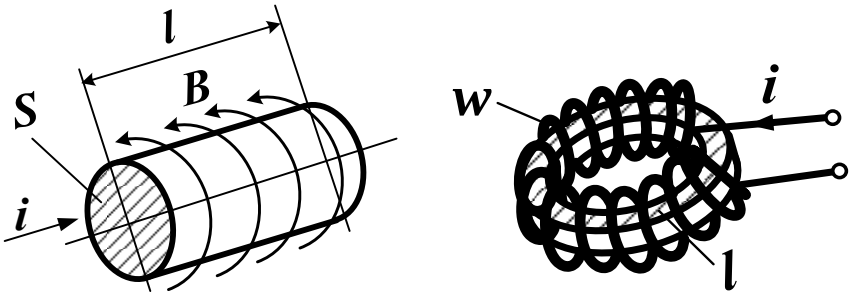
Суперпарамагнетизм. У процесі виготовлення феро- і феримагнітні частинки можуть дробити. Іноді утворюють настільки малі частинки, що для них сили обмінної взаємодії будуть мізерно малі. Тоді переважним в частинках стає тепловий рух молекул, і вони поводяться подібно парамагнітному газу з атомів і молекул. Відмінність полягає лише у тому, що частинки самі нерухомі, а змінюється тільки орієнтація їх магнітних моментів. Оскільки залежність намагніченості частинок подібна до аналогічної залежністю намагніченості парамагнітного газу, а значення магнітних моментів часток більше, ніж у молекул газу, ці дрібні частинки називають суперпарамагнітними.

Суперпарамагнітним частинкам властиві висока сприйнятливість і відсутність гістерезису. У разі зміни температури вони можуть переходити з суперпарамагнітного стану в феромагнітний або феримагнітний і навпаки.

Магнітні властивості атома визначено магнітними властивостями електронів, що рухаються. Орбітальний магнітний момент обумовлений електронами, що обертаються по орбітах навколо ядра атома. Спіновий магнітний момент створено обертанням електронів навколо власної осі. Повний магнітний момент атома є векторною суму орбітального і спінового магнітних моментів. Магнітний момент кругового струму визначають як добуток струму на площу, що охоплюється струмом (рис. 6.13) [20]:

$$M=iS,$$

тут M - магнітний момент, А·м^2; i – сила струму, А; S, м^2.



а б

Рис. 6.13. Формування магнітного поля навколо провідника (*а*) та електромагніт у вигляді тороїда (*б*)

Сумарний магнітний момент речовини можна визначити як векторну суму елементарних моментів:

$$\sum M = M_1 + M_2 + ... + M_n.$$

Намагніченість (А/м) обумовлено сумарним магнітним моментом:

$$I = \frac{\sum M}{V},$$

де V - об'єм речовини.

Для оцінки магнітного ефекту, створюваного струмом, незалежно від властивостей середовища використовують поняття напруженості поля H. Наприклад, для замкнутого тороїда, на якому рівномірно розподілена обмотка з w витків кількістю w, напруженість поля в провіднику

$$H = \frac{iw}{l_{\text{ср}}},$$

де H - напруженість поля, А/м; $l_{\text{ср}}$ - довжина середньої лінії тороїда, м.

Магнітний стан речовини оцінюють за магнітною індукцією B (Тл)

$$B = \mu_0 (H + J),$$

де $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн/м - магнітна стала.

Цей вираз називають рівнянням магнітного стану речовини.

Намагніченість речовини є функцією магнітного поля, тобто

$$J = K_{\text{м}} H,$$

де $K_{\text{м}}$ - коефіцієнт магнітної сприйнятливості речовини (безрозмірна величина).

Відносна магнітна проникність

$$\mu = 1 + K_{\text{м}}.$$

Таким чином феромагнетики характеризують коефіцієнтом відносної магнітної проникності (μ) і коефіцієнтом магнітної сприйнятливості $K_{\text{м}}$. μ показує у скільки разів зростає магнітна індукція B у речовині в порівнянні з зовнішнім простором.

Магнітну індукцію речовини можна записати як

$$B = \mu_0 \mu H,$$

або

$$B = \mu_{\text{а}} H,$$

де μ - відносна магнітна проникність; $\mu_{\text{а}} = \mu_0 \mu$ - абсолютна магнітна проникність, що має розмірність магнітної сталої. У немагнітною середовищі (повітрі) μ= 1, отже,

$$B_{\text{в}} = \mu_0 H_{\text{п}}.$$

За значеннями магнітної сприйнятливості і відносної магнітної проникності речовини підрозділяються на феромагнітні, парамагнітні і діамагнітні.

У феромагнітних речовин (сталей, нікелю і різних сплавів) намагніченість і індукція можуть досягати великих значень. У парамагнітних речовин (дюралюмінію, деяких сплавів) $K_м>0$ та $\mu>1$, $K_м = 10^{-3}...10^{-5}$, і намагніченість має знак поля, але дуже невелика.

У діамагнітних матеріалів (міді, латуні, бронзи і металів) $K_м<0$ та $\mu<1$, $K_м = =-10^{-5}...-10^{-7}$, і $\mu\approx1$, намагніченість протилежна за знаком зовнішньому полю, але дуже незначна.

Магнітний потік (Вб) можна визначити як добуток індукції B на площадку, що перерізана силовими лініями, S:

$$\Phi = B\,S.$$

Основні властивості феромагнітних (магнітних) речовин.

1. Це тверді речовини з кристалічною структурою.

2. Мають мікроскопічні області намагнічування (домени). У ненамагнічених речовинах домени розташовані спонтанно (хаотично), в результаті чого $J = 0$. Протяжність доменів становить (0,1...10) мкм. Між намагніченими областями існують стінки, що мають «товщину» такого ж порядку, як і домени. Однодоменні матеріали без стінок - це порошкові магнітні матеріали.

3. Коефіцієнти магнітної сприйнятливості і проникності є функцією поля:

$$K_м = \psi(H);\ \ \mu = \psi(H) + 1,$$

отже, матеріал має магнітну нелінійність.

4. Мають явище післядії (коерцитивність). При дії магнітного поля на магнітний матеріал він намагнічується, у разі припинення дії поля матеріал частково розмагнітиться і буде мати залишкову намагніченість. На цій властивості заснований принцип магнітного запису. У зв'язку з наявністю коерцитивності існує поняття магнітної пам'яті або магнітної передісторії.

5. Мають властивість анізотропії - значення $K_м$ та μ залежать від напрямку дії поля. У загальному випадку магнітний стан в напрямку осей x, y, z не дорівнює між собою. Ця властивість залежить від способу виготовлення магнітного матеріалу. У прокатаних матеріалів магнітна анізотропія може досягати значення, що дорівнює двом.

6. Мають точку Кюрі $T_к$ - температуру, на якій магнітний матеріал втрачає свої магнітні властивості. За температури $T_к$ не можна намагнітити речовину, так як вона стає парамагнітною. Якщо речовину охолодити, вона знову стане магнітною, але зі зміненою структурою.

7. Характерно явище магнітного «насичення», в разі якого в міру збільшення поля намагніченість зростає до деякого граничного значення J_S.

Статичні характеристики намагнічування. Феноменологічну криву намагнічування феромагнітного магнітного матеріалу отримують намагнічуванням осердя у вигляді тороїда, для якого

$$H = \frac{in}{l_{\text{ср}}}.$$

На рис. 6.14,*а* наведено криву намагнічування і розмагнічування тороїда ПКН - початкова крива намагнічування; 1-2 - ділянка спаду (розмагнічування) в разі зменшенні поля до нуля [20].

Заштрихована площа характеризує незворотні втрати під час розмагнічування.

Така крива є типовою для всіх магнітних матеріалів, що відрізняються тільки значеннями намагніченості насичення, залишкової намагніченості, і поля насичення.

ПКН можна розподілити на п'ять областей, кожна з яких має свої типові особливості (рис. 6.14,*б*).

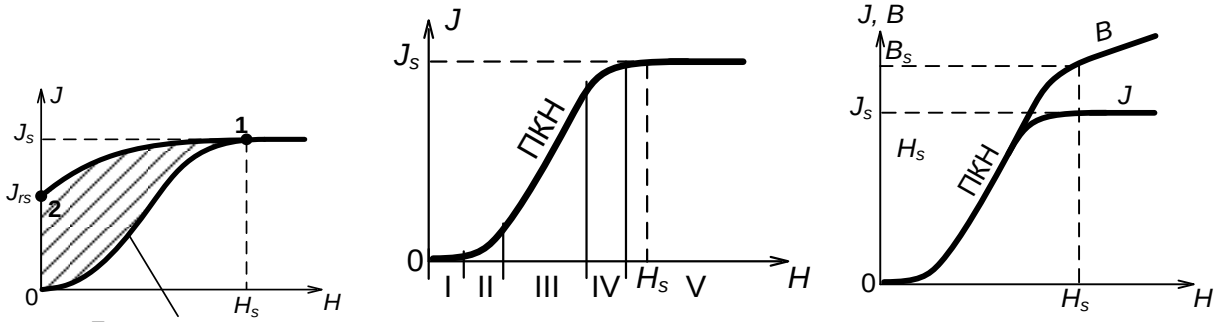
I - область слабкого намагнічування, в якій процеси намагнічування оборотні, тобто відсутні явища гістерезису.

II - область Релея, в якій починаються незворотні процеси зсуву доменів (область нижнього загину кривої).

III - область стрибків Баркгаузена: домени до середини області закінчують зміщення і настає обертання доменів. У цій області намагніченість зростає пропорційно зростанню поля.

IV - область переходу в насичення (область верхнього загину). У цій області закінчується обертання доменів.

V - область насичення (область парамагнітних процесів):



а б в

Рис. 6.14. Форма Формування залишкової намагніченості в феромагнетику (*а*), області намагнічування магнітного матеріалу за початковою кривою намагнічування (*б*) та форма кривої намагнічування магнітних матеріалів за індукцією та намагніченістю (*в*)

Феноменологічна крива за індукцією для початку області V виходить на підставі ПКН за намагніченістю. За умови $J = J_S$, $H = H_S$, $B = B_S$

$$B_s = \mu_0 H_s + \mu_0 J_s.$$

В разі подальшого зростання напруженості поля $H > H_S$ намагніченість практично залишається постійною, але індукція збільшується внаслідок зростання поля. В області V залишається справедливим вираз

$$B_V = \mu_0 H_V + \mu_0 J_s,$$

з якого випливає, що в разі збільшення H_V збільшується D_V, тобто крива за індукцією не має чіткого значення насичення (рис. 6.14,*в*).

Для парамагнітних і діамагнітних матеріалів коефіцієнт магнітної сприйнятливості величина постійна, а для феромагнетиків - змінна.

6.4.2.2. Процес магнітного запису

З урахуванням магнітних властивостей матеріалів, що використовують у магнітному записі, опишемо процес магнітного запису на магнітну стрічку.

Магнітний шар, як уже зазначено, виготовляють з магнітно-твердого феромагнітного матеріалу. У будь-якому феромагнетику містяться елементарні "магнітики" - домени. Навіть атом з одним електроном, що обертається з деякою швидкістю навколо ядра, є елементарним магнітом, оскільки заряд електрона, що рухається, створює кільцевий струм, який має власне магнітне поле. Окремо взяті магнітні поля атомів дуже слабкі, але в домені всі елементарні магнітні поля атомів складаються і утворюють магнітне поле домену. Якщо феромагнетик не намагнічено, то магнітні поля окремих доменів орієнтовані хаотично відносно одне до одного, і результуюче магнітне поле дорівнює нулю. Якщо ж цей феромагнетик помістити в зовнішнє магнітне поле, наприклад, у вигляді осердя у котушці індуктивності, то під впливом цього поля - магнітні поля доменів зорієнтуються в одному напрямку. При цьому до зовнішнього полю додаються власні поля доменів, і загальне поле стрімко зростає (див. рис. 6.12) [19].

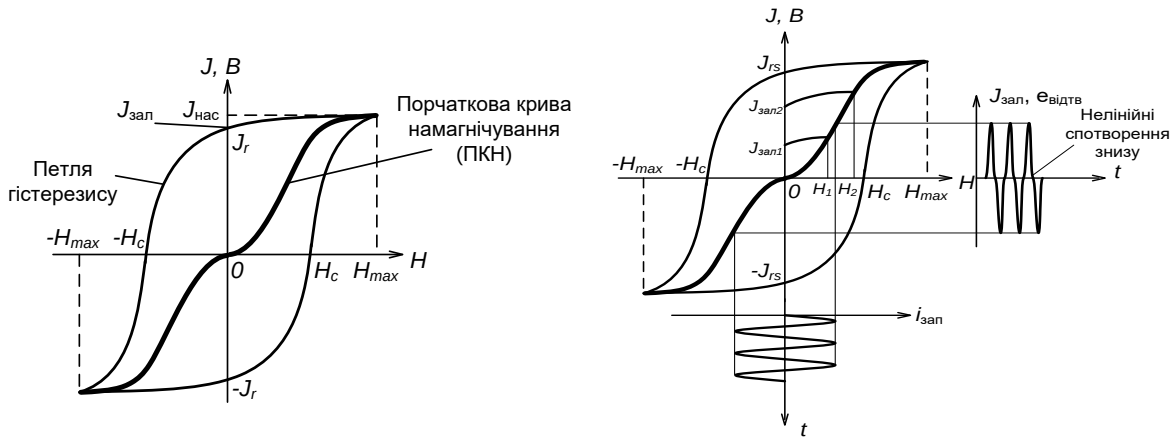
Феромагнетики характеризують коефіцієнтом відносної магнітної проникності, що показує, наскільки зростає магнітна індукція у речовині в порівнянні з зовнішнім простором. Відносна магнітна проникність може доходити у феромагнетиків до декількох десятків тисяч. У стільки ж разів зростає і магнітне поле в осерді. Тому для виготовлення різного роду дроселів (котушок індуктивності на осерді), як правило, використовують осердя з феромагнітного матеріалу. Яскравим прикладом є осердя магнітної головки. Для виготовлення осердя використовують магнітно-м’які феромагнетики. У разі зняття зовнішнього магнітного поля у таких матеріалів індукція зникає. Магнітно-тверді ж феромагнетики зберігають деяку намагніченість і після повного зняття зовнішнього магнітного поля. Так виготовляють різного роду магніти.

Процес намагнічування магнітно-твердих матеріалів відбувається так [20].

На рис. 6.15,*а* на горизонтальній осі відкладено напруженість зовнішнього магнітного поля H. Вона пропорційна, наприклад, силі струму в обмотці головки запису. За вертикаллю відкладено залишкову намагніченість J_S і (або) магнітну індукцію у магнітному матеріалі B. Якщо збільшувати струм у обмотці головки, то на початковій ділянці кривої магнітна індукція в матеріалі наростає повільно, потім з'являється ділянка швидкого зростання індукції і, нарешті, ділянка насичення, коли в разі подальшого зростання зовнішнього поля індукція не збільшується.

Граничне значення індукції магнітного шару називають індукцією насичення $B_{\text{нас}}$. Криву називають основною кривою намагнічування або первинною кривою намагнічування. Тепер почнемо зменшувати струм у обмотці головки. Домени в магнітному шарі продовжують зберігати орієнтацію, і магнітна індукція матеріалу

не зменшується до нуля у разі зменшення напруженості зовнішнього магнітного поля до нуля. Величину магнітної індукції за нульового зовнішнього поля називають залишковою магнітною індукцією. Чим вона більше, тим сильніше буде притягувати металеві предмети магніт, зроблений з цього матеріалу, тим більшим може бути рівень запису на магнітній стрічці з цього ж матеріалу.



а б

Рис. 6.15. Процес намагнічування магнітного матеріалу за петлею гістерезису (*а*) та форма сигналу запису без ВЧП (*б*)

Щоб розмагнітити матеріал шару, треба подати в обмотку струм протилежного напрямку. Напруженість поля, за якої індукція B обернеться в нуль, називають коерцитивної силою. Чим більше коерцитивна сила, тим важче розмагнітити матеріал, тим менше за розміром сусідні домени з протилежного намагніченістю зберігають її. Збільшивши потім струм в обмотці (у зворотному напрямку), відбудеться намагнічування матеріалу, але "навпаки". Якщо періодично перемагнічувати матеріал, можна отримати деяку замкнену криву, яку називають петлею гістерезису. Чим більше площа петлі, тим більшу роботу на перемагнічування треба здійснити.

Безпосередньо записати сигнал звукових частот, подавши його на виводи обмотки головки, звичайно можна, але при цьому якість запису буде абсолютно незадовільною. Для пояснення цього звернемося до основної кривої намагніченості (рис. 6.15,*б*). Її наведено для намагнічування в обох напрямках. Оскільки початкова ділянка кривої полога, то намагнічування стрічки для слабких сигналів відбувається погано. Спотворення сигналу при цьому будуть неприпустимо великі.

Сучасний метод запису, що застосовують у аналогових звукових магнітофонах, використовує лінеаризацію кривої намагніченості сигналом високочастотного підмагнічування (ВЧП). Під час запису в обмотку головки разом зі звуковим подають високочастотний сигнал, частотою $f_{ВЧП}>(3…5)\ f_в$, і він має значно більший рівень, ніж звуковий. Рівень струму ВЧП відповідає рівню середини лінійної ділянки ПКН (початкової кривої намагнічування).

Високочастотне магнітне поле, яке спричинене цим сигналом, як би розгойдує домени феромагнетика, руйнуючи жорсткі зв'язки між ними і полегшуючи намагнічування стрічки. Можна сказати, що напруга підмагнічування забезпечує запис сигналів з використанням найбільш лінійних ділянок основної кривої

намагнічування, тим самим зменшуючи спотворення «знизу» (рис. 6.16).

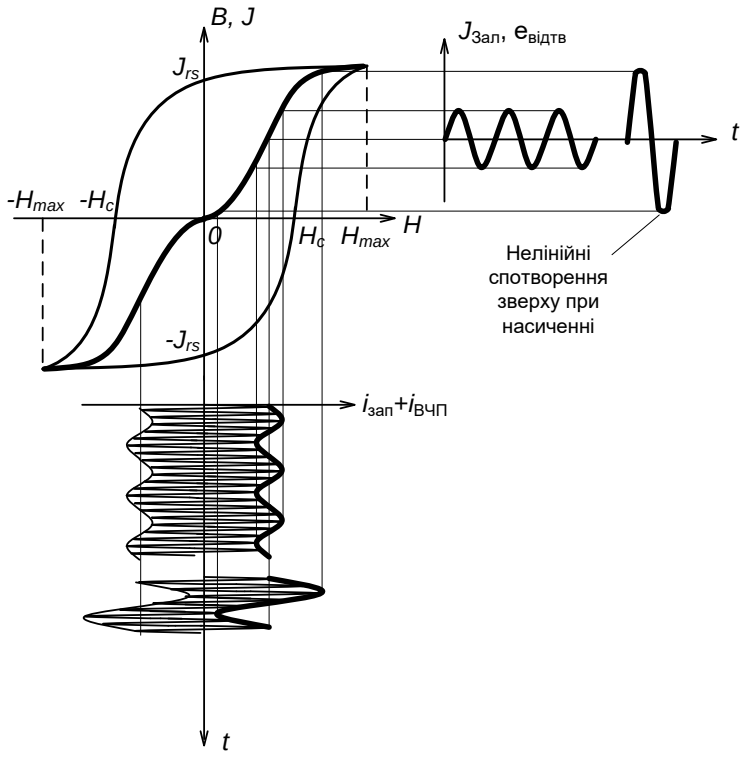


Рис. 6.16. Процеси в разі запису на магнітну стрічку з ВЧП

Оскільки напруга підмагнічування встигає перемагнічувати стрічку кілька разів за час проходу повз зазор головки, то ці коливання практично не залишаються в запису. Частота струму підмагнічування сучасних магнітофонів зазвичай лежить в межах (50…100) кГц. Для певної частоти сигналу існує оптимальне значення струму підмагнічування, для якого намагніченість магнітного шару максимальна. При цьому, на жаль, для інших частот сигналу це значення виявляється далеко не оптимальним, що призводить до зниження рівня намагніченості для цих частот і зростанню гармонічних спотворень. На практиці в разі вибору значення струму підмагнічування доводиться йти на компроміс: для розширення динамічного діапазону в області верхніх частот доводиться зменшувати струм підмагнічування, але при цьому зростають нелінійні спотворення, і знижується віддача стрічки на середніх частотах. Для стрічок, що розрізняють за магнітними властивостями, значення оптимального струму підмагнічування також різне.

Навіть варіації магнітних властивостей стрічки одного типу, що неминуче виникають у процесі виробництва, потребують підстроювання струму підмагнічування. У висококласних магнітофонах вводять спеціальне регулювання струму підмагнічування, що здійснюють перед кожним записом на нову стрічку. Інакше важко забезпечити стабільність параметрів якості запису, що мають жорсткі вимоги. Останнім часом, завдяки використанню мікропроцесорного управління, встановлення оптимальних струмів підмагнічування і запису здійснюють без участі користувача. Але це, звичайно, викликає подорожчання моделей магнітофонів, забезпечених такими пристроями [19].

Динамічний діапазон аналогового магнітного запису визначають, з одного

боку, власні шуми магнітної стрічки, з іншого - максимально можливий рівень запису, за якого нелінійні спотворення не перевищують певної величини. Шум стрічки спричинено деякою відмінністю магнітних властивостей окремих доменів, а також нерівномірним розподілом магнітних частинок на поверхні, що завжди має місце в реальній технології виробництва магнітної стрічки. Рівень шуму підсилювача відтворення в високоякісних магнітофонах зазвичай нижче рівня шуму стрічки, що досягають застосуванням високоякісних магнітних головок і електронних компонентів. Рівень шуму запису залежить від ступеня симетричності форми струму підмагнічування – в разі асиметрії струму підмагнічування в головці запису рівень шуму фонограми підвищується.

Динамічний діапазон сучасних побутових магнітофонів досягає (50…60) дБ, для студійних магнітофонів зі швидкістю руху стрічки 38 см/с - до 75 дБ. Використання різного роду систем шумозниження дозволяє поліпшити відношення сигнал-шум на виході магнітофона, але абсолютно безсило усунути вплив так званого модуляційного шуму, рівень якого зазвичай перевищує 40 дБ. Крім того, компандерні системи шумозниження (DOLBY-B, DOLBY-C, dbx тощо) вимагають високої стабільності параметрів каналів відтворення звукового сигналу. До того ж системи шумозниження призводять до динамічних спотворень звукових сигналів, які різко змінюються, характерних для симфонічної музики, ударних інструментів тощо.

Модуляційні шуми аналогового магнітофона спричинені багатьма факторами: непостійністю контакту стрічка-головка, поперечними коливаннями стрічки, що призводять до деякої розбіжності доріжок запису і відтворення, а також неоднорідністю магнітного шару. Поперечні коливання стрічки і неоднорідність її магнітного шару призводять до модуляції глибиною 10% амплітуди сигналу, що не залежить від частоти записуваного сигналу. Непостійність контакту стрічки з головкою, що виникає через шорсткості стрічки, забруднення, ривків при транспортуванні стрічки неідеальним стрічкопротягувальним механізмом, призводить до модуляції сигналів переважно верхніх частот. Причому рівень модуляції верхніх частот сигналу в побутових магнітофонах доходить до (30…50)%, що набагато перевищує рівень помітності такого роду спотворень.

Коефіцієнт нелінійних спотворень, як і рівень шуму, визначать властивості стрічки, а точніше, нелінійність безгістерезисної кривої намагніченості носія. Нелінійність кривої суттєво залежить від значення струму підмагнічування і рівня струму запису. У разі зменшення сили струму підмагнічування щодо оптимального за віддачею стрічки, а також у разі збільшення рівня запису спотворення зростають. Сучасні стрічки і головки не в змозі забезпечити спотворення менше 0,2%. До того ж, для досягнення такого рівня спотворень доводиться знижувати рівень записуваного сигналу, а значить, і відношення сигнал-шум. Наприклад, якщо коефіцієнт нелінійних спотворень повинен бути менше 1%, то залишкова намагніченість носія повинна складати не більше 25% від максимально можливої для даної стрічки. Зазвичай максимальний рівень запису вибирають з таким значенням, за якого коефіцієнт третьої гармоніки синусоїдного сигналу, записаного на стрічці, досягає значення у 3%. У цьому випадку відношення сигнал-шум буде характеризувати динамічний діапазон магнітофона.

Серйозною причиною, яка знижує якість звуковідтворення в разі магнітного запису звуку є непостійність швидкості руху стрічки (детонація), що призводить до паразитної модуляції вихідного сигналу. Детонацію спричинено недосконалістю СПМ магнітофона, нестабільністю сил тертя стрічки відносно напрямних стійок, магнітних головок, проковзуванням стрічки щодо ведучого валу і іншими причинами.

Недосконалість СПМ виражено в битті ведучого валу і притискного ролика, інших обертових частин, в хитанні роторів електродвигунів, в нестабільності моменту тертя в підшипниках тощо. Повільні (менше 0,1 Гц) зміни частоти відтвореного сигналу виявляють як зміщення тональності і називають дрейфом швидкості. Якщо частота коливань швидкості знаходиться у межах (0,1…10) Гц, спотворення набувають характеру підвивання, плавання звуку. На частоті коливань швидкості вище 10 Гц спотворення сприймаються як хриплість, вібрація звучання. Спотворення, викликані детонацією, найбільш помітні на частотах модуляції (2…10) Гц. Граничний рівень помітності детонації для монотонного сигналу може становити (0,01…0,15)%. Для музичних творів поріг зазвичай збільшено до (0,3…0,4)%.

Для зниження рівня детонації всі деталі СПМ, що обертаються (маховики, вали, різні шківи і ролики) доводиться виготовляти з мінімальними радіальними биттям, застосовувати прецизійні підшипники. Поверхні деталей, що стикаються зі стрічкою, необхідно обробляти за високим класом чистоти. Двигун ведучого валу повинен мати малу нерівномірність швидкості обертання, всі обертові деталі повинні бути ретельно збалансовані. В процесі експлуатації магнітофона знос підшипників, стійок, деформація еластичного шару притискного ролика, зниження еластичності пасика часто призводять до збільшення детонації і зміни середньої швидкості руху стрічки, що викликає необхідність періодичної налаштування та ремонту.

Завади виникають також через недостатній рівень стирання, проникнення сигналу з сусідньої доріжки запису і іншого стереоканалу, наведень від радіотрансляції мережі і детектування сигналів місцевих потужних радіомовних станцій через неправильне екранування і проектування підсилювача відтворення. Перехідні завади між стереоканалами спричинено, як правило, паразитними індуктивними і ємнісними зв'язками між секціями блоку головок, а також між каналами запису-відтворення і збільшуються з ростом частоти. Проникнення сигналу з сусідньої доріжки запису обумовлено збільшенням ефективної ширини доріжки запису зі зменшенням частоти і проявляється, в основному, у смузіі частот (30…100) Гц.

До числа джерел завад відносять також копір-ефект. Під час зберігання стрічки відбувається часткове взаємне намагнічування сусідніх шарів стрічки, що призводить до погіршення відношення сигнал-шум і зниження рівня відтвореного сигналу. Рівень "помітності" завади, що спричинено копір-ефектом, досягає 60 дБ. Для його зниження необхідно у процесі зберігання періодично проводити перемотування стрічки.

Необхідно згадати і такий недолік аналогового магнітного звукозапису, добре відомому любителям Hi-Fi, як погіршення якості звуку під час кожного перезапису

фонограм з магнітофона на магнітофон.

Отже, аналоговому звукозапису на магнітній стрічці притаманні такі недоліки [19]:

- недостатній динамічний діапазон, особливо в області верхніх звукових частот;
- підвищені (за сучасними поняттями) нелінійні спотворення;
- детонація і модуляційні шуми;
- збільшення всіх видів спотворень в разі кожного наступного перезапису або дублюванні;
- нестабільність частотних характеристик внаслідок технологічного розкиду параметрів стрічок, зносу головок, СПМ, нестабільності струму підмагнічування;
- великий рівень перехресних завад;
- копір-ефект.

6.4.2.3. Стирання запису

Під стиранням магнітного запису розуміють повне розмагнічування носія з метою усунення наявного у ньому записаного сигналу. Розмагнічування принципово можна здійснити [19]:

1) термічним способом - нагріванням робочого шару до температурної точки Кюрі;

2) механічною вібрацією з великим прискоренням (тряска) носія;

3) впливом на носій зовнішнім магнітним полем.

У зв'язку з рядом технологічних труднощів нагрівання і механічну вібрацію носія не використовують для стирання запису.

Для магнітофонів використовують стирання зовнішнім магнітним полем високої частоти, що створює спеціальна головка стирання.

Розрізняють три способи стирання: постійним магнітним полем, змінним магнітним полем, що зменшується, для носія в рулонах, і змінним полем, що зменшується, за допомогою головок стирання.

Стирання постійним полем. Цей спосіб стирання полягає в намагнічуванні носія до насичення і подальшому розмагнічуванні його полем протилежного знаку до такого значення, за якого після зняття поля відбувається спад намагніченості до нуля.

На рис. 6.17,*а* наведено цикл перемагнічування, що доводить носій до повного розмагнічування. Носій із залишковою намагніченістю J_{r0} полем H_S доводять до насичення, потім полем $H_{ст}$ зворотного напрямку намагнічують до $-J_{ст}$.

Після скидання поля за петлею гістерезису відбувається розмагнічування носія від $H_{ст}$ до нуля. Такий спосіб розмагнічування носія застосовують в процесі запису з постійним підмагнічуванням або без підмагнічування.

Для стирання застосовують спеціальну головку з двома робочими зазорами (рис. 6.17,*б*). Головка має дві обмотки, розташовані на бічних стрижнях осердя. Через одну обмотку пропускають постійний струм I_S, який доводить поле в першому зазорі до значення, за якого носій, що проходить повз зазор, доводиться до стану насичення $H_S=kI_S$. Через іншу обмотку пропускають постійний струм $I_{ст}$, що створює в другому зазорі поле зворотного напрямку $H_{ст}= KI_{ст}$, яке при виході

носія із зони дії зазору забезпечує розмагнічування носія до нуля.

Головка стирання встановлюють перед (за рухом носія) головкою запису, режим роботи її встановлюють експериментально. Для цієї мети в першу обмотку подають струм I_S і збільшують його до тих пір, поки не відбудеться насичення носія. Контроль стирання виконують під час відтворення за рівнем шумів, які в разі насичення носія будуть найбільшими. Потім в другу обмотку подають струм $I_{ст}$, який збільшують від нуля до можливого максимуму. На виході підсилювача відтворення вимірюють рівень шумів, мінімальне значення якого буде на оптимальному струмі стирання $I_{ст\ опт}$. Для $I_{ст}<I_{ст\ опт}$ і $I_{ст}>I_{ст\ опт}$ носій виявиться нерозмагніченим і шуми зростуть.

Стирання змінним полем. Розглянутий спосіб стирання заснований на доведенні носія до насичення і подальшому розмагнічуванні «симетричними» циклами поля, що неодноразово перемагнічує і яке спадає до нульового намагнічування. На рис. 6.17,*в* наведено згасне змінне поле, яке використовують для стирання:

$$H_{\max 1} > H_{\max 2} > H_S,$$

де H_S - напруженість поля насичення.

На рис. 6.17,*в* наведено також розмагнічувальні (згасні) цикли, що доводять носій до повного розмагнічування. Досвід показує, що за 15...20 згасних циклів поля носій буде практично повністю розмагнічено.

Стирання носія в рулонах розмагнічувальним дроселем. Дросель є стрижневим осердям з обмоткою, через яку пропускають змінний струм частотою f_c (зазвичай $f_c = 50$ Гц).

В разі незамкнутому осерді навколо дроселя утворюється значне поле розсіювання, інтенсивність якого залежить від амплітуди струму $I_m \geq U_m / \omega L,$, де L - індуктивність дроселя. У разі великого реактивного струму дросель сильно нагрівається, тому його включають тільки на час, необхідний для розмагнічування рулону (кілька секунд). Взаємне розташування дроселя і рулону при розмагнічуванні наведено на рис. 6.17,*г*. На змінному струмі $i_c = I_m \sin \omega_c t,$ навколо дроселя утворено поле розсіювання $H = H_m \sin \omega_c t.$

В разі віддалення дроселя від поверхні рулону на відстань x: поле зменшиться і стане

$$H_x = H_m e^{-kx} \sin \omega_c t,$$

де $x = vt$, $k = 2\pi/\lambda = \omega_0/c_0$; c_0 - швидкість поширення електромагнітних коливань; v - швидкість переміщення дроселя. Якщо дросель поступово зі швидкістю v віддаляти від рулону на відстань $x = a$, на якій поле H_x на поверхні рулону практично зникне, то носій виявиться розмагніченим. В різі віддалення дроселя від поверхні рулону на 0,5...1 м протягом 2...3 с відбудеться 100...150 циклів перемагнічування згасним полем, яке доведе рулон з носієм до повного розмагнічування. Розмагнічувальні дроселі використовують для попереднього розмагнічування носіїв у рулонах до зарядки їх у апарат запису.

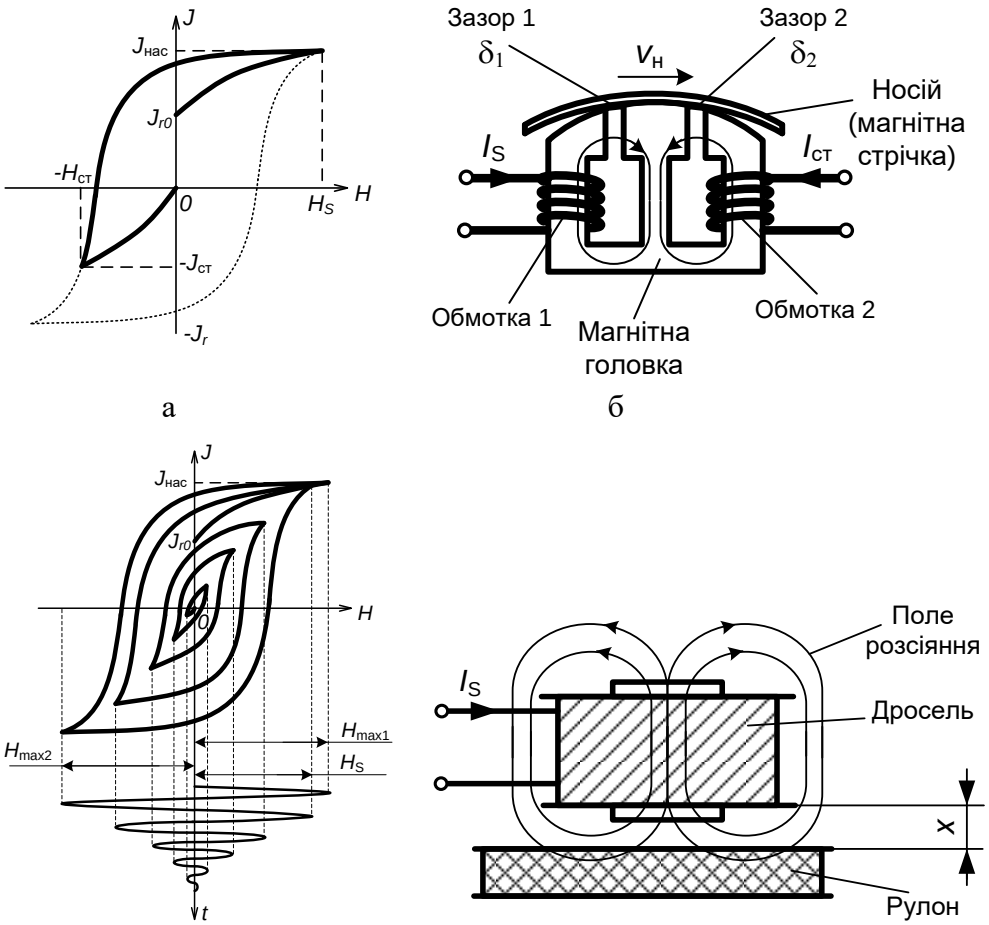


Рис. 6.17. Цикл перемагнічування магнітного матеріалу з повним розмагнічуванням (*а*), способи стирання магнітного запису головкою стирання з двома робочими зазорами (*б*), стирання змінним полем (в) та дроселем (*г*)

Розмагнічування носія головками стирання. Для стирання використовують тороїдальну головку, що відрізняється від головки запису значно більшим зазором $\delta_{ст} >> \delta_з$ і більшим значенням сили струму, що протікає у її обмотці.

Через обмотку головки пропускають змінний струм частотою $f_{ст}$. Поле розсіювання головки стирання, що діє на рухомий елемент носія, аналогічно полю високочастотного підмагнічування при відсутності сигналу запису. У такому полі, якщо частота його досить висока або період його зміни значно менше інтервалу часу проходження елемента носія через зону ефективного зазору, відбудеться перемагнічування носія зростаючим полем і потім розмагнічування спадаючим полем. Для забезпечення повного розмагнічування необхідно виконати дві умови:

1) амплітуда сили струму в головці стирання $I_{mст}$ повинна бути такою, щоб поле розсіювання, що створено у товщі носія біля центру зазору головки, доводило носій до насичення;

2) ширина зазору ї головки стирання $\delta_{ст}$ повинна забезпечити на даній швидкості носія $v_{0з}$ перемагнічування елемента носія (не менше 15 циклів згасного поля). Звідси випливає

$$\tau_{ст} \geq 30T_{ст}, \qquad \text{де } \tau_{ст} = \frac{\delta_{ст.еф}}{v_{0з}}; \quad T_{ст} = \frac{1}{f_{ст}}.$$

тоді $$\delta_{ст.еф} \geq \frac{30v_{0з}}{f_{ст}}.$$

Зазвичай у побутовому звукозапису як джерело струму застосовують генератор підмагнічування, при цьому $f_{ст} = f_{п}$.

Якщо $f_{п} = 40$ кГц, то для $v_{0з} = 9{,}53$ см/с або на більш високих швидкостях запису зазор стираючої головки повинен бути великим і відповідно більшою повинна бути амплітуда сили струму стирання, оскільки із збільшенням зазору зменшується амплітуда поля H_0 у зазорі головки.

Стираюча головка забезпечує досить високу якість стирання. Відношення рівня на виході підсилювача відтворення після стирання до номінального рівня сигналу становить близько 60 дБ. Для отримання стирання з кращими показниками застосовують головку стирання з двома зазорами, розташованими за напрямом руху носія. У цьому випадку отримують повторне стирання. В результаті відносний рівень стирання сягає близько -80 дБ.

6.4.2.4. Магнітна стрічка

Конструктивно магнітну стрічку складено з основи і нанесеного на неї з одного боку робочого шару. Як матеріал основи застосовують діацетатцелюлозу, триацетатцелюлозу, полівінілхлорид або поліетилентерефталат (лавсан). Товщина основи становить (12...38) мкм. Вибір матеріалу основи і товщини диктується вимогами на механічну міцність і реакцією на зміну параметрів навколишнього середовища (температура, вологість). За сукупністю цих властивостей в наш час кращою вважають поліетилентерефталатну стрічку. Потім, в порядку погіршення властивостей, йде ПВХ, три- і діацетілцелюлозна [21].

Як робочий шар використовують магнітний лак, виготовлений на основі порошків гамма-оксиду заліза γ-Fe_2O_3, фериту кобальту $CoFe_2O_4$, двоокису хрому CrO_2, чистого заліза Fe. Магнітний лак складено з немагнітної зв’язуючої речовини, в якій рівномірно розподілені магнітні частинки, що мають розміри від 0,07 мкм до 1 мкм. У сучасних стрічок магнітні частинки займають (30...45)% об’єму магнітного шару, що має товщину (6...16) мкм. Частинки порошку можуть бути представлені хаотично розташованими магнітиками. В разі відсутності зовнішніх магнітних полів частинки знаходяться в хаотичному стані, і їх власні магнітні поля взаємно компенсують одне одне (рис. 6.18,*а*).

Намагнічування робочого шару стрічки можливо під час дії на нього зовнішнього магнітного поля. При цьому магнітики будуть орієнтуватися в напрямку його впливу. Чим сильніше діє поле, тим більше буде орієнтованих частинок, тим сильніше намагнітиться робочий шар стрічки (рис. 6.18,*б*). *В* разі припинення впливу магнітного поля стрічка залишається намагніченою. Створення залишкової намагніченості стрічки називають процесом запису і здійснюють головки запису, що створює зовнішнє магнітне поле, яке впливає на стрічку. Щоб намагніченість стрічки була пропорційна поданому у головку запису сигналу без

спотворень, застосовують підмагнічування. Крім того, підмагнічування зменшує нелінійні спотворення на малих рівнях записуваного сигналу.

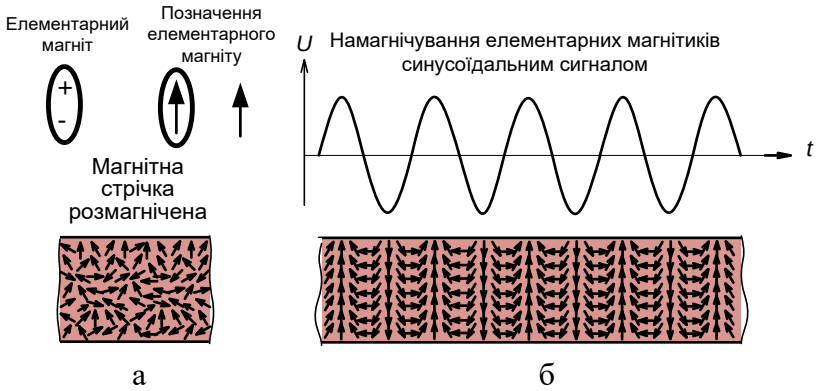


Рис. 6.18. Елементарні магнітики стрічки, *а* - хаотичний стан, *б* – орієнтований стан

Розрізняють підмагнічування постійним і змінним магнітним полем. У сучасних побутових магнітофонах використовують підмагнічування змінним струмом, з частотою, що в кілька разів перевищує максимальну частоту записуваного сигналу.

Магнітні стрічки характеризують рядом параметрів, що визначають якість звукозапису. До них відносять: чутливість, неоднорідність чутливості, оптимальне підмагнічування, частотна характеристика, нелінійні спотворення, рівень запису для заданих нелінійних спотворень, шум розмагніченого стрічки, шум намагніченою стрічки, шум в паузі запису, копір-ефект тощо.

Чутливість. Ця властивість, що характеризує відношення величини залишкового магнітного потоку, одержуваного при запису, до низькочастотного поля головки, створюваному струмом запису. Чим чутливість стрічки вище, тим менший рівень сигналу може бути записано.

Неоднорідність чутливості. Чутливість стрічки повинна бути досить однорідною як в межах одного рулону, так і у різних рулонів стрічки одного типу. Неоднорідність чутливості більше ± 1 дБ виявляють на слух як зміну гучності.

Неоднорідність чутливості створено неоднорідністю товщини робочого шару стрічки, нерівномірністю розподілу у ньому частинок порошку і неоднаковою якістю робочого шару. Значна неоднорідність ускладнює оптимізацію струму підмагнічування.

Оптимальне підмагнічування. Оптимальним називають таке підмагнічування, для якого чутливість магнітної стрічки максимальна. Величина оптимального підмагнічування залежить від частоти струму запису. Зазвичай його підбирають для сигналу частотою 400 Гц або 1000 Гц. Однак можливе оптимальне підмагнічування і для всього спектру частот записуваного сигналу. У цьому випадку застосовують систему динамічного підмагнічування.

Частотна характеристика стрічки залежить від її магнітних властивостей, еластичності, товщини, однорідності частинок порошку, якості поверхні робочого шару і від режиму підмагнічування. Вона характеризує чутливість стрічки відносно частоти записуваного сигналу.

Нелінійні спотворення, що спричинені магнітною стрічкою, є основною

частиною нелінійних спотворень, які виникають в каналі магнітного запису звуку. Величина спотворень залежить від магнітних властивостей порошку і товщини робочого шару, концентрації порошку у ньому, режиму запису. Чим більше товщина робочого шару і концентрація порошку в ньому, тим менше спотворення на заданому рівні запису.

Нелінійні спотворення визначено також величиною струму підмагнічування. У разі високочастотного підмагнічування менше оптимального робочий шар за товщиною намагнічується неоднорідно, і спотворення збільшуються. Збільшення спотворень під час підмагнічування більше оптимального спричинене обмеженням намагніченості ділянок стрічки піл час запису сигналу з великим рівнем.

Рівень запису для заданих нелінійних спотвореннях дозволяє визначати перевантажувальну здатність стрічки. Він вимірюється відносно стандартного максимального рівня запису.

Шум розмагніченої стрічки виникає через неоднорідність частинок порошку і нерівномірний розподіл їх в робочому шарі. Крім того, цей шум залежить від якості розмагнічування стрічки спеціальним розмагнічувальним пристроєм з просторово розподіленим і повільно спадаючим полем.

Відносний рівень шуму сучасних магнітних стрічках порівняно малий і становить -50...-65 дБ залежно від типу стрічки і швидкості запису і відтворення.

Шум стрічки, намагніченої постійним або змінним полем, можна розподілити на дві складові: структурний і контактний.

Структурний шум спричинено неоднорідністю робочого шару стрічки і має широкий спектр частот. Його визначає нерівномірність об'ємної концентрації частинок, відмінність магнітних властивостей частинок, порушення орієнтації голкоподібних частинок, зміна товщини робочого шару.

Контактний шум спричинено коливаннями стрічки біля робочих зазорів головок внаслідок шорсткості поверхонь магнітних головок і робочого шару стрічки, її жорсткості і нерівномірності тертя стрічки щодо направляючих. Цей шум більш помітний на низьких частотах.

Шумом паузи називають шум розмагніченої стрічки, що знаходилась під дією поля підмагнічування, створюваного головкою запису. При цьому шум стрічки зростає на 3...10 дБ в порівнянні з шумом попередньо розмагніченої стрічки.

Модуляційний шум виникає під час запису змінного сигналу, пропорційний локальній намагніченості стрічки, тобто модульований записаним сигналом.

Це пов'язано з тим, що під час дії високочастотного підмагнічування підвищується чутливість стрічки до слабких магнітних полів, і тому з'являється паразитна намагніченість стрічки через асиметрію форми струму підмагнічування, магнітного поля Землі, намагніченості деталей механізму протягування стрічки тощо. Рівень цього шуму може бути зменшено екрануванням записуючої головки, розмагнічуванням її осердя, екрану і інших деталей механізму протягування стрічки.

Копір-ефект виникає в магнітній стрічці, згорнутої в рулон, коли намагнічені ділянки стрічки намагнічують сусідні шари. В разі відтворення такого запису крім основного сигналу будуть чутні також сигнали-копії, що сприймають на слух, як відлуння. Ступінь копір-ефекту залежить від магнітних властивостей стрічки.

Сучасна техніка магнітного запису і якість магнітних стрічок дозволяють здійснювати чотиридоріжковий запис як на стрічках шириною 6,25 мм, так і на стрічках шириною 3,81 мм. Щоб послабити вплив запису однієї доріжки на іншу, між ними існує ділянка, вільна від запису. Розташування доріжок запису на стрічці шириною 6,25 мм наведено на рис. 6.19,*а*. Розташування доріжок на стрічках касетних магнітофонів відрізняється від розташування доріжок на стрічках котушкових магнітофонів. Це обумовлено конструкцією стираючої головки, яка при стиранні захоплює одночасно дві доріжки, розташовані на одній половині стрічки (рис. 6.19,*б*).

Для багатоканальних (багатодоріжкових) АМЗВ ширина магнітної стрічки становить (12,7; 25,4; 50,8) мм.

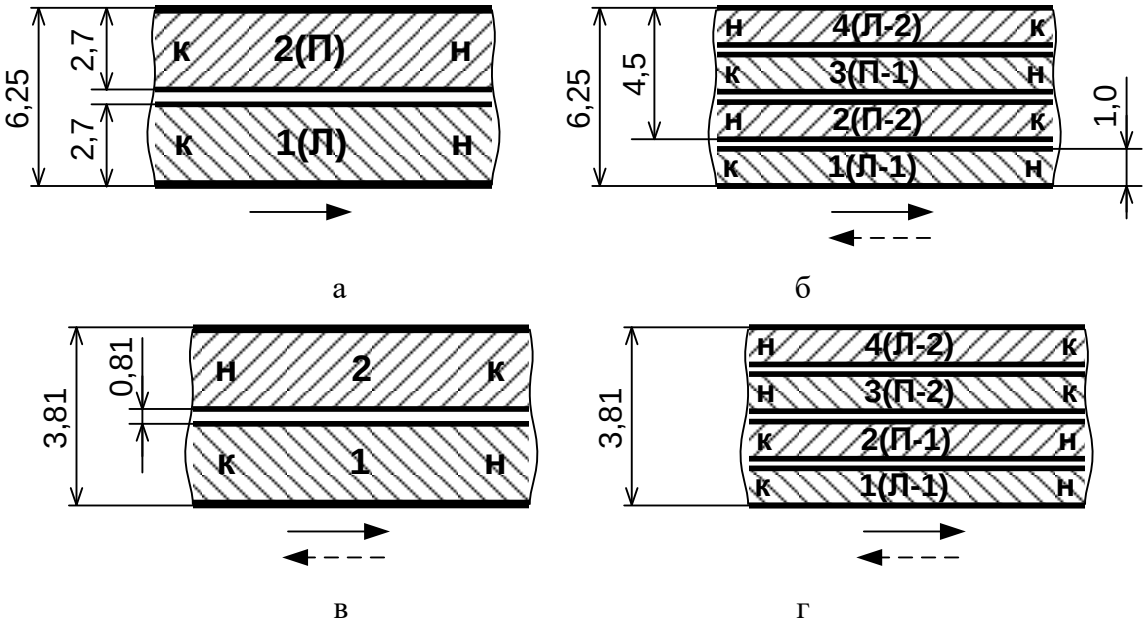
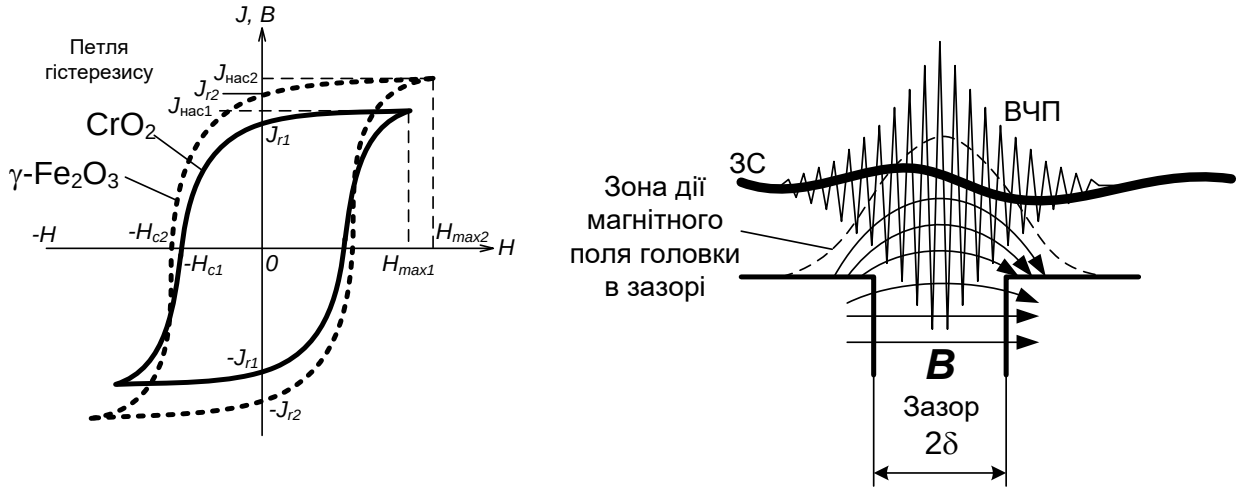


Рис. 6.19. Розташування доріжок стереофонічного запису на стрічці шириною 6,25 мм в разі одностороннього використання рулону (*а*) і двостороннього (*б*), на стрічці шириною 3,81 мм (*в*) для монофонічного запису і (*г*) стереофонічного запису

Підвищення коерцитивної сили H_c і коефіцієнта прямокутності феромагнітного шару стрічки покращує ВЧ складові запису (рис. 6.20).

Збільшене значення залишкової намагніченості стрічки призводить до зменшення нелінійних спотворень.

Зменшення розмірів частинок магнітного порошку призводить до поліпшення властивостей магнітної стрічки.



а б

Рис. 6.20. Форма петлі гістерезису для різних типів магнітних стрічок (*а*), запис сигналу з використанням ВЧП (*б*)

Остаточний магнітний потік намагніченої стрічки до насичення можна записати у вигляді [19]:

$$\Phi_{rs} = \frac{\mu_0 H_c bDd}{N_v} = \mu J_{rs} bDd,$$

де μ_0 - відносна магнітна проникність; H_c - коерцитивної сила; b - ширина доріжки запису; D - об'ємна концентрація магнітних матеріалів в робочому шарі, D = 0,25...0,45; d - товщина робочого шару; N_v - коефіцієнт внутрішнього розмагнічування; J_{rs} - залишкова намагніченість.

На рис. 6.21 наведено АЧХ магнітних стрічок різного виробника і різних типів для порівняння.

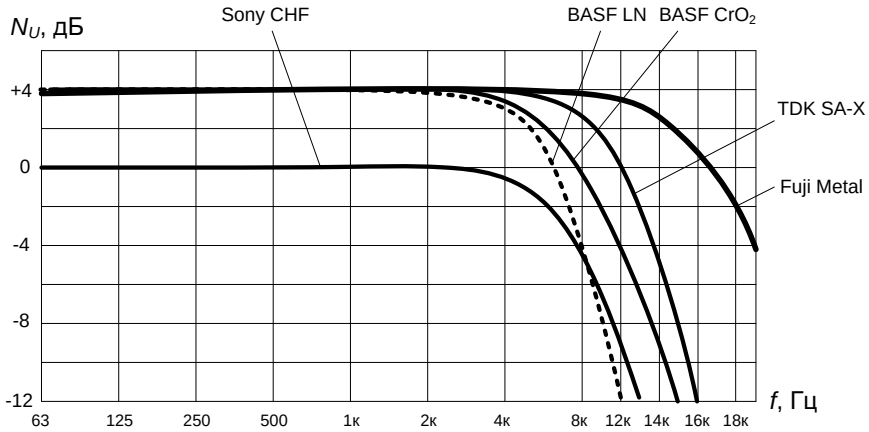


Рис. 6.21. Форма АЧХ магнітних стрічок різного виробника і різних типів

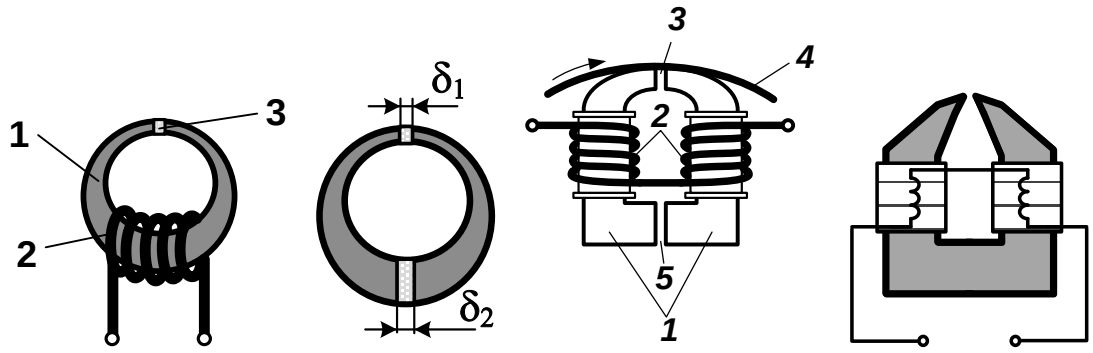
6.4.2.5. Магнітні головки

Магнітні головки (МГ) є електромагнітним (магнітоелектричними) перетворювачами енергії. Конструктивно їх складено (рис. 6.22,*а*) з осердя 1, що виконує функції концентратора магнітного поля, перетворювача 2 у вигляді індукційної котушки (обмотки) і робочого зазору 3, заповненого немагнітним матеріалом [19].

Осердя 1 складено з двох половинок, на яких розміщено обмотку 2. З осердям в області робочого зазору 3 контактує феромагнітний шар носія запису 4. У записуючих головок є додатковий зазор 5 (рис. 6.22,*в*). Робочий зазор служить для створення обмеженого за протяжністю магнітного поля під час запису і забезпечення зчеплення магнітного поля фонограми з осердям під час відтворення. Ширина робочого зазору головок запису і відтворення - від часток до декількох одиниць мікрометра. Додатковий зазор застосовують для збільшення магнітного опору осердя з метою запобігання його намагнічування кидкам струму у моменти комутації електричного каналу або головки. Ширина додаткового зазору - 30...40 мкм. Ширина робочого зазору стираючих головок - 70...200 мкм.

Залежно від вимог, що пред'являють до магнітних головок, їх розподіляють на записуючі, відтворюючі, універсальні і стираючі. Незважаючи на різне призначення головок, конструктивно вони мало чим відрізняються одна від одної, однак вимоги дещо різні.

Головки запису (робочий зазор δ=3…5 мкм) призначено для перетворення енергії низькочастотного сигналу в енергію магнітного поля, що впливає на робочий шар магнітної стрічки (МС). Так як магнітна проникність робочого зазору $\mu_з$ багато менше магнітної проникності осердя $\mu_{ос}$, то силові лінії магнітного потоку у цьому місці спучуються, створюючи вузьконаправлене магнітне поле, забезпечуючи намагнічування МС. Ступінь намагніченості робочого шару стрічки відповідає рівню записуваних звукових коливань.



а б в г

Рис. 6.22. Конструкції магнітних головок: узагальнена відтворення (*а*), узагальнена запису (*б*), реальна котушкового (*в*) та касетного (*г*) магнітофонів
1 – осердя (магнітопровід головки); 2 - обмотка; 3 - робочий зазор; 4 – магнітна стрічка; 5 – додатковий зазор

Конструктивно її виконано з двох півкілець, що утворюють осердя (магнітопровід) головки. У місці з'єднання півкілець утворено зазори. Один з них є робочою щілиною δ_1, ширина якої фіксують немагнітною прокладкою відповідної

товщини. Переріз в цій частині осердя суттєво зменшують для збільшення магнітного опору робочої щілини. З протилежного боку створюють задній зазор δ_2 (рис. 6.22,*б*).

В процесі запису змінний струм, що проходить у обмотці головки запису, створює магнітний потік у осерді, що намагнічує стрічку під час її руху над робочим зазорам головки. Це відбувається тому, що ділянка стрічки, яка дотична з робочим зазором головки, шунтує його.

Очевидно, чим щільніше контакт «магнітна стрічка - робочий зазор головки», тим більше напруженість поля, що намагнічує, а, відповідно, і залишкова намагніченість стрічки.

Значення залишкової намагніченості залежить також і від рівня сигналу запису. Крім, того, комутаційні викиди, які спільно з змінами сили струму під час включення «Запуск» здатні викликати залишкову намагніченість осердя головки, підвищуючи рівень шумів в паузі. Введення в осердя головки запису додаткового заднього зазору значно зменшує ступінь цього явища. Це відбувається внаслідок збільшення загального опору магнітного кола.

Під час запису в обмотку головки запису одночасно з струмом записуваного сигналу подають струм підмагнічування, тому робоче поле є сумою полів обох струмів. У магнітофонах побутового призначення застосовують високочастотне підмагнічування, що дозволяє отримати залишкову намагніченість стрічки, пропорційну струму запису. Застосування підмагнічування зводить залишкову намагніченість стрічки в паузах до нуля, що суттєво знижує шуми в паузах. Крім того, зменшуються і нелінійні спотворення записаного сигналу.

Одним з основних параметрів головки запису є її чутливість. Її визначають відношенням середньої напруженості поля в робочому зазорі головки до струму через її обмотку. Слід зазначити, що збільшення ширини робочого зазору призводить як до збільшення чутливості головки, так і до погіршення її частотної характеристики.

Головки відтворення (робочий зазор δ=(0,5…2) мкм) забезпечують зворотне перетворення. Вони зміну намагніченості робочого шару МС, що рухається повз робочий зазор, перетворюють в коливання струму звукової частоти.

Головна вимога до цих головок - мінімальні втрати на перетворення [22].

Основними параметрами відтворюючої головки є віддача і частотна характеристика.

Віддачею відтворюючої головки називають напругу, що створює головка в режимі холостого ходу у разі відтворення запису максимального рівня. Величина віддачі залежить від магнітних опорів осердя і робочого зазору. Чим менше магнітний опір осердя, тим більше віддача головки. З цією метою осердя головки виготовляють з матеріалу з великою магнітною проникністю і без заднього зазору.

На віддачу головки крім магнітного опору впливають хвильові втрати, що визначено довжиною хвилі записаного сигналу і які можна розподілити на щілинні, контактні та шарові. Через них магнітний потік у головці завжди менше залишкового магнітного потоку стрічки.

Значення ***щілинних втрат*** залежить від ширини робочого зазору головки. Чим менше ширина його, тим краще віддача головки в області верхніх частот.

Важливо зазначити, що сигнали з довжиною хвилі, що дорівнює ширині робочого зазору, не відтворюються, оскільки різниця магнітних потенціалів між краями зазору дорівнює нулю. Тому у магнітофонах застосовують відтворюючі головки, ширина робочого зазору яких менше мінімальної довжини хвилі робочого діапазону.

Таким чином, для підвищення віддачі в області верхніх частот робочий зазор головки відтворення повинен бути досить вузьким. Однак в разі дуже вузького робочого зазору зменшується віддача головки в області середніх і особливо нижніх частот. Крім того, такий зазор важко виконати з технологічних причин. Тому ширину робочого зазору вибирають так, щоб віддача головки в області верхніх частот мала спад не більше ніж на 6 дБ.

Контактні втрати виникають у результаті втрати контакту головки з магнітною стрічкою. Якщо стрічка не повністю притиснута до робочого зазору, то не весь залишковий потік доріжки замикається через осердя головки. Частина потоку замикається в просторі між стрічкою і головкою і виявляється втраченою. В області верхніх частот це найбільш суттєво.

На величину контактних втрат впливає стан поверхонь стрічки і робочої частини головки. З метою зменшення зазначених втрат поверхні стрічки і головки повинні бути полірованими.

Шарові втрати мають ту ж природу, що і контактні. Уявімо собі, що робочий шар стрічки має кінцеву товщину і розподілений на велике число тонких елементарних шарів. Кожен такий шар віддалений на деяку відстань від головки і створює в осерді магнітний потік. Величина цього потоку для кожного конкретного значення довжини хвилі запису залежить від відстані елементарного шару до робочої поверхні головки. Чим більша ця відстань, тим менше магнітний потік і менша віддача головки. Таким чином, на верхніх частотах, коли відстань від шару до головки стає такою ж, як довжина хвилі запису, будуть виникати контактні втрати. Очевидно, що чим товще робочий шар стрічки, тим більше шарові втрати, що зменшують віддачу в області верхніх частот.

Втрати у відтворювальній головці впливають на амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) головки в області верхніх частот, зменшують віддачу.

ЕРС головок відтворення описують виразом [20]

$$e = 2\pi f_{\text{в}} w d \Phi_{0\text{пит}} k_{\delta} k_a k_d \sin(2\pi ft),$$

де f - частота сигналу; w - число витків обмотки; $\Phi_{0\text{пит}}$ - питома магнітний потік на стрічці; d - товщина робочого шару; k_{δ} - коефіцієнт щілинних втрат; k_a - коефіцієнт контактних втрат; k_d - коефіцієнт шарових втрат.

ЕРС підсилювача відтворення має бути обернено пропорційно ЕРС головки відтворення (рис. 6.23).

Головки стирання (робочий зазор δ=(70…200) мкм) реалізують основну перевагу магнітного запису звуку, а саме - багаторазовість запису. У функції стираючої головки входять стирання старого запису і розмагнічування стрічки. Вони перетворюють коливання струму високої частоти, що підводять від

генератора стирання і підмагнічування, у змінне магнітне поле, яке при русі МС повз робочу поверхню головки спочатку намагнічує її майже до насичення, а потім розмагнічує до нуля.

За час проходження МС повз робочий зазор стираючої головки кожна її ділянка встигає намагнітитися і розмагнітитися кілька разів. Цим самим досягається майже повне розмагнічування (стирання) стрічки.

З цією метою у головку надходить струм від генератора стирання і підмагнічування (ГСП). Головка перетворює високочастотні коливання від ГСП в змінне магнітне поле біля робочого зазору. Частоту коливань ГСП вибирають такою, щоб за час проходження магнітної стрічки по робочій поверхні головки стрічка могла перемагнітитись декілька разів. У результаті цього залишкова намагніченість стрічки після виходу її з поля стираючої головки практично відсутня, тобто стрічку розмагнічено. Якість стирання залежить від двох основних умов: 1) повного видалення попередніх записів і 2) розмагнічування магнітної стрічки. Виконання останньої умови особливо важливо, оскільки вона забезпечує мінімальні залишкові шуми.

Універсальна головка здійснює кілька функцій (по черзі або за вибором). Наприклад, запис і відтворення або запис і стирання. У сучасних побутових магнітофонах універсальні головки виконують по черзі функції запису і відтворення.

Умови роботи головки в кожному режимі різні, тому вибір параметрів універсальної головки доводиться робити компромісним шляхом. При виборі параметрів універсальної головки вирішальним фактором є необхідність забезпечення оптимального режиму відтворення. Тому ширину робочого зазору виконують малою, а обмотку – з великим числом витків.

З метою зниження залишкової намагніченості осердя і зменшення рівня шумів в режимі запису в осерді головки роблять додатковий зазор шириною 60...100 мкм, хоча це зменшує віддачу головки в режимі відтворення.

Останнім часом в магнітофонах першої і вищої групи складності знаходять застосування комбіновані головки. Вони дозволяють одночасно здійснювати і запис, і відтворення, зберігаючи при цьому оптимальні властивості головок запису і відтворення.

Конструкція магнітних головок приблизно однакова. Відмінність між головками різного призначення полягає у виборі матеріалу і форми осердя, у різній кількості витків обмоток, в різній ширині робочого зазору і в наявності або відсутності додаткового заднього зазору [22].

Найбільшого поширення набули магнітні головки кільцевої системи (див. рис. 6.22) з осердям в формі тороїда. Для зменшення втрат на вихрові струми осердя набирають з окремих ізольованих одна від одної пластин товщиною 0,1...0,2 мм. Матеріалами для пластин осердя обирають пермалой (зносостійкість 0,1 мкм/год.), ферит (зносостійкість 0,001 мкм/год.), сендаст (зносостійкість 0,005 мкм/год.) і аморфний метал.

Пермалой легко обробляти, $\mu \geq 20000$, мала зносостійкість, великі втрати на вихрові струми. Сендаст – $\mu \geq 20000$, хороша зносостійкість, малі спотворення. Ферит – $\mu \geq 20000$, малі вихрові струми, крихкий, складно виготовити малих

розмірів зазори.

Найкращим матеріалом для головок запису, відтворюючих та універсальних за всіма магнітними параметрами є сендаст. Завдяки високій магнітній проникності у сендасті легко забезпечити ширину робочого зазору 0,8...1,2 мкм з правильною геометрією. Маючи високі електричні параметри, головки з сендасту більш зносостійкі. Ресурс роботи головок з сендасту становить понад 5000 год.

На другому місці – монокристалічні ферити. Головки з монокристала фериту зі скляним покриттям типу Glass X (або GX) розроблені і виготовлені японською фірмою АКАІ. Магнітні властивості монокристалічного фериту краще, ніж у найдосконаліших нікелевих головок. Вакуумна ж технологія дозволила забезпечити ширину робочого зазору до 1 мкм. Застосування скляного покриття збільшило робочий ресурс, за даними фірми АКАІ, до 150000 годин.

До недоліків головок типу GX слід віднести: порівняно великі контактні втрати, що вимагає великих коефіцієнтів підсилення від підсилювачів запису і відтворення; велику трудомісткість у виготовленні, що визначає їх високу вартість.

Через низьку індукцію насичення, погану технологічність і погіршення властивостей у процесі експлуатації (викришування в зоні зазору, поява мікротріщин в осерді) найменш придатні звичайні ферити.

Для стираючих головок бажано застосування комбінованого осердя. Полюсні наконечники таких головок виконують з тонких пластин сендасту або твердого пермалою в робочій зоні, а іншу частина осердя - з марганець-цинкового фериту. Однак в теперішній час осердя головок стирання виконують з фериту.

Як матеріал для осердь записуючих, відтворюючих і універсальних головок успішно застосовують також аморфний метал.

За кількістю одночасно записуючих, відтворюючих або стираючих доріжок головки можуть бути однодоріжковими і багатодоріжковими. Багатодоріжкові головки в побутових магнітофонах не застосовують. Однодоріжкові головки застосовують для монофонічного запису і відтворення, а дводоріжкові - для стереозапису. Стереофонічні головки мають у одному корпусі дві незалежні головки, розташовані таким чином, щоб створювати на стрічці дві паралельні смужки запису.

6.4.2.6. Корекція амплітудно-частотної характеристики

Якість магнітного запису і відтворення звуку визначено якістю всіх елементів, що входять в пристрій [22].

Амплітудно-частотні спотворення магнітного запису залежать від режимів запису, властивостей стрічок, головок і особливостей їх взаємодії. Характерний вигляд АЧХ на виході головки відтворення зображений на рис. 6.23 кривою 1. Крива 2 зображує необхідну АЧХ корекції, а крива 3 - ідеалізовану АЧХ наскрізного каналу запису-відтворення.

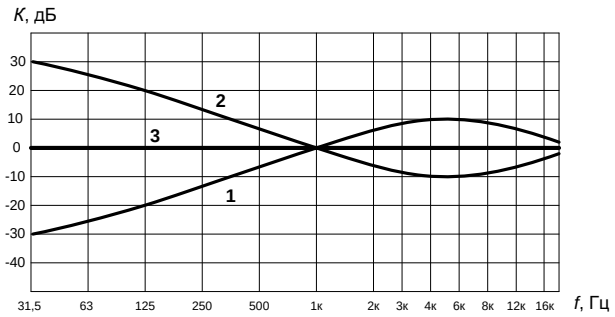


Рис. 6.23. Корекція АЧХ відтворення головки і підсилювача відтворення

Схему розподілу спотворень і корекції за ланками наскрізного каналу наведено на рис. 6.24. У разі розподілу корекції за ланками каналу враховують частотні властивості записуваних сигналів [22].

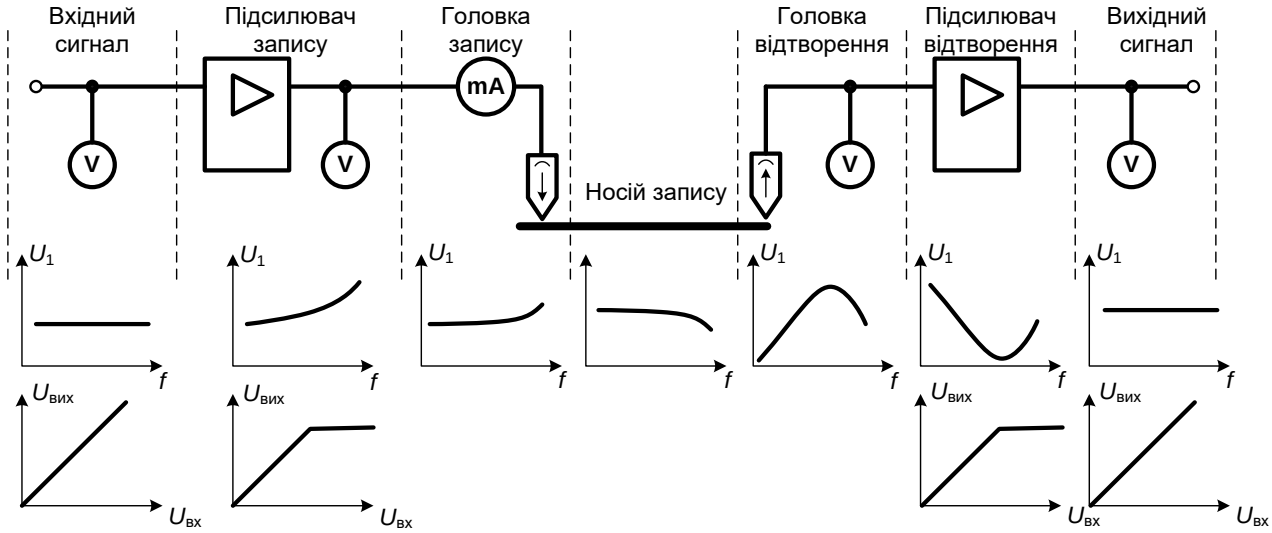


Рис. 6.24. Схема розподілу спотворень і корекцій за ланками наскрізного каналу магнітного запису і відтворення

Розподіл звукового тиску у спектрах більшості музичних інструментів і людського голосу такий, що максимуми лежать в області (200...1500) Гц.

Для поліпшення відношення сигнал/шум необхідно записувати сигнал з постійним рівнем у усьому діапазоні частот. Тому бажано ввести підйом АЧХ в підсилювачі запису (ПЗ) і шляхом цих передспотворень перерозподілити енергію сигналу за спектром.

Практично в ПЗ збільшують коефіцієнт передавання тільки на верхніх частотах. Для уникнення збільшення нелінійних спотворень внаслідок перемодуляції стрічки підйом АЧХ не повинен перевищувати (12...14) дБ. При цьому рівні сигналу на верхніх частот трохи перевищать рівні сигналу на середніх частотах. Відсутню частину корекції верхніх частот здійснюють в підсилювачі відтворення (ПВ). Частотна характеристика каналу змінюється в міру зносу головок і залежить від типу носія запису. Тому ступінь корекції в ПЗ і ПВ необхідно регулювати.

Коефіцієнт передавання у ПЗ на нижніх частотах не збільшують (іноді вводять незначний підйом АЧХ - не більше (2...3) дБ). Справа у тому, що коефіцієнт

гармонік носія запису за постійної амплітуди струму запису $I_з$ збільшується зі зменшенням частоти. Крім того, у спектрі деяких музичних інструментів (великий барабан, литаври) найбільші звукові тиски мають місце саме на нижніх частотах. Щоб не допустити зростання нелінійних спотворень на НЧ корекцію на нижніх частотах у професійній апаратурі здійснюють практично тільки в ПВ.

Опір головки запису ГЗ має в основному індуктивний характер. Для отримання в її обмотці незмінної амплітуди струму на всіх частотах необхідно, щоб напруга на затискачах її обмотки збільшувалася з частотою (крива 2). Для корекції необхідно додатковий підйом АЧХ (крива 2'). Частотна характеристика струму запису $I_з$ матиме у цьому випадку форму кривої 3. Залежність ЕРС в головці відтворення ГВ буде змінюватися з частотою (крива 5). Необхідна АЧХ підсилювача відтворення ПВ має вигляд кривої 6, а результуюча АЧХ - вид горизонтальної прямої 7 (рис. 6.24).

У побутових магнітофонах з універсальним підсилювачем АЧХ, необхідну для запису або відтворення, отримують перемиканням коригувальних ланок в самому підсилювачі або підключенням універсальної головки до підсилювача через частотний коректор.

Щоб фонограми, записані на одному магнітофоні, можна було без спотворень відтворювати на іншому магнітофоні, АЧХ каналів запису і відтворення стандартизують. Номінальну АЧХ каналу відтворення задають непрямим способом як характеристику, за якою вихідна напруга магнітофона у разі відтворення стандартної фонограми (вимірювальної стрічки) не залежить від частоти. Регулювання АЧХ каналу запису виконують таким чином, щоб вихідна напруга каналу відтворення залишалась під час зміни частот вхідної напруги за діапазоном частот в межах поля допусків, зазначених для цього магнітофона.

6.4.2.7. Стрічкопротягувальний механізм

Основне призначення механізму протягування стрічки (МПС) або стрічкопротягувального механізму (СПМ) полягає в переміщенні магнітної стрічки біля магнітних головок з постійною швидкістю у режимах запису і відтворення. При цьому механізм повинен забезпечити рівномірний натяг стрічки і оптимальний притиск її до головок. Крім режимів запису і відтворення СПМ повинен забезпечувати прискорене перемотування стрічки вперед-назад.

За конструкцією СПМ бувають компланарними, коаксіальними і кільцевими [22].

У побутових магнітофонах застосовують СПМ компланарного типу, елементи якого розташовані в одній площині. Розрізняють дві кінематичні схеми компланарних СПМ: типу «відкритої петлі» і типу «закритої петлі».

Кінематичну схему компланарного механізму типу «відкритої петлі» наведено на рис. 6.25.

Під час роботи в режимах запису і відтворення стрічка з подавального вузла (ПОВ) змотується і приймається приймальним вузлом (ПРВ). Переміщує стрічку електродвигун, на валу якого розташовано ведучий вал 9, до якого стрічку притискає гумовий притискний ролик 10. Щоб стрічка не совалася вертикально,

застосовують напрямні ролики і стійки 1, 6, 7, 14. Магнітні головки розташовують між напрямними стійками в наступному порядку за рухом стрічки: стираюча, записуюча і відтворююча.

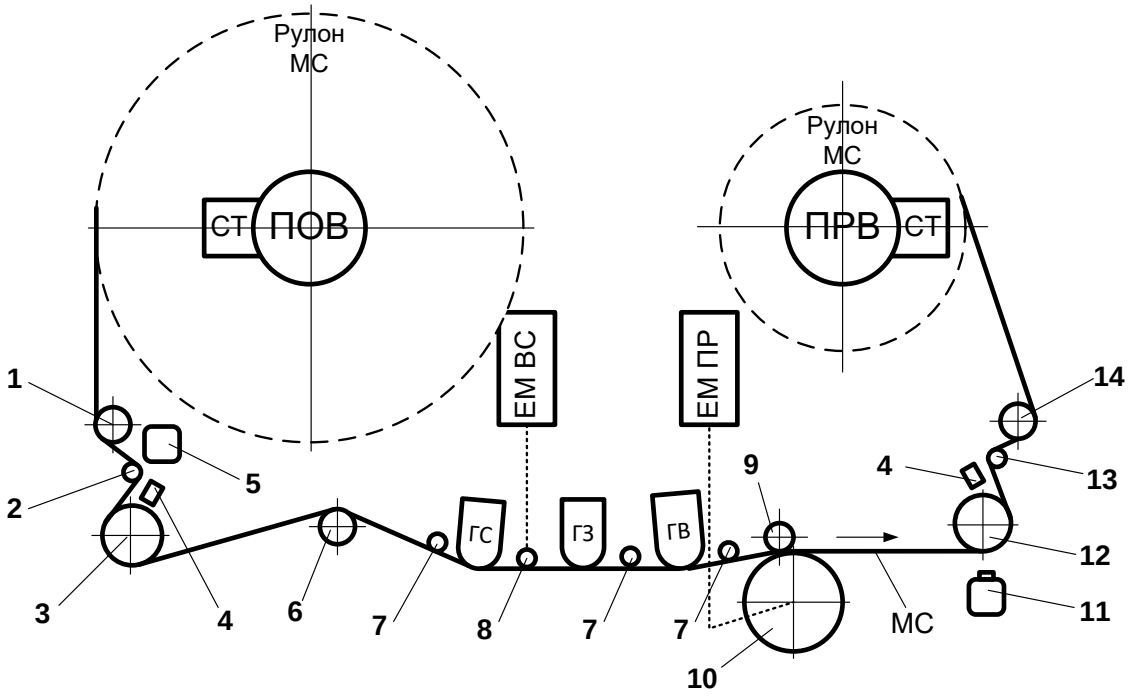


Рис. 6.25. СПМ магнітофона компланарного типу

ГС, ГЗ, ГВ – головка стирання, запису, відтворення
ЕМ ВС – електромагніт відведення стрічки
ЕМ ПР – електромагніт прижимного ролика

ПРВ - приймальний вузол
ПОВ - подавальний вузол
СТ – система тормозу
МС – магнітна стрічка

1 – ролик лівий;
2 – поводок датчика лівого;
3 – ролик обвідний лівий;
4 – вимикач датчика обривання стрічки;
5 – датчик натягування стрічки;
6 – ролик центральний;
7 - стійка направляюча;
8 – шпилька відведення стрічки;
9 – ведучий вал;
10 – прижимний ролик;
11 – датчик лічильника стрічки;
12 – ролик обвідний правий;
13 – поводок датчика правого;
14 – ролик правий;

У механізмі типу «відкритої петлі» є серйозний недолік - нестабільність обертання подавального і приймального вузлів впливає на рівномірності руху стрічки. Від цього недоліку вільний механізм типу «закритої петлі», наприклад, у формі Ω. У цій конструкції, як і в попередній, є подавальний ПОВ і приймальний ПРВ вузли. Стрічку притискають до ведучого валу двома притискними роликами з двох сторін, створюючи петлю. Стабільність швидкості запису і відтворення залежить від стабільності руху стрічки всередині петлі, де розташовані магнітні головки. При цьому вплив приймального і подавального вузлів на швидкість стрічки всередині петлі послаблено притискними роликами. Стрічкопротягувальні механізми типу «закритої петлі», незважаючи на очевидну перевагу, поширення в побутових магнітофонах не отримали з конструктивних міркувань.

За кількістю застосовуваних електродвигунів СПМ можуть бути тридвигунні і однодвигунні, в деяких випадках для касетних магнітофонів можуть бути

дводвигунні СПМ.

У тридвигунного механізму крім ведучого двигуна є двигуни подавального і приймального вузлів. Під час запису або відтворення двигун приймального вузла обертається в ту ж сторону, що і ведучий, забезпечуючи тим самим намотування стрічки з потрібною щільністю. Двигун подавального вузла обертається в зворотну сторону, забезпечуючи заданий натяг стрічки. Для цього на нього подають зменшену напругу.

У режимі швидкого перемотування вперед на двигун приймального вузла подають повну напругу, і він здійснює намотування стрічки на приймальний вузол. На двигун подавального вузла підключено неповну напругу, забезпечуючи тим самим щільність намотування. У режимі перемотування назад повну напругу подають на двигун подавального вузла і неповну - на двигун приймального.

Під час прискореного перемотування як вперед, так і назад ведучий двигун відключають, а магнітні головки відводять від стрічки.

Механізм однодвигунного СПМ приводить у рух один електродвигун. Обертання всіх рухомих частин механізму в різних режимах роботи здійснюють через додаткові пасики та ролики, які відповідним чином забезпечують необхідний напрямок обертання одних вузлів, гальмування інших вузлів та натяг стрічки. За певного положення цих пасиків і роликів відбувається обертання елементів механізму СПМ (ведучого валу, приймального і подавального вузлів) у необхідному напрямку.

Стрічкопротягувальні механізми касетних магнітофонів будують за компланарними схемами [21].

При переході СПМ в положення «Робочий хід» магнітні головки і прогумований притискний ролик входять у контакт з магнітною стрічкою. Сталість швидкості переміщення стрічки забезпечено системою ведучий вал-притискний ролик. Підмотку стрічки здійснює приймальний вузол, а необхідний натяг стрічки забезпечено фрикційною муфтою подавального вузла, ведучий шків якого обертається у зворотну сторону.

У режимах перемоток вперед і назад магнітні головки і притискний ролик відводять від магнітної стрічки. В разі зупинки і переходу з одного режиму роботи в інший рух стрічки гальмує фрикційні муфти вузлів.

Як було зазначено вище, основним завданням СПМ є переміщення стрічки із заданою швидкістю. Однак дійсна швидкість дещо відрізняється від номінальної, що призводить до виникнення спотворень, що вносяться у фонограму. У разі повільної зміни швидкості відбувається зміна тональності звуку, за швидкої - виникає частотно-амплітудна модуляція і, як наслідок, частотні і нелінійні спотворення. Тому до стрічкопротягувальних механізмів висувають жорсткі вимоги (до стабільності швидкості переміщення стрічки близько зазорів магнітних головок).

Основними параметрами, що характеризують СПМ, є: середня швидкість стрічки; відхилення середньої швидкості від номінальної; дрейф швидкості; коливання швидкості; коефіцієнт детонації.

Середня швидкість стрічки - шлях, який проходить стрічка за одиницю часу. Значення середньої швидкості стандартизовано. У побутових котушкових

магнітофонах застосовують в основному такі швидкості: (19,05; 9,53 і 4,76) см/с, в касетних - 4,76 см/с і іноді 2,38 см/с.

Відхилення середньої швидкості від номінальної оцінюють у відсотках і воно залежить від точності виготовлення деталей СПМ, які задають швидкість руху стрічки. Воно призводить до того, що під час запису і відтворення на різних апаратах час відтворення відрізняється від часу запису, а також спотворюється тембр звукових сигналів. Припустиме відхилення середньої швидкості від номінальної не повинно перевищувати часток відсотка.

Дрейф швидкості - випадкова зміна середньої швидкості, що оцінюють у відсотках від номінального значення. Припустиме значення дрейфу швидкості залежно від групи складності магнітофона лежить в межах (0,5...3)%. Дрейф швидкості викликають: прослизання стрічки; зміни живлення електродвигунів; нестабільність частоти мережі живлення; «витягування» стрічки тощо.

Коливання швидкості - відхилення швидкості від середнього значення. Виникають через неідеальність виготовлення обертових елементів механізму протягування стрічки, наявності у них ексцентриситетів і еліптичності. Ці коливання мають періодичний характер, частота їх співпадає або кратна частоті обертання елементів стрічкопротягувального механізму.

Іншим джерелом коливань швидкості є поздовжні коливання стрічки, викликані випадковою зміною коефіцієнта тертя стрічки на головках і нерухомих напрямних стійках. Такі зміни пов'язано з наявністю шорсткості робочих поверхонь стрічок, головок і нерухомих частин механізму протягування стрічки, якими переміщується стрічка.

Під час звукозапису коливання швидкості призводять до змін висоти тону, що називають детонацією. Оцінюють детонацію коефіцієнтом детонації.

Коефіцієнт детонації обчислюють у відсотках як відношення амплітуди коливання швидкості руху стрічки до номінального значення. Для побутових магнітофонів коефіцієнт детонації повинен бути не більше ± (0,04...0,7)%.

На слух детонація сприймають як спотворення звуку. Детонація з частотою (2...10) Гц сприймають як періодичну зміна висоти тону. Таке явище називають «плаванням» звуку. Коливання швидкості з частотою (10...25) Гц сприймають як тремтіння звуку, а вище 25 Гц - як хрипліть.

6.4.2.8. Функціональна схема магнітофона

Узагальнено структуру апарата магнітного запису-відтворення може бути представлена трьома блоками – канал запису, канал відтворення та стрічкопротягувальний механізм. Функціональну схему магнітофона наведено на рис. 6.26.

Канал запису забезпечує всі необхідні перетворення електричного сигналу і формує струм запису для створення необхідного магнітного поля у головці запису.

У канал запису входять: узгоджувальний вхідний підсилювач, регулятор рівня запису, за необхідністю шумознижувач, підсилювач запису та безпосередньо головка запису. Також в канал запису входить генератор стирання й підмагнічування (ГСП) та головка стирання (рис. 6.26).

Регулятор рівня запису призначено для створення рівня напруги, відповідного

оптимальному струму запису на магнітну стрічку.

Шумознижувач в каналі запису являє собою компресор динамічного діапазону компандерної системи шумозниження.

Підсилювач запису призначено для підсилення сигналів та корекції АЧХ сигналу запису у разі роботи з навантаженням, що є головкою запису з індуктивними властивостями. Підсилювач запису складено з коригувального підсилювача запису, який забезпечує високочастотну корекцію і кінцевого підсилювача запису, що формує струм запису.

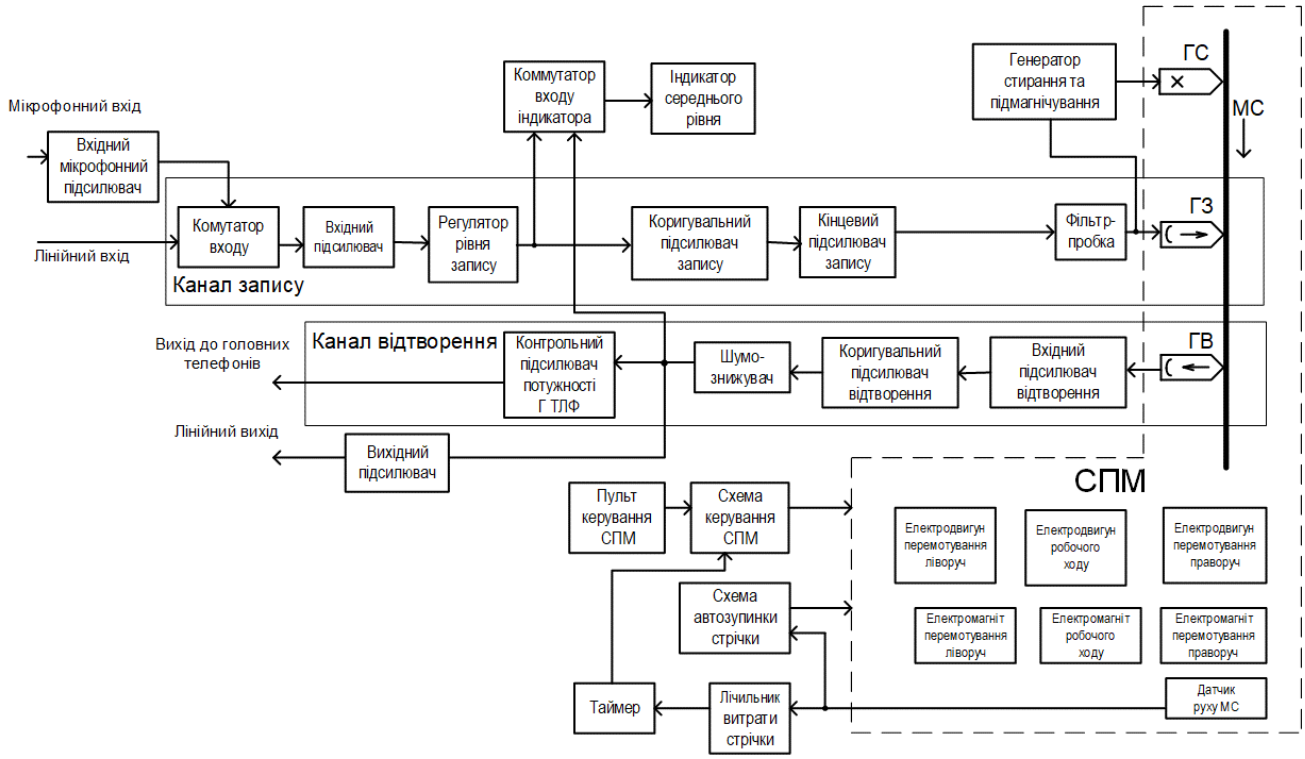


Рис. 6.26. Функціональна схема аналогового магнітофона

ГСП формує сигнал ВЧ підмагнічування (ВЧП) і сигнал стирання.

Для запобігання проходження струму ВЧП в канал запису використовують фільтр-пробку.

Канал відтворення складено з підсилювача відтворення, який містить вхідний підсилювач для попереднього підсилення сигналу головки (0,1; 0,5 мВ) та коригувальний підсилювач, який забезпечує зворотно-пропорційну АЧХ ЕРС головки відтворення (рис. 6.26).

В канал відтворення входить система шумозниження, яка може бути незалежним шумознижувачем або експандером компандерної системи, компресор якої встановлено в підсилювачі запису.

В канал відтворення також входить контрольний підсилювач потужності для прослуховування фонограм через навушники або гучномовці, а також узгоджувальний вихідний підсилювач лінійного виходу магнітофона.

Якщо магнітофон передбачає запис з мікрофона, то використовують мікрофонний підсилювач з великим коефіцієнтом підсилення, оскільки вихідна

напруга мікрофона близько 1 мВ.

Загальним для каналу запису і каналу відтворення є індикатор рівня сигналу, який може комутувати залежно від режиму роботи та відображати рівень сигналу запису або сигналу відтворення. Якщо магнітофон має наскрізний канал, незалежну головку запису і відтворення, контроль може вестися як вхідного, так і вихідного записаного сигналу.

Для рівномірного переміщення стрічки уздовж магнітних головок використовують механізм протягування стрічки СПМ – стрічкопротягувальний механізм (синоніми: МТС - механізм транспортування стрічки, МТН - механізм транспортування носія).

СПМ складено з електродвигунів перемотування ліворуч, праворуч та робочого ходу, електромагнітів підключення відповідного режиму роботи та датчик руху магнітної стрічки.

Управління СПМ здійснює схема керування через пульт керування. Часто в СПМ передбачено лічильник довжини (часу запису/відтворення) стрічки з таймером або з умовними одиницями, схема автоматичної зупинки механізму в разі обриву або закінчення стрічки.

6.4.2.9. Функціональні параметри і показники

Наведемо приклад функціональних можливостей та технічних параметрів студійного магнітофона.

Студійний стереофонічний магнітофон забезпечує виконання наступних функцій (функціональні параметри і показники):

а) запис з лінії;

б) відтворення на лінію;

в) стирання раніше записаного сигналу на стрічці;

г) прослуховування сигналу на вході і виході з стереофонічних головних телефонів і зовнішніх контрольних агрегатів;

д) прискорене, зі стабілізацією за швидкістю перемотування стрічки в обох напрямках з автоматичним відведенням стрічки від магнітних головок;

є) регульоване, зі стабілізацією за швидкістю перемотування стрічки в обох напрямках з можливістю прослуховування фонограм;

ж) перехід з режимів відтворення і запису на режим перемотування і можливість зворотного переходу без підключення режиму "Стоп";

з) автоматичну зупинку після закінчення стрічки або в разі обриву стрічки;

і) автоматичне перемотування або зупинку стрічки після закінчення фонограми з можливістю відключення цих функцій;

к) продовження відтворення у разі обриву стрічки праворуч від ведучого вузла і зупинку при цьому приймального вузла;

л) можливість монтажу фонограм без розрізання стрічки і з маркуванням і розрізанням стрічки;

м) контроль тривалості звучання фонограм під час відтворення і монтажі за допомогою лічильника часу внутрішнього на апараті і зовнішнього;

н) управління з пульта дистанційного керування у всіх режимах і з мікшера в режимі відтворення;

о) можливість управління режимами роботи магнітофона і скидання показань внутрішнього і зовнішнього лічильника у різних варіантах, що обирають неоперативним перемикачем;

п) реверсування подавального двигуна;

р) автоматичне підключення основної, попередньо обраної, швидкості стрічки в разі підключення електроживлення;

с) магнітофон забезпечує безперервну цілодобову роботу;

ч) на всіх режимах магнітофон забезпечує рівне і щільне намотування стрічки на котушки;

Основні технічні параметри:

1. Швидкість стрічки в режимі запису-відтворення 38,1 см/с і 19,05 см/с;

2. Відхилення швидкості стрічки від номінального значення при швидкості 38,1 см/с і 19,05 см/с не більше ± 0,1%;

3. Коефіцієнт детонації: при швидкості 38,1 см/с не більше ± 0,04%, при швидкості 19,05 см/с не більше ± 0,06%;

4. Носій запису - магнітна стрічка шириною 6,3 мм з номінальним рівнем запису 510 нВб/м;

5. Намотування стрічки проводиться робочим шаром всередину з довжиною стрічки до 1000 м для стрічок товщиною 55 мкм;

6. Тривалість пуску магнітофона у режимах запису і відтворення при швидкості 38,1 см / с, 19,05 см / с не більше 0,8 с;

7. Тривалість перемотування рулону стрічки довжиною 1000 м не більше 160 с, час гальмування після перемотування не більше 6 с;

8. Вхід магнітофона симетричний. Повний електричний опір входу в робочому діапазоні частот не менше 7000 Ом;

9. Вихід магнітофона симетричний. Повний електричний опір виходу в робочому діапазоні частот не більше 30 Ом;

10. Вихідна напруга при номінальному рівні запису на активному навантаженні 200 Ом дорівнює 1,55 В. Запас щодо підсилення не менше 9 дБ на швидкості 38,1 і 19,05 см / с;

11. Робочий діапазон частот на швидкості 38,1 см/с і 19,05 см/с від 31,5 Гц до 18000 Гц;

12. Поле допусків нерівномірності амплітудно-частотних характеристик каналів відтворення з вимірювальною стрічкою на швидкості 38,1 см/с і 19,05 см/с в діапазоні частот 63...8000 Гц не більше 1,5 дБ, а в іншій частині робочого діапазону не більше 3 дБ;

13. Відносний рівень завад у каналах відтворення не більше (-66) дБ на швидкості 38,1 см / с, не більше (-64 дБ) на швидкості 19,05 см / с;

14. Частота струму підмагнічування 210 ± 9 кГц. Частота струму стирання (70 ± 3) кГц;

15. Максимальна величина струму стирання не менше 80 мА;

16. Максимальна величина струму підмагнічування не менше 20 мА;

17. Мінімальний вхідний рівень, що забезпечує мінімальний рівень запису на частотах 315 Гц і 1000 Гц не більше 0,775 В. Максимальний вхідний рівень не менше 6,2 В. Номінальний вхідний рівень 1,55 В;

18. Поле допусків амплітудно-частотних характеристик каналів запису-відтворення щодо амплітудно-частотних характеристик вимірювальної стрічки на швидкості 33,1 см / с і 19,05 см / с в діапазоні 63...8000 Гц не більше 1,0 дБ, а в іншій частині робочих діапазонів не більше 3 дБ;

19. Запас амплітудно-частотної корекції в підсилювачах запису і відтворення на верхній межі робочого діапазону частот не менше 5 дБ;

20. Відносний рівень завад в каналах запису і відтворення не більше (-62) дБ на швидкості 38,1 см / с, не більше (-60) дБ на швидкості 19,05 см / с;

21. Відносний рівень проникнення ВЧ сигналу підмагнічування на вихід магнітофона не більше (-62) дБ;

22. Коефіцієнт гармонік в каналі запису-відтворення на частоті 1000 Гц для швидкості 38,1 см / с і 19,05 см / с не більше 1,5%;

23. Коефіцієнт різницевого тону другого порядку в каналах запису-відтворення для швидкості 38,1 см / с і 19,05 см / с на частотах сигналів 8000 Гц і 8250 Гц і різницевій частоті 250 Гц не більше 1%;

24. Коефіцієнт гармонік підсилювачів відтворення для вихідної напруги 1,55 В на частотах 315 Гц, 1000 Гц не більше 0,2%;

25. Відносний рівень стирання запису сигналу частотою 1000 Гц на швидкості 38,1 см / с і 19,05 см / с не більше мінус 77 дБ;

26. Відносний рівень проникнення з одного стереоканалу в інший в разі запису-відтворення на швидкості 38,1 см / с і 19,05 см / с сигналу частотою 31,5 Гц не більше мінус 25 дБ, на частотах 250 Гц і 4000 Гц не більше (-40) дБ, на частоті 18000 Гц не більше (-30) дБ;

27. Поле допусків на неузгодженість АЧХ стереоканалів для каналів відтворення по вимірювальній стрічці і для каналів запису-відтворення для швидкості 38,1 см / с і 19,05 см / с в діапазоні частот 63...8000 Гц не більше 1,5 дБ, а в іншій частині не більше 3 дБ;

28. Фазовий зсув між сигналами стереоканалів для швидкості 38,1 см/с і 19,05 см / с сигналу частотою 31,5 Гц не більше 20 град;

29. Похибка показання лічильника часу запису не більше ± 0,2%;

30. Електроживлення магнітофона здійснюють від однофазної мережі змінного струму частотою 50 Гц, напругою 230 В ± 10%;

31. Потужність, споживана магнітофоном від мережі, не більше 250 ВА;

32. Напруга (*U*) і напруженість поля (*E*) радіозавад, що створює магнітофоном, не перевищує нормативних величин;

33. Маса магнітофона не більше 115 кг;

34. Габарити магнітофона не більше 690 мм х 1050 мм х 490 мм;

35. Акустичний шум на середньогеометричних частотах октавних смуг, не більше: 63 Гц - 35 дБ; 125 Гц - 30 дБ; 250 Гц - 27 дБ; 500 Гц - 24 дБ; 1000 Гц - 22 дБ; 2000 Гц - 21 дБ; 4000 Гц - 20 дБ; 8000 Гц - 17 дБ;

36. Напрацювання на відмову повинно бути не менше 1000 год.

В табл. 6.3 наведено узагальнені особливості магнітного звукозапису аналогового сигналу, а у табл. 6.4 наведено (в табличному варіанті) узагальнені характеристики магнітофона, що відповідає рівню студійного або побутового вищої групи складності [14].

Таблиця 6.3. Особливості аналогового магнітного запису-відтворення звукових фонограм на магнітній стрічці

№ п.п.	Елементи і вузли пристроїв запису-відтворення аналогових фонограм	Магнітний запис
1	Принцип формування сигналу запису	Створення залишкової намагніченості в звуконосії у вигляді магнітної стрічки, що рухається з постійною швидкістю повз записувальну головку. Головка запису створює магнітне поле відповідно до форми звукового сигналу запису. В процесі магнітного запису відбувається перетворення змін амплітуди сигналу в зміни намагніченості носія, а часові зміни перетворено у відстань на стрічці між ділянками намагніченості.
2	Принцип формування сигналу відтворення	Зворотне перетворення залишкової намагніченості стрічки в магнітний потік у осерді відтворювальної головки і поява ЕРС в обмотці головки, відповідно до записаного звуку. Стрічку переміщують з тією ж швидкістю, що і під час запису.
3	Механізм пересування носія	Стрічкопротягувальний механізм з постійною лінійною швидкістю переміщення магнітної стрічки щодо магнітних головок. Забезпечує також необхідне натягнення стрічки, притискання до головки і прискорене перемотування стрічки.
4	Механізм пересування перетворювача запису	Головка запису нерухома
5	Механізм пересування перетворювача відтворення	Головка відтворення нерухома
6	Формування (перетворювач) сигналу запису і принцип нанесення інформації на носій	Магнітна головка запису у вигляді кільцевого осердя з магнітом‘якого феромагнітного матеріалу з немагнітним зазором. У зазорі створюється змінне магнітне поле, пропорційне зміні струму звукового сигналу, що створює залишкову намагніченість в магнітному носії
7	Формування (перетворювач) зчитування сигналу	Магнітна головка відтворення у вигляді кільцевого осердя з магнітом‘якого феромагнітного матеріалу з немагнітним зазором. У зазорі зміна намагніченості робочого магнітного шару стрічки, що рухається повз головку, перетворюється в коливання струму звукової частоти.
8	Необхідність попередньої оброблення носія	Так. Попереднє стирання раніше записаних фонограм за допомогою головки стирання; наявність ВЧП для запису.
9	Специфіка запису-відтворення	Використання ВЧ-передспотворень для запису, ВЧ корекція в разі відтворення. Введення ВЧП для лінеаризації характеристики намагнічування.
10	Можливість перезапису на одному і тому ж носії	Передбачено.
11	Носій запису	Магнітна стрічка - основа з поліетилентерефталату, магнітний шар у вигляді лаку, приготованого на основі порошку магнітотвердого феромагнетика (гамма-окис заліза, ферит кобальту, двоокис хрому, чистого заліза).

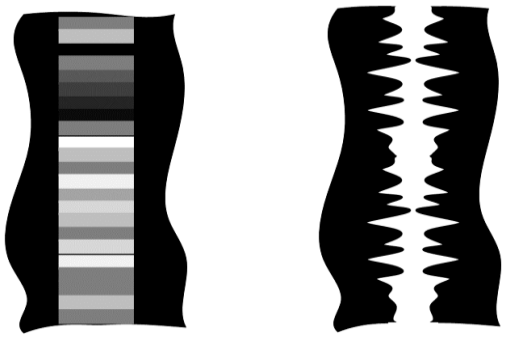
Таблиця 6.4. Параметри аналогового запису звукових сигналів на магнітному носії

№ п/п	Найменування параметру	Магнітний запис
1.	Робочий діапазон частот, Гц, не вужче	31,5...22000
2.	Відносна АЧХ стрічки, дБ	0,5+/-1, реальна 2+/-1,5
3.	Відносна чутливість магнітної стрічки, дБ	3,5+/-1
4.	Нерівномірність чутливості стрічки, дБ, на частотах 400/1000/10000 Гц	+/-0,5/+/-0,5…1/+/-1,5
5.	Номінальний залишковий магнітний потік, нВб/м, на частоті 1000 Гц для стереомагнітофонів	510
6.	Швидкість (частота) руху носія, см/с	38,1
7.	Відхилення швидкості (частоти) від номінального значення, %	+/- 0,3
8.	Дрейф швидкості, %, не більше	+/- 0,015 для магнітофонів з САР за натягом
9.	Коефіцієнт детонації запису (відтворення), %	+/- 0,04 (0,1)
10.	Відносний рівень паразитної напруги у каналі запису-відтворення, дБ, не більше	-52
11.	Відносний рівень завад каналу запису, дБ	-62 (-60)
12.	Відносний рівень завад каналу відтворення, дБ	-66
13.	Відносний рівень стирання, дБ	-75
14.	Відносий рівень шуму намагніченої стрічки, дБ	-40…-45
15.	Рівень шуму паузи, дБ	-54…-60
16.	Рівень копірефекту, дБ	-52...-56
17.	Коефіцієнт гармонік, %, не більше, на частотах, Гц: 30-60/60-8000/більше 8000	1…2/1,5/1
18.	Перехідне загасання між стереофонічними каналами під час запису, дБ, на частотах, Гц: 80/1000/8000	-20/-35/-30
19.	Коефіцієнт різницевого тону другого порядку у каналі запису-відтворення, %, не більше	1
20.	Викривлення стрічки, мм, не більше	0,01…0,015
21.	Шабельність стрічки, мм/м	1…4
22.	Відносне подовження стрічки під навантаженням 10 Н (після зняття навантаження)	0,6…1,3 (0,02…0,1)
23.	Термін зберігання в оптимальних умовах, років	25…30
24.	Кількість програвань (до появи неприпустимо високого рівня шуму)	100
25.	Час запису на одній стороні, хв.	45

6.4.3. Особливості фотографічних фонограм

Важливим моментом у розвитку звукозапису є звукозапис на фотографічну плівку, що широко використовували у кінематографії. Для фотографічного, а точніше фотооптичного запису звукових сигналів використовували фотоплівку, на якій звукову доріжку формували зміною світлового потоку, що потрапляв на фоточутливий шар плівки. Після хіміко-фотографічного оброблення на фотоплівці залишалась звукова доріжка у вигляді смужок з різною прозорістю, залежно від параметрів звукового сигналу. Це була фонограма змінної оптичної густини. Крім фонограм із змінною густиною широко використовують фонограму із змінною шириною, коли звукову доріжку формують зміною ширини світлового пучка, що потрапляє на читаючий штрих модулятора світла (рис. 6.27).

Для фотографічних фонограм характерно вузький діапазон частот, клацання внаслідок подряпин фотоемульсії, специфічний шум паузи у вигляді постійного струму, плавання або «дроблення» звуку через неточності заправлення плівки.



а б

Рис. 6.27. Вигляд фотографічної фонограми змінної щільності (густини) (*а*) та змінної ширини (*б*)

У табл. 6.5 наведено опис особливостей аналогового фотографічного запису-відтворення звукових фонограм на фотоплівці, узагальнені характерні особливості пристроїв фотографічного запису-відтворення аналогових фонограм, що впливають на якісні показники. У табл. 6.6 наведено узагальнені параметри аналогового стереофонічного запису звукових сигналів на фотографічному носії (плівці, шириною 35 мм, запис змінної ширини швидкість руху носія 24 кадри/с) у цілому [14].

Таблиця 6.5. Опис особливостей аналогового запису-відтворення звукових фонограм на фотографічному носії запису

№ п.п.	Елементи і вузли пристроїв запису-відтворення аналогових фонограм	Фотографічний запис
1	Принцип формування сигналу запису	Вплив світлового потоку на світлочутливий шар носія запису - кіноплівки. Фотохімічне оброблення, копіювання та отримання оптичної фонограми змінної ширини.
2	Принцип формування сигналу відтворення	Формування електричного сигналу фотоелементом під час модуляції світлового потоку фонограмою. Джерело світла - читаюча лампа - створює через оптичну систему в площині позитивної фонограми вузький читаючий штрих.
3	Механізм пересування носія	Механізм переміщення кіноплівки з постійною лінійною швидкістю щодо пишучого або читаючого штриха.
4	Механізм пересування перетворювача запису	Модулятор світла нерухомий.
5	Механізм пересування перетворювача відтворення	Читаюча лампа, читаючий штрих і фотоелемент нерухомі.
6	Формування (перетворювач) сигналу запису і принцип нанесення інформації на носій	Модулятор світла електромеханічного типу з пишучим штрихом і оптичною системою формує засвічення ділянки плівки певної ширини. Ширину засвічення визначає частота і рівень звукового сигналу.
7	Формування (перетворювач) зчитування сигналу	Читаюча лампа з оптичною системою, що створює вузький читаючий штрих в площині кіноплівки.
8	Необхідність попередньої оброблення носія	Ні, крім технологічних вимог (захищеність від засвічення, відсутність пилу тощо)
9	Специфіка запису-відтворення	Запис може бути з формуванням фонограми змінної ширини і змінної густини. Залежно від конструкції модулятора світла фонограма виходить односторонньою, двосторонньою (симетричною) і навіть з кількома однаковими доріжками.
10	Можливість перезапису на одному і тому ж носії	Немає.
11	Носій запису	Позитивна фотографічна плівка.

Таблиця 6.6. Параметри аналогового запису звукових сигналів на фотографічному носії

№ п/п	Найменування параметру	Фотографічний запис
1.	Робочий діапазон частот, Гц, не вужче	30...9000
2.	Нерівномірність (припустимі відхилення) АЧХ від номінальної, дБ, не більше в діапазоні частот 30 ... 60 Гц 3000 ... 8000 Гц більше 9000 Гц	 -12…-6 -4 -15
3.	Коефіцієнт пропускання прозорої частини плівки	0,83
4.	Коефіцієнт пропускання темної частини плівки	0,03
5.	Середня площа зерна плівки, не більше, мм^2	4×10^{-6}
6.	Роздільна здатність фотоемульсії, лін/мм, не менше	80…100
7.	Швидкість (частота) руху носія, мм/с	456
8.	Відношення сигнал/шум, не менше, дБ	33…35 (з ШЗ – 43)
9.	Динамічний діапазон, дБ	35…40
10.	Коефіцієнт гармонік, %, не більше,	0,45…0,85
11.	Перехідне загасання між стереофонічними каналами під час запису, дБ, на частотах, Гц: 80/1000/8000	-20/-35/-30
12.	Ширина пишучого штриха, мкм	5
13.	Освітленість пишучого штриха, лк	10
14.	Корисний світловий потік звукозчитувальної системи, лм, не менше	0,01…0,02
15.	Рівномірність освітленості вздовж читаючого штриха, не менше	0,6…0,65
16.	Ширина читаючого штриха, мкм	20
17.	Припустима непаралельність читаючого штриха напрямку руху фонограми – базовому краю фільму, не більше	0,08° = 4,8'
18.	Нерівномірність фотоелектричної віддачі, дБ	4
19.	Коефіцієнт модуляції фонограми	0,9
20.	Коефіцієнт щілинних втрат (у дБ)	0,7 (-3)
21.	Термін зберігання в оптимальних умовах, років	умовно не обмежений

6.5. Типи інтерфейсів для передавання аудіосигналів. Рознімачі

Інтерфейс (англ. Interface – сполучення, поверхня розділу, перегородка) - межа розділу двох систем, пристроїв або програм, визначена характеристиками цих пристроїв та самого з'єднання, характеристиками сигналів, що передають між пристроями тощо. Інтерфейс – це сукупність уніфікованих технічних і програмних засобів і правил (описів, угод, протоколів), що забезпечують взаємодію пристроїв і/або програм у обчислювальній і не тільки системах або з'єднання між системами.

Інтерфейс – визначений стандартом спосіб з'єднання та взаємодії різних пристроїв. У звукотехніці до інтерфейсу застосовують також назва рознімач (роз'єм, вилка, гніздо) й назву кабель.

У цілому для з'єднання будь-яких звукотехнічних пристроїв застосовують сигнальні лінії або тракти, лінії управління та лінії живлення. У першу чергу мають на увазі саме сигнальні лінії, де сигнал аналізують як звуковий електричний інформаційний сигнал аналогового або цифрового типу [11].

Сигнали між звукотехнічними пристроями можливо передавати як проводовими лініями зв'язку, так і безпроводовими лініями.

Звукові інтерфейси використовують для з'єднання звукотехнічних пристроїв між собою для підсилення, звукозапису, передавання, оброблення тощо; в умовах побутового застосування або студійного застосування, у виробництві або у разі споживання звукового контенту тощо.

Як звукові інтерфейси у загальному випадку застосовують різноманітні рознімачі, з'єднані між собою кабелями. Кабелі можуть бути екрановані, неекрановані, у вигляді крученої пари проводів або коаксіального кабелю, стереофонічні, багатопроводові (мультикори), волоконно-оптичні тощо. Для кожного рознімача характерна своя конструктивна особливість та типорозмір.

Враховуючи, що кожне джерело звукового сигналу має два електроди, наприклад, мікрофон, ці два електроди у рознімачах і кабелях називають по-різному – один завжди вважають сигнальним і має назву «гарячий» з умовно позитивною полярністю; інший електрод має назву «холодний» з умовно негативною полярністю, вважають несигнальним і його може бути підключено до загального провідника електричного кола. Ще у рознімачах може бути незалежний електрод, що має назву «загальний» або, так звана, «земля», що завжди підключають до загального провідника електричного кола і він забезпечує екранування сигнального проводу.

Кожний рознімач конструктивно може бути виконаний як вилка або розетка (вилка (штекер) - «папа» = male, розетка (гніздо) - «мама» = female), для під'єднання до кабелю або вбудовуватись в корпус пристрою.

Іноді інтерфейси зазначають функціональною назвою з'єднання.

Лінійний вхід/вихід

Це основний інтерфейс для передавання аудіосигналу між окремими компонентами музичного комплексу. Даний інтерфейс використовують для підключення активних гучномовців, апаратури запису/відтворення тощо. Рівень лінійного сигналу складає 0 дБ (напруга 0,775 В). Сигнали з таким рівнем вважають сигналами високого рівня.

Мікрофонний вхід

Мікрофонний вхід призначено як інтерфейс для підключення мікрофона. Рівень мікрофонного сигналу сягає (-60…-40) дБ (напруга, приблизно 1 мВ). Сигнали з таким рівнем вважають сигналами малого рівня.

Вихід на навушники

Навушники використовують для індивідуального прослуховування звукових сигналів. Підключення навушників здійснюють безпосередньо до підсилювача потужності для навушників. Виходи на навушники характеризують вихідною потужністю, яка може бути від 0,1 Вт до 0,25 Вт.

Коаксіальний інтерфейс

Коаксіальний вхід використовуються для передавання цифрового аудіосигналу, причому через цей інтерфейс можна передавати як багатоканальний, так і стереозвук.

Оптичний вихід

Використовують для передавання цифрового аудіосигналу оптичним кабелем. Через цей інтерфейс можна передавати як багатоканальний, так і стереозвук. З переваг оптичного інтерфейсу можна відзначити те, що він повністю захищений від електричних завад.

Кількість різних типів рознімачів, що використовують в аудіоапаратурі з кожним роком, з кожною появою нових технологій зростає, але для окремих функціональних вузлів рознімачі визначено міжнародними стандартами. На рис. 6.28 наведено основні типи рознімачів, що використовують в звукотехніці [23].

Чвертьдюймовий – джек, штекер (TRS) (абревіатура від англ. Tip, Ring, Sleeve, перекладають як Кінчик, Кільце, Гільза). Застосування: гітари, електромузичні інструменти, навушники, стандартні аудіовходи / аудіовиходи (лінійний вхід/вихід). Може бути також дво- та чотириконтактним.

Рознімач має три контакти: 1 – земля (загальний), 2 - сигнал правого каналу (для стерео), 3 - сигнал (для моно) або сигнал лівого каналу (для стерео), 4 – ізоляція (рис. 6.29). У разі балансного підключення: 1 - земля, 2 - негативний («холодний») сигнал, 3 - позитивний («гарячий») сигнал.



Рис.6.28. Зовнішній вигляд рознімачів, що використовують у аудіоапаратурі: *а* – TRS, *б* – XLR, *в* – RCA, *г* – Toslink, *д* – BNC, *є* – DIN 1, ж - DIN 2, *з* - Speakon

1/8 дюймовий – міні-джек. Застосування: портативна електроніка, побутова електроніка і навушники, звукові роз’єми комп’ютера. Можуть бути як цифрові так

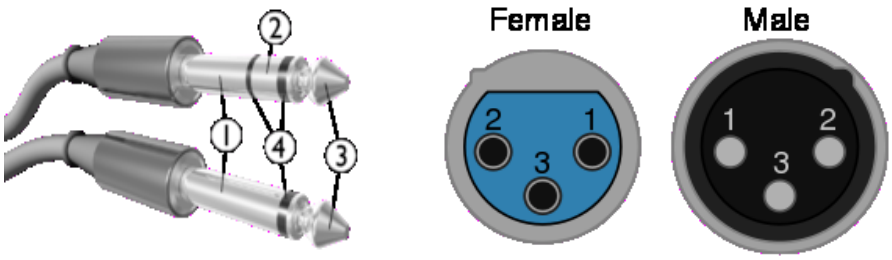
і аналогові.

XLR - рознімач, що використовують в основному в професійній звукотехнічній апаратурі для підключення мікрофонів, цифрових входів/виходів. Рознімач жаргонно називають Канон (англ. «Canon») [11].

Буква «X» визначає серію, «L» означає «Locking» («фіксується»), «R» - Rubber («гума»). Рознімачі XLR використовують для симетричного передавання сигналу.

У разі застосування триконтактного рознімача XLR для з'єднання мікрофонного кабелю використовують таке розпаювання контактів

- 1. Загальний провід (може бути з'єднаним з обплетенням (екрануванням) кабелю);
- 2. Сигнальний - пряма «позитивна» полярність (плюсовий провід, «гарячий»);
- 3. Зворотний - «негативна» полярність (мінусовий провід, «холодний»).



а б

Рис. 6.29. Контакти рознімачів TRS (а) та XLR (*б*)

RCA jack, phono connector (в просторіччі «тюльпан») Radio Corporation of America. Призначення: побутова апаратура (особливо домашні стереокомплекси), аналогові і цифрові входи/виходи DVD і CD апаратури, цифрові входи/виходи стандарту S/PDIF, цифрові входи/виходи стандарту digital surround, звукові рознімачі комп'ютера.

У побуті роз'єми RCA застосовують для передавання відеосигналу і стереофонічного звуку: жовтий – для відеосигналу, білий – для моно аудіо сигналу або лівого каналу стереофонічного аудіо-сигналу, червоний – для правого каналу стереофонічного аудіо-сигналу.

Застосовують для S/PDIF - розшифровують як Sony/Philips Digital Interface Format - це формат інтерфейсу передавання аудіо, який підтримує передавання цифрових аудіо сигналів від одного пристрою до іншого без процедури перетворення в аналоговий сигнал, що дозволяє уникнути погіршення якості звуку. Є сукупністю специфікацій протоколу низького рівня і апаратної реалізації, що описують передавання цифрового звуку між різними компонентами аудіоапаратури.

Таблиця 6.7 Відповідність кольору рознімача типу сигналу

Аналоговий аудіосигнал	Лівий/Моно	Білий	
	Правий	Червоний	
	Центр	Зелений	
	Лівий (surround)	Синій	
	Правий (surround)	Сірий	
	Лівий тиловий (surround)	Коричневий	
	Правий тиловий (surround)	Рудий-коричневий *колір засмаги*	
	Сабвуфер	Пурпурний	
Цифровий аудіосигнал	S/PDIF	Помаранчевий	

Toslink (F05, розшифровують як діаметр – 5 мм"), оптичний роз'єм скорочено від Toshiba Link – забезпечує з'єднання оптоволоконних світловодів, розроблено корпорацією Toshiba. Використовують для передавання цифрового аудіосигналу оптичним кабелем. Через цей інтерфейс можна передавати як багатоканальний, так і стереозвук. З переваг оптичного інтерфейсу можна відзначити те, що він повністю захищений від електричних завад. Призначення: цифрові входи / виходи стандартів AES / EBU і digital surround.

BNC. BNC-коннектор (BNC скор. від Bayonet Neill Concelman) служить для підключення коаксіального кабелю с хвильовим опором 50 або 75 Ом і діаметром до 8 мм. Втрати в такому роз'ємі зазвичай не перевищують 0,3 дБ.

Призначення: професійна апаратура (ширше використовують не в аудіо, а в відеоапаратурі), кабельне телебачення. Для BNC так само як і для XLR роз'єм може бути типу «мама» та «папа». Кабелі з BNC-роз'ємами застосовують для з'єднання вимірювальних радіоелектронних пристроїв (генераторів, осцилографів і інших приладів), а також для побудови мереж Ethernet стандарту 10BASE2.

Рознімач DIN - це рознімач, що спочатку був стандартизований Німецьким інститутом стандартизації (Deutsches Institut für Normung, DIN), німецькою організацією національних стандартів. Існують стандарти DIN на багато типів роз'ємів, тому термін «Гніздо DIN», не означає конкретний тип роз'єму, до тих пір, поки не вказано номер стандарту (наприклад, «Гніздо DIN 41524»). В контексті побутової техніки термін «Гніздо DIN» зазвичай означає сімейство круглих рознімачів, спочатку стандартизованих DIN для аналогових звукових сигналів. Деякі з цих рознімачів пізніше використовували для аналогового відео і для цифрових інтерфейсів, таких як MIDI або рознімач клавіатури і миші комп'ютерів IBM PS/2.

DIN-рознімач окремого стандарту застосовують для підключення акустичних систем. Це поляризований двоконтактний неекранований рознімач, розроблений для підключення гучномовця до підсилювача потужності звукової частоти.

Speakon - тип кабельних рознімачів, розроблених Neutrik і використовуваних переважно в професійних аудиосистемах для підключення акустичних систем до підсилювачів потужності.

З'єднувальні акустичні кабелі, як правило, комплектують з обох сторін

рознімачами Speakon типу «папа». На підсилювачах і акустичних системах встановлено рознімачі типу «мама».

Рознімачі Speakon розраховано на великі значення струмів, в них передбачено захист від дотику людини до струмоведучих частин, що актуально для потужних підсилювачів.

Рознімачі типу Speakon можуть містити два, чотири або вісім контактів. Дво- і чотириконтактні рознімачі частково сумісні між собою, восьмиконтактні рознімачі мають великі розміри. Найбільш поширені чотириконтактні рознімачі, вони дозволяють використовувати окремі підсилювачі для низькочастотного і високочастотного тракту без використання додаткового кабелю і рознімачів.

Відмітимо, що це далеко не повний перелік аудіорознімачів.

Контрольні запитання.

1. Наведіть графічно та поясніть складові узагальненої структури тракту звуковідтворення.
2. Надайте класифікацію звукотехнічного обладнання за різними класифікаційними ознаками.
3. Наведіть основні технічні параметри звукотехнічного обладнання та наведіть узагальнені числові значення технічних показників.
4. Наведіть графічно та поясніть складові узагальненої структури підсилювача звукових частот.
5. Наведіть основні технічні параметри підсилювача звукових частот та наведіть узагальнені числові значення технічних показників.
6. Надайте визначення та порівняльну особливість термінам: амплітуда, дієве значення, пікове значення середньоквадратичне, ефективне значення напруги й потужності для електричного звукового сигналу синусоїдної, прямокутної форми та у формі складного аналогового сигналу.
7. Зазначте основні способи та пристрої аналогового звукозапису.
8. Зазначте принцип механічного звукозапису на грамплатівку.
9. Опишіть конструктивні особливості, технологію тиражування та формування доріжки запису на грамплатівці.
10. Назвіть основні технічні параметри механічного звукозапису.
11. Опишіть конструктивні особливості та параметри звукознімачів різних типів для відтворення грамплатівок.
12. Наведіть головні особливості запису-відтворення на грамплатівці.
13. Зазначте особливості запису та відтворення стереофонічного сигналу на грамплатівку.
14. Зазначте принцип магнітного звукозапису.
15. Опишіть конструктивні особливості та формування доріжки запису на магнітній стрічці.
16. Назвіть основні технічні параметри аналогового магнітного звукозапису.
17. Опишіть конструктивні особливості та параметри магнітних стрічок різних типів.
18. Наведіть головні особливості запису-відтворення на магнітній стрічці.
19. Зазначте особливості запису та відтворення стереофонічного сигналу на магнітну стрічку.
20. Опишіть конструктивні особливості та параметри магнітних головок різних типів.
21. Наведіть вираз, що описує фізичні перетворення сигналу в процесі магнітного запису-відтворення.
22. Наведіть графічно принцип магнітного запису та застосовувані елементи.
23. Опишіть магнітні властивості матеріалів та зазначте магнітні параметри.
24. Зазначте основні властивості феромагнітних речовин.
25. Наведіть графічно та поясніть принцип намагнічування-розмагнічування магнітного матеріалу за початковою кривою намагнічування та петлею гістерезису.

26. Опишіть і графічно надайте принцип запису з високочастотним підмагнічуванням.
27. Опишіть основні недоліки магнітного запису на магнітну стрічку.
28. Зазначте втрати, шуми та завади каналу запису-відтворення на магнітну стрічку.
29. Опишіть способи та принцип стирання магнітних фонограм.
30. Опишіть необхідність та принцип частотного коригування у процесі запису-відтворення магнітних фонограм.
31. Графічно надайте та опишіть роботу елементів стрічкопротягувального механізму магнітофона.
32. Графічно надайте функціональну схему аналогового магнітофона та опишіть призначення вузлів схеми.
33. Наведіть головні особливості запису-відтворення на фотографічній плівці та опишіть конструктивні особливості та формування доріжки фотографічної фонограми.
34. Назвіть основні технічні параметри аналогового запису-відтворення звукових фонограм на фотографічному носії запису.
35. Зазначте призначення, застосування, конструктивні особливості рознімачів, що використовуються для з’єднання звукотехнічного обладнання.
36. Зазначте основні носії аналогового звукозапису та особливості формування фонограм на відповідному носії.
37. Проведіть порівняння технічних показників магнітного та механічного запису.

7. ПЕРЕТВОРЕННЯ ТА ОБРОБЛЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗВУКОВИХ СИГНАЛІВ

Ключові слова: автоматичний регулятор рівня, амплітудна характеристика, баланс, гейт, графічний, гучність, динамічний діапазон, еквалайзер, експандер, звук, звуковий сигнал, компресор, лімітер, лінія затримки, параметричний, пристрій, ревербератор, рівень, смуговий фільтр, оброблення, оброблення, процесор спец ефектів, регулятор, спектр, тембр, фільтр, фільтр верхніх частот, фільтр нижніх частот, оброблення часових параметрів, частотний діапазон, частотна обробка, частотна характеристика, шумознижувач.

7.1 Необхідність та напрямки оброблення звуку

Під час формування звукових програм сигнали, отримані від мікрофонів і інших джерел, багаторазово перетворюють і видозмінюють. На вході і виході каналу запису-відтворення сигнал існує в акустичній формі, у самому каналі в електричній формі – аналоговій чи дискретній (цифровій).

Як зазначалось раніше, акустичний сигнал практично не піддають жодному обробленню, його не можна відключити, приглушити, переспрямувати, змінити частотні складові тощо.

В електричному каналі сигнали можуть підлягати будь-якому обробленню: їх або підсилюють, або послабляють (змінюють рівень), регулюють динамічний діапазон *D*, спектр і часову структуру, змішують з іншими сигналами, зміщують за частотою (транспонують), перетворюють з аналогової форми в дискретну і навпаки, зменшують або збільшують тривалість звучання. Ці зміни роблять для досягнення декількох цілей, головні з яких [7]:

1. Рішення художніх (творчих) задач;
2. Пристосування параметрів сигналу до властивостей електричних каналів і трактів;
3. Пристосування параметрів сигналу до умов домашнього відтворення.

Ці задачі вирішують пристрої, керовані вручну й автоматично: регулятори рівня й АЧХ, лінії затримки, ревербератори, пристрої звукових ефектів.

В звукотехніці прийнято представляти сигнал у вигляді тривимірної (об'ємної) фігури (рис. 7.1), де на одній осі відкладають зміни величини сигналу (звукового тиску, напруги, рівня), що визначають динамічний діапазон *D,* на другій – ширину спектра сигналу $\Delta F = F_{max}-F_{min}$, на третій – тривалість звучання $\Delta t=t_2-t_1$. Тоді об'єм сигналу буде визначатись виразом

$$V=D\cdot\Delta F\cdot\Delta t.$$

Враховуючи це, будь-які перетворення звукового сигналу ведуть за трьома осями об'ємного зображення: змінюють рівні і динамічний діапазон, спектр і часову структуру.

Для високоякісного звуковідтворення та радіомовлення об’єм сигналу, принаймні, на три порядки перевищує об’єм мовного сигналу в телефонному зв'язку. Таку велику різницю визначено тим, що в телефонії передають лише семантичну інформація, а у радіомовленні головне місце приділяють передаванню

художній (естетичній) інформації.

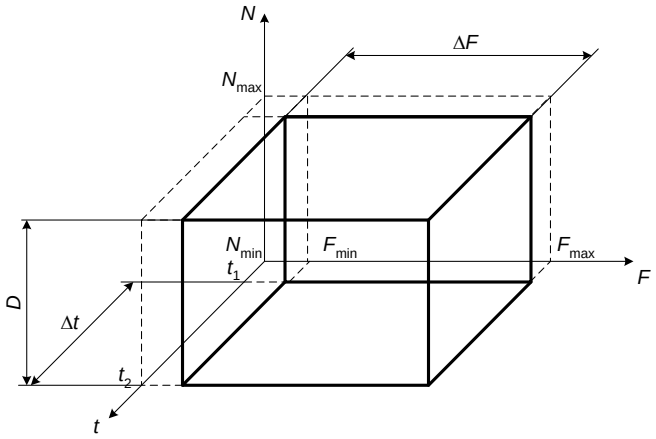


Рис. 7.1. Умовне зображення об’єму сигналу

Рівні сигналів різних джерел регулюють, щоб створити бажане співвідношення (баланс) гучностей різних оркестрових груп, співаків-солістів, отримати в приміщенні слухачів задумане розміщення удаваного джерела звуку. Одночасно вирішують і технічну задачу: весь діапазон рівнів повинен знаходитись в межах, установлених нормами і правилами технічної експлуатації. Мінімальні рівні звукового сигналу звукозапису, радіомовлення повинні бути істотно (на 10...20 дБ) вище рівня завад каналу, максимальні не повинні перевищувати значення, для якого неприпустимо зростають нелінійні спотворення, починається перемодуляція передавачів.

Для зменшення нелінійних спотворень необхідно збільшувати запас за потужністю підсилювальних і радіопередавальних пристроїв (приблизно на 6 дБ), вводити кола, що компенсують нелінійні спотворення, застосовувати обмежувачі з змінним передспотворенням. У цифрових пристроях варто збільшувати число розрядів у кодовому слові відліку, тобто вводити запас рівнів квантування, щоб без спотворень передавати короткочасні піки рівнів, які можуть викликати перевантаження АЦП і, отже, створити помітні нелінійні спотворення.

Зазначені обставини призводять до необхідності зменшувати динамічний діапазон *D* сигналів, хоча це погіршує художню якість формованих програм. Через відносно високий рівень перехресних завад у аналогових трактах первинного розподілу програм звукового мовлення потрібно стискати динамічний діапазон *D* сигналів на вході каналів звукового мовлення, а потім розширювати його на виході.

Поряд з перетвореннями динамічного діапазону роблять зміни спектра і часової структури сигналів. Регуляторами АЧХ і фільтрами змінюють форму спектра сигналів, прагнучи підкреслити темброві особливості звучання співочих голосів і музичних інструментів, усувають недоліки голосу виконавця, виправляють амплітудно-частотні спотворення, зменшують вплив шумів під час реставрації старих фонограм.

У багатьох трактах первинного і вторинного розподілів програм ЗМ потрібно йти на обмеження ширини смуги частот. При цьому велике значення має

правильний вибір співвідношення граничних частот. У разі неправильного вибору порушується баланс гучностей звуків нижніх і верхніх частот.

Змінюючи часову послідовність сигналів, створюють ефекти різної реверберації, відлуння, імітують унісонне звучання в разі ведення мелодії одним інструментом або голосом, змінюють тональність звучання, регулюють тривалість виконання, щоб ввести його у заданий часовий проміжок. Часові перетворення сигналів у даний час найчастіше роблять цифровими пристроями ефектів.

7.2. Класифікація та узагальнені технічні параметри пристроїв оброблення звуку

Класифікація пристроїв оброблення звуку (ПОЗ) виконують, як і для інших звукотехнічних пристроїв, за різними ознаками, серед яких - сфера використання, призначення, принцип роботи зі звуком, технологія побудови, конструкція, наявність специфічних функцій тощо.

На рис. 7.2 наведено класифікацію пристроїв оброблення звуку за різними ознаками.

Оброблення параметрів сигналів проводять за трьома напрямками – рівнем, частотою, часом. Звідси перша класифікаційна ознака пристроїв оброблення звуку за параметром – параметр сигналу, який підлягає обробленню (за оброблюваним параметром) – рівень або динамічний діапазон, частота або частотна характеристика, час або часові співвідношення.

Існує багато пристроїв, що суміщають різні види оброблення, тобто можуть поєднувати оброблення рівня і частоти, затримку у часі з регулюванням рівня, змінювати частоту залежно від часу відтворювання, спотворювати або видозмінювати сигнал у часі, у смугах частот та на визначених рівнях тощо. Такі пристрої скоріше називають пристроями звукових ефектів або більш спеціалізованими назвами – шумознижувач, процесор звукових ефектів, максимайзер тощо.

В залежності від тракту проходження сигналу – електричний або акустичний, назва пристроїв оброблення звуку може бути неоднаковою. Це пов’язано з тим, що для електричних трактів характерні такі назви параметрів сигналу, як рівень, АЧХ, амплітуда, спектр тощо, тобто фізичні (об’єктивні) характеристики. Для акустичних трактів назва параметрів сигналів визначають за відчуттям звукового сигналу слуховим органом людини, що і визначає назву параметра – гучність, тон, тембр. У подальшому будемо аналізувати пристрої оброблення звуку за електричними параметрами з відповідними назвами.

Залежно від сфери використання пристрої оброблення звуку можна розподілити на професійні, напівпрофесійні та побутові.

З урахуванням деяких загальних конструктивних особливостей ПОЗ можуть бути стаціонарні, малогабаритні, портативні, рекові, модульні, багатоблочні.

Залежно від способу керування режимами роботи є ПОЗ автоматичні, напівавтоматичні та з ручним керуванням.

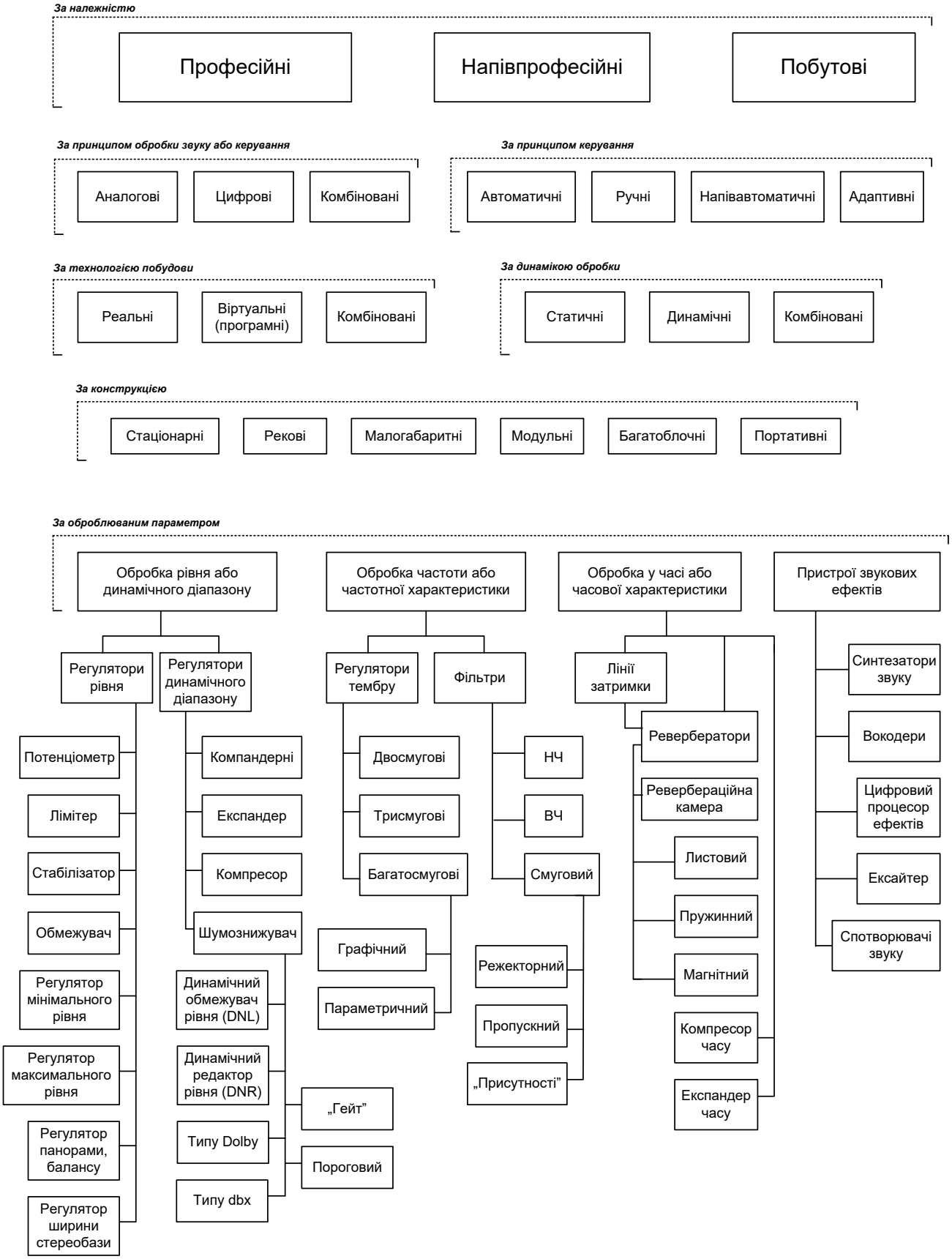


Рис. 7.2. Класифікація пристроїв оброблення звуку

Сучасні тенденції цифрового перетворення сигналів створили появу цифрових ПОЗ. На зміну аналоговим ПОЗ приходять цифрові і як проміжний варіант – комбіновані. У цифрових ПОЗ на вхід можуть подаватися аналогові сигнали, які у

вхідних каналах АЦП перетворюють у цифрові. Подальше оброблення виконують з сигналом, який представлений у цифровому вигляді. У вихідних каналах такого ПОЗ є ЦАП, які перетворюють цифровий сигнал у аналогову форму. Цифрові пристрої мають можливість роботи безпосередньо з цифровими сигналами.

У комбінованих ПОЗ, в основному, застосовують цифрове керування режимами роботи пульта, аналоговий сигнал, при цьому, не перетворюють у цифровий.

Розвиток комп'ютеризації призвів до появи особливого принципу класифікації ПОЗ – за технологією побудови процесів оброблення. Згідно цього, ПОЗ можна поділити на реальні, які існують і мають реальні органи керування; віртуальні, керування параметрами у яких покладено на програмне забезпечення персональних комп'ютерів; комбіновані, які поєднують у собі реальну панель керування і комп'ютерне забезпечення. У зв'язку з великими можливостями, які надає застосування персональних комп'ютерів у роботі із звуком, все більше з'являються ПОЗ, сумісні та взаємокеровані з комп'ютером.

Розглянемо класифікацію ПОЗ за регулювальними параметрами.

Регулятори рівня можна розподілити на регулятори безпосередньо рівня та регулятори динамічного діапазону.

Регулятори рівня забезпечують зміну рівня сигналу за відповідною характеристикою регулювання і в одному напрямку, наприклад, або збільшення, або зменшення рівня.

Регулятори рівня підрозділяють на звичайні регулятори рівня потенціометричного типу, регулятори максимального рівня, регулятори мінімального рівня, обмежувачі рівня (лімітери), стабілізатори рівня, регулятори рівня стереофонічних сигналів (регулятори панорами або балансу)

Регулятори рівня можуть бути статичні і динамічні, з ручним регулюванням або автоматичні чи адаптивні, пасивні або активні, аналогові або цифрові, з прямим або опосередкованим регулюванням.

Регулятори динамічного діапазону забезпечують необхідну різницю між максимальним і мінімальним рівнями і можуть працювати в декількох напрямках, причому з різними характеристиками регулювання.

Регулятори динамічного діапазону можна розподілити на компандерні системи та обмежувачі динамічного діапазону. Складовими компандерних систем є компресор і експандер, а обмежувачами динамічного діапазону являються по-суті обмежувачі рівня – мінімального (шумознижувачі) або максимального (лімітери).

Регулятори частотної характеристики звукового сигналу можна розподілити на регулятори спектру або АЧХ (тембру) та фільтри. В свою чергу регулятори АЧХ підрозділяють на двосмугові та багатосмугові. Регулятори АЧХ ще називають частотними коректорами або еквалайзерами, що більше стосується багатосмугових регуляторів, які можуть бути з *n*-ою кількістю смуг, графічні і параметричні. Фільтри підрозділяють на ФНЧ, ФВЧ, смугові: режекторні, пропускні, присутності.

Пристрої оброблення часових параметрів сигналів – це в першу чергу лінії затримки сигналу, пристрої зміни часу відтворення сигналів та ревербератори. У свою чергу пристрої оброблення часових параметрів забезпечують зміну часових параметрів завдяки акустичним, механічним, магнітофонним, електронним

перетворювачам масштабу часу.

Велику групу ПОЗ складають пристрої звукових ефектів, які поєднують декілька елементарних ПОЗ. До таких пристроїв відносять шумознижувачі, що будують на пристроях оброблення динамічного діапазону в певних частотних смугах; вокалстресори, що поєднують еквалайзери і автоматичні регулятори рівня; ексайтери, що є синтезаторами спектру; звукові процесори, що одночасно забезпечують оброблення за частотою, рівнем і у часі тощо.

Серед основних технічних параметрів ПОЗ, які характеризують функціональні можливості та параметри ПОЗ можна виділити наступні:

1) відносно можливостей оброблення параметрів:
- кількість оброблюваних параметрів;
- послідовне або паралельне оброблення параметру;
- незалежне оброблення параметрів;
- діапазон регулювання значення параметру;
- кількість незалежних або залежних етапів регулювання;
- межі регулювання параметру.

2) відносно контролю сигналів та процесу оброблення:
- наявність світлодіодного індикатора режимів роботи ПОЗ;
- наявність індикатора процесу регулювання;
- гнучкий контроль;
- незалежний контроль вхідних/вихідних сигналів;
- наявність багатофункціонального дисплею.

3) показники якості пристроїв оброблення:
- діапазон відтворюваних частот;
- діапазон регульованого параметру;
- чутливість входу ПОЗ;
- чутливість виходу ПОЗ;
- динамічний діапазон;
- відношення сигнал/шум;
- коефіцієнт нелінійних спотворень;
- запас по перенавантаженню;
- вхідний опір;
- вихідний опір;
- міжканальна перехідна завада;
- значення регульованого параметру.

4) відносно деяких конструктивних особливостей:
- габаритні розміри;
- маса;
- блок живлення – вбудований або зовнішній;
- можливість нарощування модулів оброблення;
- можливість довільного розміщення модулів оброблення.

5) відносно застосування спеціалізованої схемотехніки:
- застосовані спеціалізовані мікросхеми з дуже малим рівнем шуму;
- застосовані підсилювачі керовані напругою;
- наявність узгоджувальних трансформаторів;

- симетричні входи/виходи;
- наявність багатофункціональних рознімачів;
- застосування спеціалізованих потенціометрів відповідної довжини і групи регулювання (лінійні, логарифмічні тощо);
- застосування багатофункціональних комутаторів і перемикачів;
- застосування чутливих до дотику регуляторів.

6) додаткові функції:
- вбудований звуковий генератор тестових сигналів;
- вбудований тестовий генератор шумів;
- наявність багатофункціональних інтерфейсних рознімачів різних протоколів;
- автоматизація керування режимами роботи ПОЗ;
- пам'ять на встановлені режими пульта;
- з вбудованим вторинним джерелом живлення;
- сумісні та взаємо керовані з персональним комп'ютером.

7.3 Аналіз пристроїв оброблення звуку

7.3.1 Оброблення за рівнем

7.3.1.1. Регулятори із застосуванням потенціометра

Розрізняють оперативне і настановне регулювання рівнів. В першому випадку його здійснюють ручними регуляторами, керованими звукорежисером, а у другому – технічним персоналом апаратних трактів первинного і вторинного розподілів. Оперативне регулювання проводять у апаратній звукозапису, настановне – в інших точках звукового тракту.

Звичайно, основою регулятора рівня (РР) служить дільник напруги (потенціометр, рис. 7.3, а) або чотириполюсник з плавною або східчастою зміною загасання. Переваги регульованих дільників – плавність зміни загасання, простота. Головний недолік – зміни вхідного і вихідного опорів РР під час регулювання загасання, що порушує режим інших ланок, з'єднаних з РР [11].

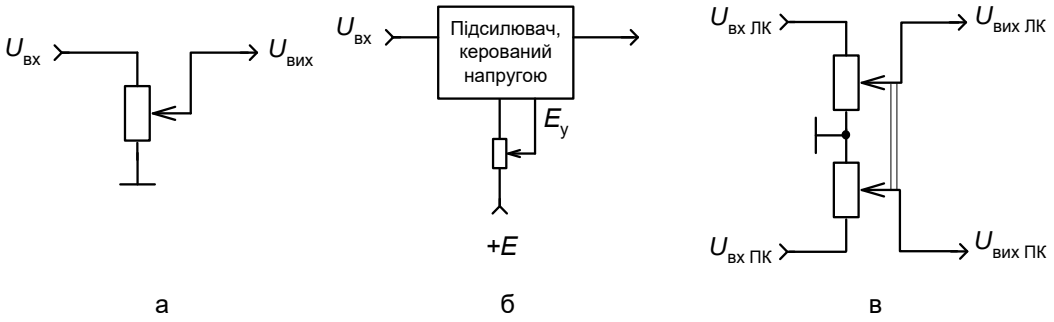


Рис. 7.3. Регулятори рівня: пасивний (*а*), активний (*б*), регулятор балансу (кросфейдер) (*в*)

Для РР застосовують електронні регулятори – підсилювачі, керовані напругою. В них коефіцієнт передавання (або загасання) регульовної ланки (РЛ) змінюють, впливаючи управляючою напругою $E_у$, світловим потоком або магнітним полем. Однією напругою $E_у$ можна управляти одночасно коефіцієнтами

передавання декількох трактів пульта (рис. 7.3,*б*).

Особливим видом ручних РР є регулятори балансу або кросфейдери (рис. 4.3,*в*). За допомогою кросфейдера здійснюють плавний перехід від одного сигналу до іншого.

7.3.1.2. Автоматичні регулятори рівня

Автоматичні регулятори рівня (АРР) – чотириполюсники, коефіцієнт передавання яких змінюють за заданим законом залежно від значення рівня сигналу. Іноді будують АРР, що реагують і на інші параметри сигналу, наприклад на його спектр, крутизну наростання і убування обвідної, на шпаруватість сигналу.

АРР зменшують або збільшують динамічний діапазон сигналів, підтримують в заданих межах пікові або середні значення рівнів, обмежують підсилення тракту в разі зменшення вхідного рівня нижче встановленого мінімуму, покращують розбірливість мови, зменшують відмінності гучності мови і музики, захищають устаткування трактів звукопередавання від наслідків перевищення номінального вхідного рівня (перезбудження) або перевантаження вихідних блоків, зменшують вплив шумів в каналах звукопередавання [7].

Динамічний діапазон звукових сигналів (ЗС) автоматично стискають для того, щоб виділити звучання голосу соліста або виконуючого соло інструменту над оркестровим супроводом, поліпшити розбірливість мови у разі звукопідсилення або передавання трактами з порівняно великими завадами. Зменшення динамічного діапазону звукового сигналу призводить до зростання його середньої потужності.

Автоматичне регулювання коефіцієнта передавання зменшує перепади рівня гучності у разі переходу від мови до музики і навпаки, що важливо під час прослуховування мовних програм в домашніх умовах.

Автоматичне обмеження пікових (максимальних) рівнів на вході підсилювальних пристроїв запобігає збільшенню нелінійних спотворень. Автоматичні пристрої спрацьовують також в разі перевантаження, тобто під час стрімкого зменшення опору навантаження, обмежують у цьому випадку потужність або струм і тим захищають вихідний каскад кінцевих підсилювачів або модуляторів передавачів від аварій.

Залежно від реалізовуваного закону регулювання рівнів розрізняють стискачі і розширювачі динамічного діапазону, обмежувачі максимальних і мінімальних рівнів (останні називають ще пороговими обмежувачами або шумознижувачами).

За формою представлення регульованого сигналу і напруги керування розрізняють аналогові, аналогові з цифровим управлінням і повністю цифрові АРР. Залежно від тривалості процесу регулювання АРР розподіляють на безінерційні і інерційні.

Аналогові безінерційні пристрої в звукопередаванні майже не застосовують, оскільки їм властиві значні нелінійні спотворення.

Безінерційні обмежувачі (пікозрізувачі) іноді підключають на виході інерційних обмежувачів максимальних рівнів для усунення можливих піків спрацьовування, які можуть створити завади проходженню інших сигналів в багатоканальних системах зв’язку.

Узагальнену структуру АРР наведено на рис. 7.4,*а*. За схемою АРР складено з

регульованої ланки, яка є по суті регулятором рівня, та керувальної ланки, що управляє роботою регульованої ланки, наприклад, його коефіцієнтом передавання. Регульована ланка (РЛ) - підсилювач з змінним коефіцієнтом підсилення або дільник напруги (потенціометр) зі змінним коефіцієнтом передавання [11].

Керувальну ланку (КЛ), в свою чергу, складено з інтегрувального кола та випрямляча і вона формує керуючу напругу на відповідному вході регульованої ланки. Керуюча напруга формують або з вхідного сигналу – пряме регулювання, або з вихідного сигналу – зворотне регулювання. Пряме регулювання частіше застосовують для розширювачів динамічного діапазону, зворотне – для стискувачів та обмежувачів рівня.

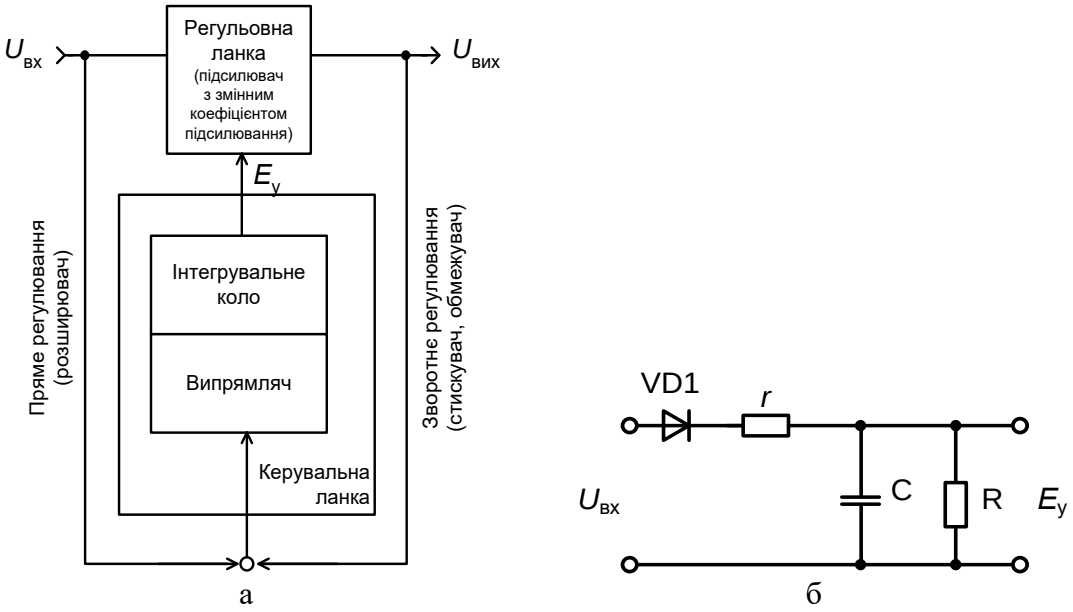


Рис. 7.4. Автоматичний регулятор рівня (*а*) та еквівалентна схема керувальної ланки (*б*)

Іноді здійснюють змішане управління, використовуючи і вхідну, і вихідну напруги. В АРР із змішаним управлінням об'єднано переваги прямого і зворотного управлінь, якщо обидва управляючі кола діють одночасно.

Як регульовану величину частіше за все обирають величину сигналу (напруга, рівень), іноді гучність, струм або потужність. Найбільш поширені АРР, що регулюють напругу (або рівень) сигналу.

В КЛ входять двонапівперіодний випрямляч, детектор (VD) и зарядно-розрядне (інтегрувальне) коло. Еквівалентну схему КЛ наведено на рисунку 7.4,*б*. Тут r - опір кола заряду, C - ємність накопичувальна, R - опір кола розряду. Параметри кола: стала часу кола заряду $\tau_З = rC$ і розряду $\tau_р = RC$ - визначають тривалість процесів регулювання.

Особливою групою є адаптивні (самоналагоджувальні) АРР. В них режим управління, амплітудна характеристика, часові параметри, ступінь стиснення або розширення динамічного діапазону сигналу автоматично змінюються залежно від властивостей сигналу і умов дії АРР.

АРР характеризують специфічними характеристиками і параметрами – статичними для усталеного режиму та динамічними для перехідного. У статичному режимі властивості АРР визначають амплітудними та регулювальними

характеристиками (рис. 7.5) [11].

До статичних параметрів відносять: коефіцієнт стиснення (розширення) D_γ для стискувача й розширювача; діапазон обмеження q і діапазон стискання p звукового сигналу для обмежувача максимальних рівнів.

До динамічних характеристик і параметрів АРР відносять: перехідну характеристику; час установлення $t_у$ і час відновлення $t_в$.

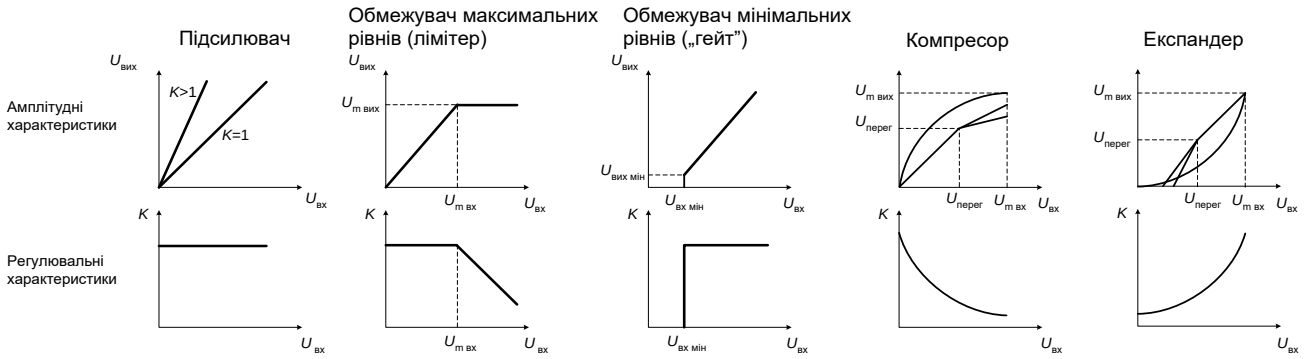


Рис. 7.5. Характеристики регуляторів рівня

У загальному виді коефіцієнт стиснення (розширення)

$$\gamma = \mathrm{d}U_{\text{вих}}/\mathrm{d}U_{\text{вх}},$$

або, зазначивши зміни амплітуди сигналу в логарифмічній формі через рівні,

$$\gamma = N_{\text{вих}}/N_{\text{вх}}.$$

Амплітудні характеристики стискувача і розширювача, як правило, апроксимують показовими функціями:

$$U_{\text{вих}} = kU_{\text{вх}}^{\gamma},$$

де k - коефіцієнт пропорційності; γ - коефіцієнт стиснення (розширення) D, що показує, в скільки разів АРР змінює D сигналу під час регулювання.

В логарифмічному масштабі із зазначенням динамічних діапазонів вхідного і вихідного сигналів можна записати вираз

$$D_{\text{вих}} = \gamma D_{\text{вх}}.$$

Для стискувача $\gamma < 1$, для розширювача $\gamma > 1$, наприклад, в системі "стискувач-розширювач" (компандерна система), у якій використовують АРР з характеристиками $\gamma_{\text{ст}} = 0{,}5$; $\gamma_{\text{розш}} = 2$; $\gamma_{\text{ст}} \cdot \gamma_{\text{розш}} = 1$, і динамічний діапазон на виході системи дорівнює вхідному. Для підсилювача $\gamma = 1$.

Амплітудна характеристика обмежувача у режимі підсилення подібна до амплітудної характеристика підсилювача, а у режимі обмеження ідеалізована. Відповідно у режимі підсилення D = const, тобто змінюється за гіперболічним

законом. Ефективність дії обмежувача характеризують значенням відносного зростання вихідного сигналу понад номінального. Для мовних обмежувачів максимальних рівнів типові значення діапазону обмеження й діапазону стискання або збільшення рівня наступні:

$$q = 1{,}1...1{,}12 \ (\Delta N_{\text{вих}} = 0{,}8...1{,}0 \text{ дБ}),$$
$$p = 10...20 \ (\Delta N_{\text{вх}} = 20...26 \text{ дБ}).$$

Автоматичне регулювання рівнів супроводжується перехідними процесами, зумовленими зарядом і розрядом конденсатора керуючої ланки. Тривалість процесу заряду в разі прямого керування пов'язана з параметрами кола заряду.

Динамічні властивості АРР відображає перехідна характеристика, тобто реакція АРР на стрибкоподібну зміну обвідної вхідної напруги. З перехідної характеристики знаходять час встановлення - інтервал часу від початку перехідного процесу до моменту часу, коли напруга на виході АРР буде відрізнятися від сталого значення на 25 % або відповідно рівень сигналу на виході АРР буде відрізнятися від сталого значення на 2 дБ. Передбачено, що на вході обмежувача відбувся трикратний стрибок напруги проти граничного або стрибок рівня на 10 дБ.

За час відновлення приймають інтервал між стрибкоподібним зменшенням напруги на вході АРР і моментом часу, коли напруга на виході АРР буде відрізнятися від напруги в сталому режимі на 25 %, а рівень відповідно буде відрізнятися від сталого значення на 2 дБ.

Вибір часових параметрів пристроїв динамічного оброблення в основному визначають за призначенням пристрою конкретного типу.

7.3.1.3. Лімітер та стабілізатор, компресор, гейт та експандер

Обмежувач рівня (лімітер) - це авторегулятор, у якого коефіцієнт передавання змінюють так, що у разі перевищення номінального рівня вхідним сигналом рівень сигналу на його виході залишається практично постійними, близькими до номінального значення (рисунок 7.5,*б*). Для вхідних сигналів, що не перевищують номінального значення, обмежувач рівня працює як звичайний лінійний підсилювач [7].

Лімітер повинен реагувати на зміну рівня швидше, ніж компресор. Іншими словами, час атаки повинен бути менше. У ситуаціях, коли потрібно одержати абсолютне обмеження, застосовують лімітер з колом обрізки, що встигає зупинити піки, занадто короткі навіть для лімітера.

Стабілізатор рівня працює майже так, як і лімітер, тільки він не “обрублює” сигнал, а після установленого значення напруги, починає плавно зменшувати рівень сигналу, щоб він не перевищив заданого U_0.

Компресор - це підсилювач, коефіцієнт передавання якого зменшується зі збільшенням рівня вхідного сигналу, тому його призначено для стиснення динамічного діапазону сигналу (рисунок 7.5,*б*).

Для характеристики роботи компресорів використовують наступні параметри;

1) поріг спрацьовування (threshold) визначає рівень, вище якого сигнал

починає стискатися;

2) коефіцієнт стиснення (compression ratio) визначає, наскільки змінено рівень вихідного сигналу під час зміни рівня вхідного сигналу (наприклад, для його значення 4:1 зміна вхідного сигналу на 4 дБ збільшує вихідний сигнал на 1 дБ);

3) час спрацьовування (attack time) і час відновлення (release time). Зазвичай час атаки знаходиться в межах від 10 мкс до 100 мс; час відновлення - від 0,5 с до 2 або 3 с.

Дія компресора приводить до підвищення середньої потужності і, отже, гучності звучання оброблюваного сигналу, а також до стискання його динамічного діапазону (ДД).

В залежності від конструкції, компресор може зменшувати рівень гучних сигналів, збільшувати рівень тихих сигналів або робити і те, і інше відразу. Величину компресії встановлюють регулятором "ratio" ("співвідношення"). Якщо змінюється вхідний сигнал, то це викликає зміну сигналу на виході.

Більшість компресорів працюють за системою "точка перегину" - тобто сигнали, що мають рівень нижче конкретної точки рівня, не піддають компресії. Момент, коли сигнал перевищує встановлений рівень, відображають на індикаторах. Вище цього рівня відбувається зменшення підсилення сигналу.

Компресор зменшує рівень будь-якого сигналу, що вище рівня точки перегину. Унаслідок цього вихідний сигнал менше, ніж той, що надійшов на вхід. Для того, щоб зробити цей рівень достатнім, введена стадія відновлення. Час атаки і загасання залежить від музичного матеріалу, тому їх можна змінювати.

Експандер має амплітудну характеристику (рисунок 7,5,*б*), зворотну відносно до амплітудної характеристики компресора - його коефіцієнт передавання збільшується у міру підвищення рівня сигналу. Експандер застосовують у тому випадку, коли необхідно відновити ДД, попередньо стиснутий компресором, тобто служить для розширення динамічного діапазону сигналів.

Граничний шумознижувач (гейт) - це авторегулятор, у якого коефіцієнт передавання змінюють таким чином, що у разі рівня вхідного сигналу менше граничного - амплітуда сигналу на виході близька до нуля. Для вхідних сигналів, рівень яких перевищує граничне значення, гейт працює як звичайний лінійний підсилювач. Гейт має малий коефіцієнт передавання до певного рівня вхідного сигналу і великий на рівнях вище порогу, застосовують для обмеження шуму в паузах.

Гейт - електронний перемикач, що реагує на рівень вхідного сигналу (граничний шумознижувач). Як і в компресорі, точку перегину установлюють вручну; гейт вилучає ("замикає") сигнал, якщо його рівень є нижче точки перегину. Іншими словами, компресор обробляє сигнал вище точки перегину, а гейт - нижче її.

Основою гейта є підсилювач, керований напругою. У деяких колах є атенюатор, керований напругою.

Усе частіше й частіше застосовують гейти, що працюють за принципом експандера (процес, прямо протилежний тому, що робить компресор). Коли рівень сигналу стає менше точки перегину, він не відключається, а відбувається ослаблення рівня.

Пристрої оброблення параметрів звукових сигналів, що застосовують компресор сигналу на вході пристрою та експандер сигналу на виході називають компандерними пристроями оброблення динамічного діапазону. На рис. 7.6 наведено структуру компандерної системи оброблення динамічного діапазону та діаграма рівнів його роботи. Таку систему застосовують для зниження рівня шумів у трактах запису або передавання звукових сигналів [11].

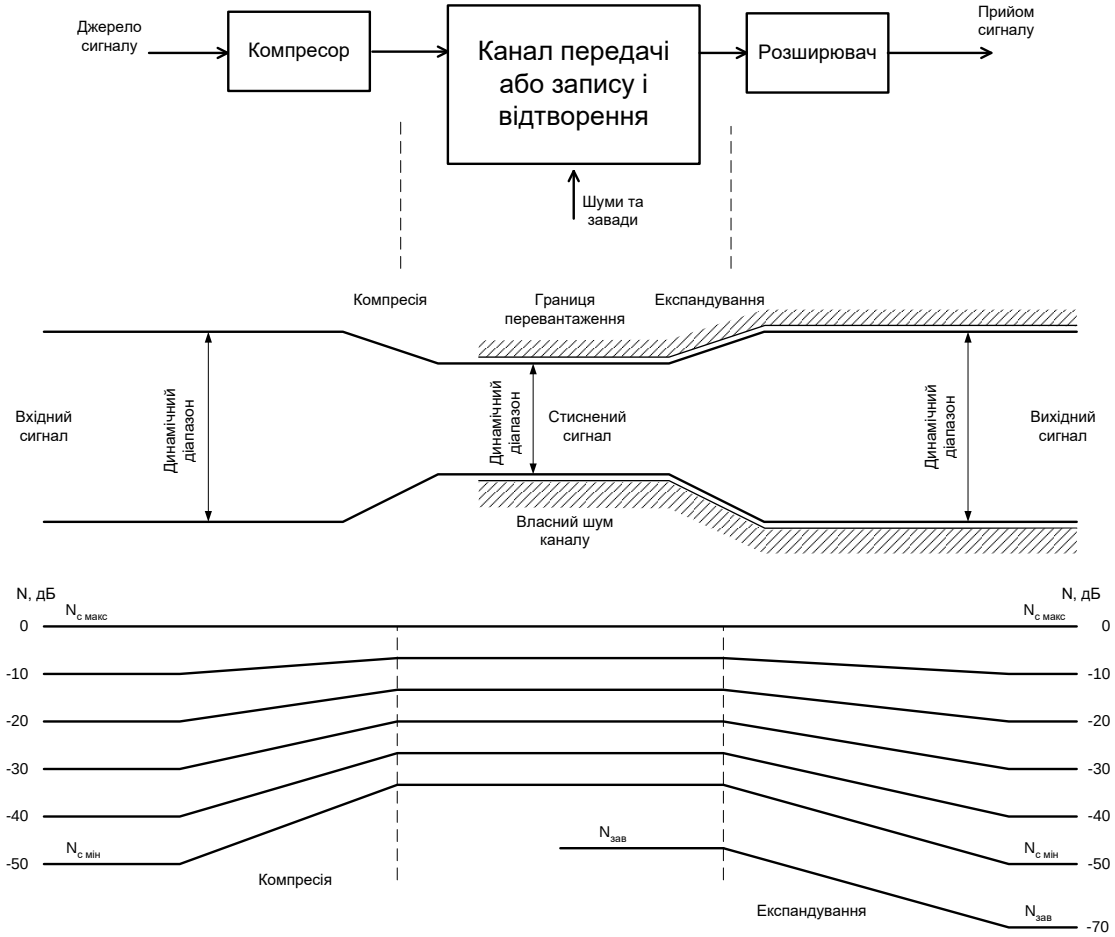


Рис. 7.6. Структура компандерної системи оброблення динамічного діапазону та діаграма рівнів його роботи

7.3.2 Частотне оброблення

7.3.2.1. Ручні регулятори спектру

Для зміни спектру звукового сигналу регулюванням АЧХ трактів використовують різні пристрої, які створюють спади або підйоми АЧХ в області нижніх і верхніх частот або в обмежених ділянках на середніх частотах. До числа цих пристроїв відносять: регулятори плавного підйому і спаду АЧХ на нижніх і верхніх частотах, фільтри, що різко обмежують смугу пропускання за нижніми і верхніми частотами, багатосмугові регулятори АЧХ, так звані графічні коректори або еквалайзери (від англ. слова equaliser – коректор, вирівнювач), фільтри "присутності" тощо [11].

Призначення і прийоми застосування регуляторів форми АЧХ різноманітне. Метою регулювання спектру є: додавання більшої виразності звучанню музичних інструментів, зменшення помітності деяких недоліків мови (неприємного тембру, шепелявості, посвисту), створення різних звукових ефектів, наприклад імітації звучання мови по телефону, по радіо, через рупор, імітація акустичної обстановки передаваних сцен, отримання нових, незвичайних тембрів, виправлення порушень частотного балансу, що виникає в разі відтворенні сигналів з підвищеною або зниженою в порівнянні з початковою гучністю, ослаблення впливу завад (шумів) під час реставрації старих фонограм, записаних механічним, оптичним або магнітним способом, і в разі запису в незадовільних акустичних умовах.

Регулятори АЧХ часто називають частотними коректорами. Але для виправлення АЧХ вони використовуються дуже рідко. Амплітудно-частотні характеристики звукорежисерських пультів, професійних мікрофонів і магнітофонів такі хороші, що не потребують коригування. Частіше за все перераховані пристрої використовують для свідомого відхилення АЧХ від горизонтальної прямої, і лише в окремих випадках дійсно для виправлення амплітудно-частотних спотворень, що виникають через незвичайні умови прийому звуків музики і мови в акустично непристосованих приміщеннях, неоптимальній відстані мікрофону від джерела звуку, при використовуванні мініатюрного мікрофону, розміщеного під одягом, для придушення яскраво виражених резонансів приміщень (особливо невеликих).

Частотну корекцію сигналів (еквалізація) використовують для зменшення нерівномірності амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) апаратури, зниження рівня високочастотних або низькочастотних шумів, створення спеціальних ефектів за рахунок підкреслення або придушення сигналів в певній смузі частот (наприклад, виділення окремих формантних частот).

Стосовно відчуття спектру звукового сигналу, регулятори спектру називають регуляторами тембру (РТ). Найпростіший РТ, що найчастіше зустрічається в побутовій техніці – двосмуговий регулятор тембру, який забезпечує регулювання спектру сигналу в області НЧ та ВЧ. Структурна схема такого регулятора та його частотна характеристика наведені на рис. 7.7.

7.3.2.2. Еквалайзер

Еквалайзер – це регулятор частотної характеристики, що дозволяє як виправляти недосконале звучання, так і створювати новий звук, якщо це потрібно.

На відміну від ручок гучності і чутливості, що просто або додають, або забирають весь сигнал, не торкаючись його тональної характеристики (тобто всі частоти, що є у вхідному сигналі, підсилюються або послабляються в однаковій мірі, і таке коло має рівну частотну характеристику) - на відміну від них еквалайзер або підсилює, або послабляє окремі частоти в більшому ступені, ніж інші [15].

Рівень спадання сигналу фільтрів еквалайзера визначають в децибелах на октаву. У разі оброблення музичних сигналів застосовують еквалайзери з крутістю спаду 6 дБ на октаву і 12 дБ на октаву. Для вирізання наднизьких і надвисоких частот застосовують фільтри з більшою крутістю спаду (24 дБ на октаву).

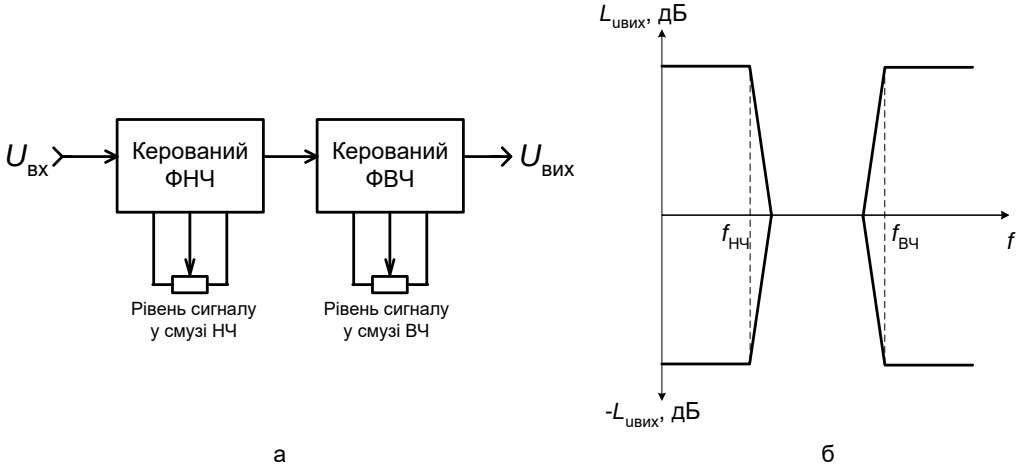


Рис. 7.7. Структурна схема (*а*), та амплітудно-частотна характеристика (*б*) двосмугового регулятора тембру

Графічні еквалайзери. Можливо керувати всім частотним діапазоном застосуванням декількох смугових фільтрів, конструктивно зібраних в одному корпусі. Кожний з цих фільтрів буде налаштовано на визначену частоту. У цьому і є основа дії графічного еквалайзера. Окремі фільтри розміщено (на відстані) або в октаву, або у пів-октави, або у третину октави таким чином, коли усі вони знаходяться у стані підсилення (чи всі в стані ослаблення), щоб частотна характеристика була рівна. Повзунки регулювання звичайно мають позначку, що дозволяє легко визначити середнє положення. Діапазон регулювання, як правило, обмежено 15 дБ. Еквалайзер має назву "графічний" тому, що застосовані у ньому повзункові регулятори (замість ручок) своїм положенням показують частотну характеристику вихідного сигналу.

Структурну схему такого регулятора та його частотну характеристику наведено на рис. 7.8.

Параметричні еквалайзери. Ці еквалайзери пропонують більш гнучкий підхід до регулювання. У них є можливість налаштування фільтра на конкретну частину аудіоспектра. Звичайний параметричний еквалайзер середніх частот може змінювати коефіцієнт передавання в діапазоні від 200 Гц до декількох кілогерців.

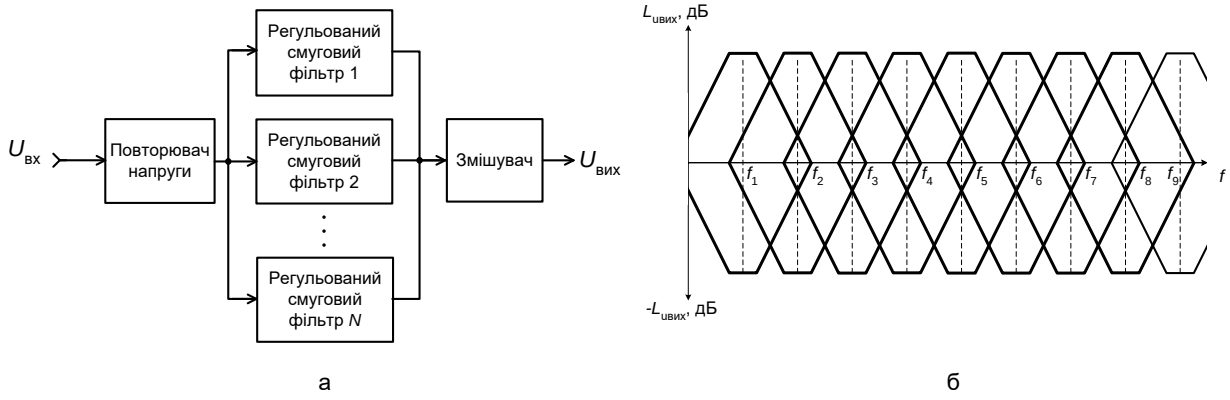


Рис. 7.8. Структурна схема (*а*), та амплітудно-частотна характеристика (*б*) багатосмугового графічного регулятора тембру

Ширина смуги або добротність фільтру (Q) таких еквалайзерів обрана не занадто великою (щоб не захопити занадто широкого діапазону частот), але і не занадто маленькою (у цьому випадку в разі підсилення звук стає різким). Насправді для різних вихідних звуків потрібно підбирати власну ширину смуги.

Деякі, не занадто дорогі, параметричні еквалайзери мають можливість перемикання значень Q (звичайно - два положення, одне з яких відповідає вузькій смузі, друге - досить широкій). Працювати з таким еквалайзером зручніше. Він називається "параметричний" (parametric), тому що усі важливі параметри, доступні користувачу для регулювання: рівень підсилення/ослаблення, середня частота, на якій забезпечено регулювання, ширина смуги.

Структурну схему параметричного регулятора наведено на рис. 7.9.

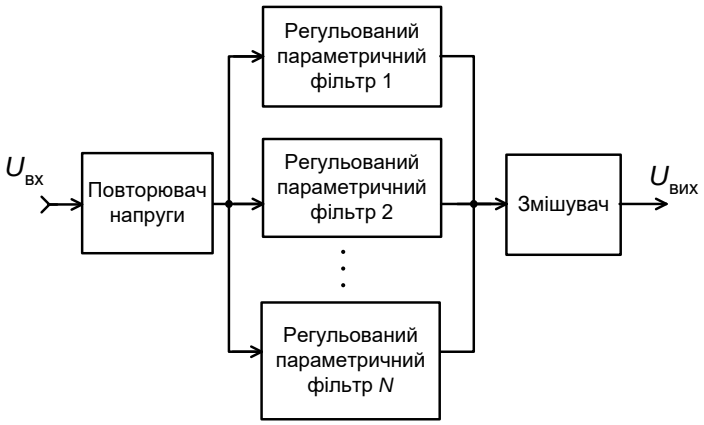


Рис. 7.9. Структурна схема багатосмугового параметричного еквалайзера

7.3.2.3. Фільтри

Схем фільтрів всього чотири. Фільтр ВЧ (фільтр високих частот) дозволяє обрізати частоти, що знаходяться до частоти зрізу (F_1), тобто, пропускає тільки високі частоти. Фільтр НЧ (фільтр низьких частот) діє точно так само, тільки обрізає всі частоти після точки зрізу. Обидва цих фільтра використовують в тих ситуаціях, коли потрібно зрізати або низькі, або високі частоти [11].

А от режекторний смуговий фільтр і пропускний смуговий фільтр роблять повноцінну параметричну корекцію. Перший вирізує частотну смугу, що

знаходиться між значеннями частот F_1 і F_2, а другий діє зворотним образом - зрізає частоти, що знаходяться до частоти F_1 і після частоти F_2, тобто пропускає зазначену частотну смугу. Однак, у більшості фізичних приладів, у яких застосовують ці фільтри, немає роздільних регулювань двох частот зрізу. Звичайно в них є регулятор частоти зрізу і регулятор ширини смуги (між точками F_1 і F_2), на яку можливий вплив. Останній іноді називають регулятором добротності фільтра. Широко використовують фільтри присутності.

На рис. 7.10 зображені амплітудно-частотні характеристики фільтрів, що застосовують для частотного оброблення звукових сигналів [19].

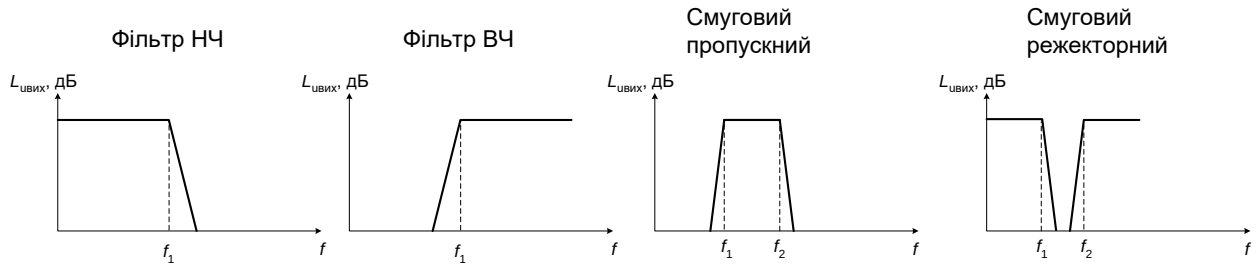


Рис. 7.10. Амплітудно-частотні характеристика фільтрів

7.3.3 Оброблення часових параметрів

Лінії затримки (ЛЗ) та реверберація.

Звукові ефекти, створені шляхом перетворення сигналу в часовій області, частіше за все засновані на застосуванні ліній затримки. При самостійному використанні ЛЗ призначено для вирівнювання групового часу запізнювання від різних джерел в студіях і затримки сигналів, що приходять до слухача в залі від різних гучномовців системи відтворювання в разі звукопідсилення. Залежно від призначення час затримки складає від декількох мілісекунд до декількох секунд [15].

Пристрої звукових ефектів (ЗЕ) засновано на змішуванні основного (незатриманого) сигналу з одним або декількома його затриманими повтореннями, але час затримок Δt змінюють з різною швидкістю і за різними законами. Розрізняють дві групи ЗЕ. Для реалізації ефектів першої групи час затримки встановлюють до початку дії пристрою і в процесі дії його не міняють або змінюються рідко. Це ефекти: затримка, відлуння, повторення. Інша група ефектів заснована на безперервній зміні Δt. Це ефекти: дует, хор тощо.

Лінії затримки входять до складу реверберatorів - пристроїв, що імітують природну реверберацію.

Розрізняють аналогові і цифрові реверберatори. До перших відносять реверберaційні камери, листовий, пружинний і магнітний реверберatори.

Реверберaційна камера – приміщення з огородженнями, що добре відбивають звук.

В листовому реверберatорі використовують відбиття коливань від меж металевого листа. Коливання збуджують датчиком, схожим за конструкцією на

електродинамічний гучномовець. Для знімання коливань використовують аналогічний або п'єзоелектричний перетворювач.

Магнітний ревербератор будують на основі магнітофонної ЛЗ. Для ускладнення часової структури затриманих сигналів використовують декілька відтворювальних головок (від 4 до 28 в різних моделях).

До теперішнього часу аналогові ревербератори втратили значення у зв'язку з широким розповсюдженням цифрових реверберatorів. Цифровий ревербератор є швидкодійним процесором, забезпеченим на вході АЦП, а на виході ЦАП.

На рис. 7.11 наведено структурну схему багатофункціональної лінії затримки з відводами та часові характеристики, що може створювати така система.

Процесори спецефектів забезпечують виконання різних видів оброблення звукових сигналів, серед яких можна виділити наступні: реверберація (reverberation), ділей – затримка (delay), хорус (chorus), фленжінг (flanging), фейзінг (phasing), зсув висоти тону (pitch shift), зміна часу звучання (time modification), морфінг і вокодінг (morphing, vocoding) і багато інших, кількість яких невпинно збільшується [19].

Велику групу спецефектів засновано на використанні часової затримки сигналів. До неї відносять штучну реверберація і пов'язані з нею види оброблення (ділей, луна, хорус, фейзінг, фленжінг тощо).

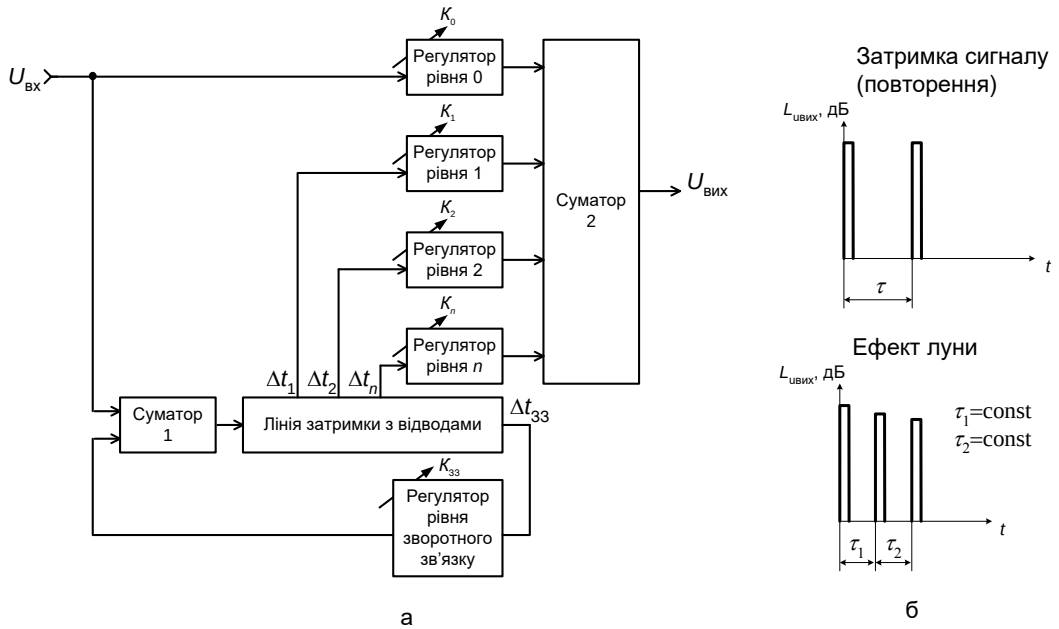


Рис. 7.11. Структурна схема багатофункціональної лінії затримки (*а*) та часові характеристики створюваних ефектів (*б*)

Ефект дуету одержують додаванням основного і затриманого сигналів, причому час затримки змінюють за випадковим законом в межах (2...25) мс. Ефект хору в разі звучання одиночного голосу або інструменту досягають аналогічно ефекту дуету, тільки до основного сигналу додають не один, а декілька затриманих, причому тривалість затримок змінюють незалежно одну від одної.

В стереофонічному звучанні використовують ефект "фленджера" (від слова flange – край, фланг) – ефект періодичного зсуву уявного джерела звуку ліворуч-праворуч від слухача. Ефект заснований на введенні в сигнали змінних затримок

або формуванням гребінчастої АЧХ з горбами і западинами, що перемежаються. Фленжінг - ефект, для якого використовують лінію затримки зі зворотним зв'язком. У разі модуляції часу затримки в межах (5…15) мс відбувається зсув регулярно розташованих резонансних піків, частоти яких знаходяться в гармонійному співвідношенні один з одним, що створює ілюзію вібрато в звуці, надаючи йому певну жвавість.

Файзер – ефект, що працює так, що у затриманого сигналу виділяють якусь опорну частоту, у якої змінюють фазу під керуванням генератора низької частоти. У результаті виникає дуже специфічний ефект, що особливо яскраво виявляється в стереозвучанні. Фейзінг реалізують завдяки ефекту гребінчастої фільтрації, який виникає, якщо сигнал з виходу лінії затримки додати до вихідного сигналу в разі частотно-залежної модуляції часу затримки в межах 1…5 мс (фазова модуляція).

Контрольні запитання.

1. Зазначте необхідність і напрямки оброблення параметрів звукових сигналів.
2. Зазначте параметри, за якими здійснюють оброблення звукових сигналів.
3. Надайте класифікацію пристроїв оброблення звуку за різними класифікаційними ознаками.
4. Зазначте пристрої оброблення звуку за рівнем та динамічним діапазоном.
5. Зазначте пристрої оброблення звуку за частотою.
6. Зазначте пристрої оброблення звуку за часовими параметрами та формуванням звукових ефектів.
7. Наведіть основні технічні параметри пристроїв оброблення звуку, що характеризують функціональні можливості пристроїв.
8. Наведіть основні технічні параметри пристроїв оброблення звуку, що характеризують якісні показники та наведіть узагальнені числові значення технічних показників.
9. Надайте графічно зображення регуляторів рівня та опишіть властивості.
10. Надайте графічно структуру автоматичних регуляторів рівня та опишіть особливості та властивості регулювання.
11. Наведіть графічно амплітудні та регулювальні характеристики регуляторів рівня.
12. Зазначте призначення, використання, принцип регулювання рівня такими пристроями як: компресор, експандер, лімітер, гейт.
13. Наведіть графічно та опишіть принцип оброблення динамічного діапазону компандерною системою.
14. Надайте графічно зображення регуляторів частотної характеристики (спектру) та опишіть властивості.
15. Надайте графічно структуру двосмугового регулятора тембру та опишіть особливості та властивості регулювання.
16. Надайте графічно структуру графічного еквалайзера та опишіть особливості та властивості регулювання.
17. Надайте графічно структуру параметричного еквалайзера та опишіть особливості та властивості регулювання.
18. Зазначте призначення, використання, принцип регулювання частотної характеристики фільтрами нижніх, високих, середніх (смугових) частот.
19. Зазначте призначення, принцип та особливості оброблення часових параметрів звукових сигналів.
20. Надайте графічно структуру багатофункціональної лінії затримки з відводами та опишіть особливості та властивості формування вихідного сигналу.
21. Наведіть звукові ефекти, що застосовують оброблення часових параметрів сигналів.

8. АНАЛОГО-ЦИФРОВЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ СИГНАЛІВ. ЦИФРОВИЙ ЗВУКОЗАПИС

Ключові слова: аналого-цифровий перетворювач, аналоговий, багаторівневий, байт, біт, відлік, відтворення, двійковий, демодулятор, дискретизація, завадостійке кодування, запис, ІКМ сигнал, імпульсно-кодова модуляція, інтерполяція інформаційний сигнал, кадр, канальне кодування, компакт-диск, квантування, лазер, магнітна головка, магнітна стрічка, магнітний запис, магнітооптичний, магнітооптичний ефект, маскування, мінідиск, модулятор, надлишковість, накопичувач, напівпровідниковий, носій, обертовний барабан, оптичний, оптичний контраст, перетворення, піт, похило-рядковий, пристрій вибірки-зберігання, програвач компакт-дисків, розряд, розрядність, семпл, сигналограма, символ, синхронізація, стиснення інформації, твердотільний, термомагнітний ефект, тиражування, флет, флуоресцентний, формат, цифровий, цифровий запис, цифровий магнітофон, швидкість передавання, шарова структура диска, щільність запису, ATRAC, CD-Audio, CD-R, CD-ROM, FM-диск, DVD-Audio, R-DAT, S-DAT, Super Audio CD.

8.1. Основні поняття перетворення аналогового сигналу в цифровий

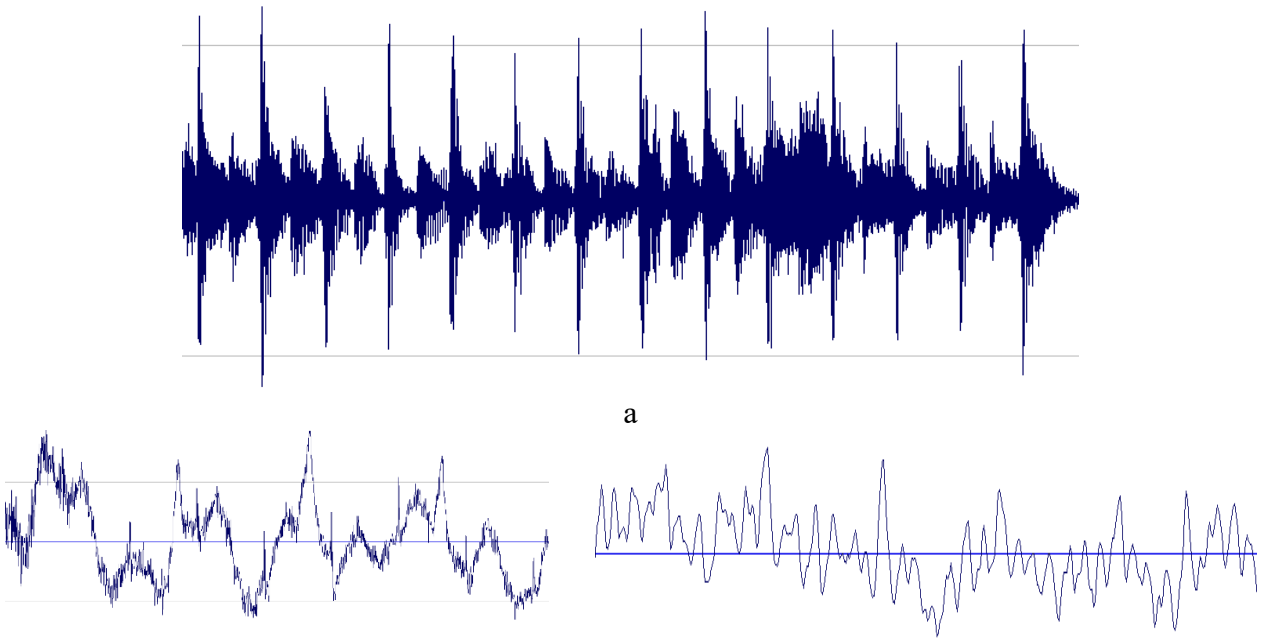
Аналоговий звуковий сигнал являє собою неперервний сигнал, форма якого постійно змінюється у часі. Основними параметрами, що характеризують аналоговий сигнал і, відповідно, його форму є амплітуда або середнє значення рівня сигналу та частота зміни форми сигналу. Кожне миттєве значення сигналу (за його наявності) характеризують конкретним, причому, як правило, відмінним від попереднього і наступного миттєвого значення, значенням рівня сигналу. Миттєве значення сигналу може приймати як позитивну, так і негативну величину, адже аналоговий сигнал може бути перемінним.

Важливо нагадати, що акустичний сигнал, що людина може сприймати слуховим органом і який оточує людину, характеризують неперервною зміною атмосферного тиску. І ця зміна може відбуватись за величиною зміни тиску – рівнем, та частотою.

Для електричного сигналу, з яким працює звукотехнічне обладнання, основними параметрами, що визначають зміну форми сигналу у часі, є напруга або рівень сигналу та частота.

На рис. 8.1 наведено форму (сигналограму) звукового сигналу з різним масштабуванням у часі.

Цифровий сигнал являє собою набір дискретних числових значень напруги, причому значення напруги може мати дві величини (двійкове числення) – напруга, що відповідає умовній «1» (значення напруги, наприклад, U=5 В) та напруга, що відповідає умовному «0» (значення напруги U=0 В). Кожний такий електричний сигнал являє собою один двійковий розряд, що називають бітом. Залежності від кількості одночасно опрацьовуваних двійкових сигналів (кількості каналів для передавання бітів інформації) можна отримати різну кількість комбінацій чередування бітів. Так, наприклад, для двобітного каналу (дворозрядне квантування) кількість можливих комбінацій 0 та 1 може бути чотири – 00, 01, 10, 11. Для трирозрядного квантування кількість можливих комбінацій 0 та 1 вісім (табл. 8.1). Для N-бітного каналу кількість можливих комбінацій 0 та 1 буде 2^N. Для 8-розрядного 2^8=256 комбінацій.



а б в

Рис. 8.1. Сигналограма звукового сигналу з різним масштабуванням у часі:
а – 1:256, *б* – 1:2, *в* – 4:1

Таблиця 8.1 Комбінації чередування біт для трирозрядного квантування

0	1	2	3	4	5	6	7
000	001	010	011	100	101	110	111

Такий сигнал називають імпульсно-кодово модульованим (ІКМ). На рис. 8.2,*а* наведено форму аналогового сигналу та відповідний ІКМ сигнал (рис. 8.2,*б*).

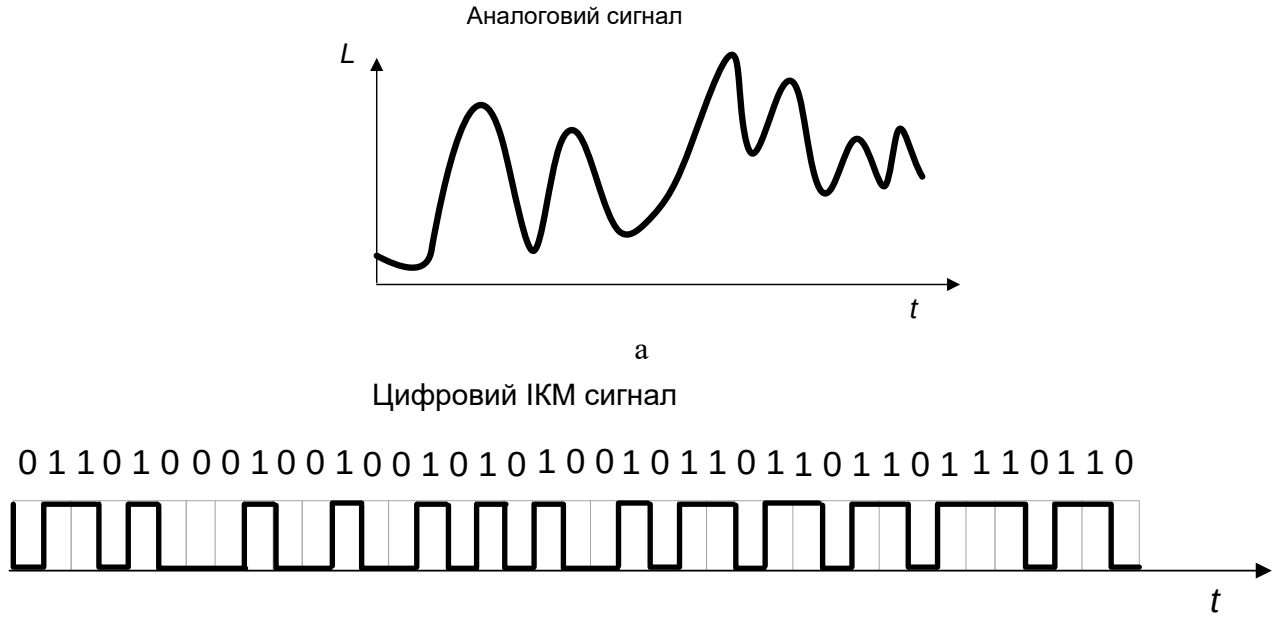


Рис. 8.2. Вигляд аналогового сигналу (*а*) та його цифровий відповідник (*б*)

Для перетворення аналогового звукового сигналу в цифровий виконують

процедуру аналого-цифрового перетворення, що іноді називають оцифровуванням звукового аналогового сигналу. Пристрій для реалізації такого перетворення називають аналого-цифровим перетворювачем (АЦП).

Перетворення звукового сигналу в цифрову форму полягає у вимірюванні миттєвих значень його амплітуди через рівні проміжки часу і поданні отриманих значень, званих відліками, у вигляді послідовності чисел [24].

Числа, отримані у результаті аналого-цифрового перетворення, виражають у двійковій системі числення, тобто у вигляді комбінації всього двох цифр - нуля (0) і одиниці (1).

Процес вимірювання миттєвих значень (вибірок) безперервного аналогового сигналу через відповідні проміжки часу і перетворення їх у послідовність називається дискретизацією. Швидкість проходження відліків за секунду називають частотою дискретизації (частотою вибірок, частотою семплювання), а відстань між двома сусідніми відліками - періодом дискретизації (рис. 8.3).

Визначення чисельного значення величини вибірки (відліку) називають квантуванням. Для цього весь діапазон можливих змін амплітуди сигналу, що перетворюють, ділиться на множину рівнів квантування, кількість яких визначає розрядність використовуваного для цього двійкового числа. Чим більше число розрядів квантування, тим менше відстань між рівнями квантування (крок квантування) і тим вищою є точність перетворення.

В процесі квантування за величину вибірки (відлік) приймається номер найближчого рівня квантування (рис. 8.3).

У більшості нині існуючих цифрових звукових форматів використовують 16-розрядне квантування. Це дозволяє отримати точність перетворення для N=16

$$1/2^N = 1/2^{16} = 1/65536 \text{ (+32768/-32768)}.$$

З числом розрядів квантування N фізично пов'язаний динамічний діапазон D звукового сигналу,

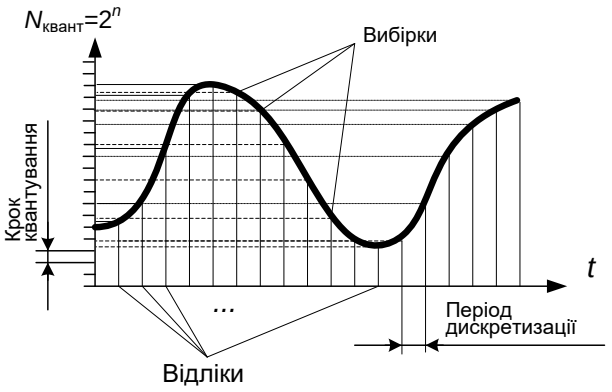
$$D = 6N + 1{,}76 \text{ дБ} \approx 6N + 2 \text{ дБ}.$$

Отже, для цифрових систем звукозапису з 16-розрядних квантуванням

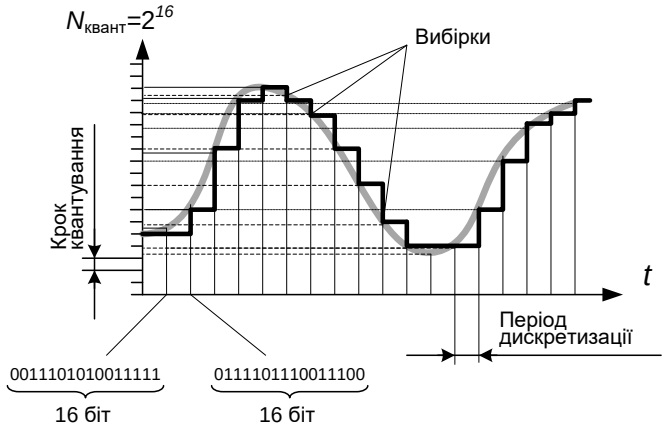
$$D = 6\times16 + 2 = 98 \text{ дБ}.$$

Вибір частоти дискретизації в загальному випадку визначає відома теоремою Шеннона (теоремою відліків), яка звучить так: «якщо найвища частота в спектрі функції $S(t)$ менше ніж $f_М$, то функція $S(t)$ повністю визначається послідовністю своїх значень в моменти, віддалені один від одного не більше ніж на $1/(2f_М)$ секунди».

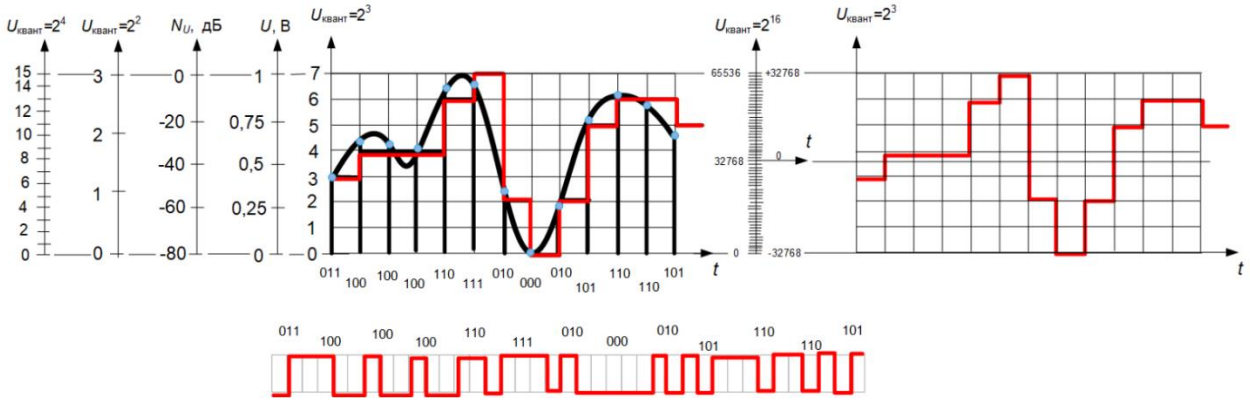
В даному випадку під функцією $S(t)$ слід розуміти неперервний аналоговий звуковий сигнал, а під частотою $f_М$ - найвищу (максимальну) частоту необхідного звукового діапазону. Якщо необхідно точно відобразити аналоговий сигнал у діапазоні до $f_М$, то відліки мають слідувати з періодом у два рази меншим, ніж період частоти $f_М$. Іншими словами, частоту дискретизації слід вибирати так, щоб вона була, щонайменше, у два рази вище максимальної частоти звукового діапазону.



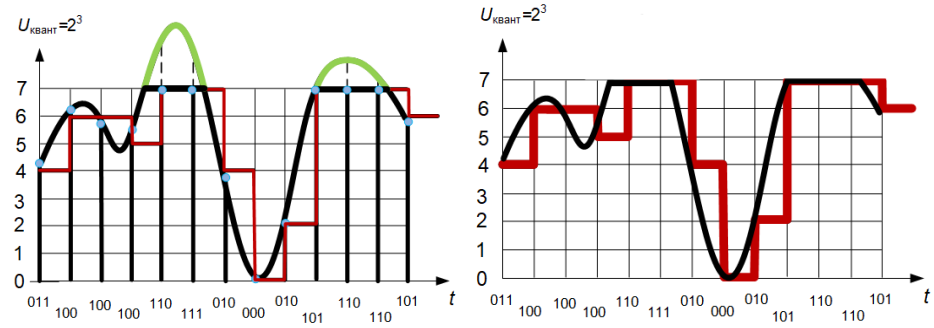
а



б



в



г

Рис. 8.3. Дискретизація та квантування аналогового сигналу:
дискретизація вихідного аналогового сигналу (*а*), квантування (*б*), розрядності квантування (*в*), кліпування (обрізування) в разі перевантаження (*г*)

При цьому мінімально можливу частоту дискретизації $F_д = 2f_М$ називають

частотою Найквіста $F_н$

$$F_н = 2f_М.$$

На практиці частота дискретизації $F_д$:

$$F_д = (2{,}1 \ldots 2{,}4)\, f_М.$$

Найчастіше необхідну смуга звукових частот обмежують 20...22 кГц, а частоту дискретизації при цьому обирають рівною 44,1 або 48 кГц.

Це обумовлено тим, що між найвищою частотою звукового діапазону $f_М$ і половиною частоти дискретизації $F_д/2$ повинен бути деякий інтервал, в який потрібно помістити зріз амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) фільтра низьких частот (ФНЧ), розташованого на вході блоку аналого-цифрового перетворення.

Структуру тракту аналого-цифрового перетворення наведено на рис. 8.4,*а* [24].

ФНЧ, який називають антиелайсинговим фільтром, потрібен для того, щоб жодна складова спектра вище $F_д/2$ не потрапила на перетворювач. Адже спектр дискретизованого сигналу має періодичну структуру. Крім низькочастотної частини, що визначає власне звуковий сигнал, він має ще й високочастотні компоненти у вигляді бічних смуг з центрами в точках, кратних частоті дискретизації (рис. 8.5). Якщо спектр звукового сигналу перед перетворенням не обмежити, то його високочастотна частина може потрапити на суміжну бічну смугу. При цьому у перетвореному сигналі виникнуть непереборні спотворення субдискретизації у вигляді паразитних високочастотних складових (рис. 8.5,*а*). Звучання фонограми буде безнадійно зіпсовано.

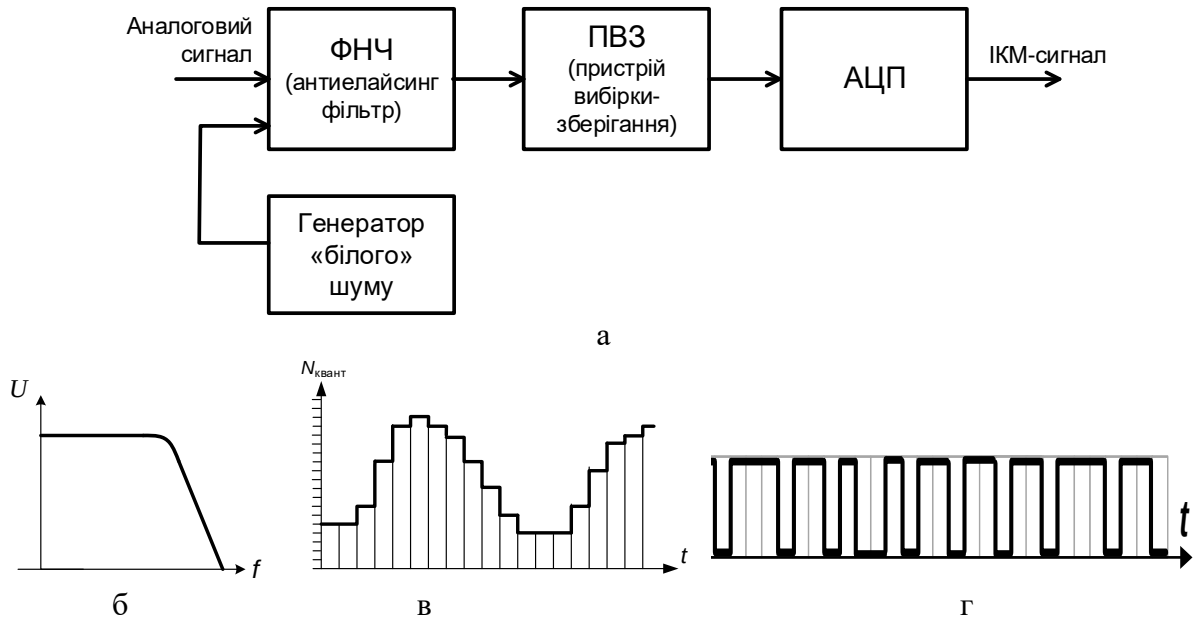


Рис. 8.4. Структура аналого-цифрового перетворення (*а*), АЧХ ФНЧ (*б*), форма сигналу на виході ПВЗ (*в*), форма сигналу на виході АЦП (*г*)

Оскільки в процесі квантування відліки можуть приймати тільки значення кратні кроку квантування Δ, то у разі оцінювання істинного значення вибірки

неминуче буде виникати деяка помилка q (рис. 8.6). Очевидно, що величина помилки дорівнює половині кроку квантування і не залежить від рівня сигналу, що квантують. Функцію $q(t)$ прийнято називати шумом квантування. Шум квантування буде тим нижче, чим менше крок квантування або, що те ж саме, чим більше число розрядів квантування.

Очевидно також, що вплив шуму сильно залежить від рівня аналогового сигналу, що перетворюють. Якщо його амплітуда мала, то виникають характерні спотворення, обумовлені появою вищих гармонік через зубчасту форми шуму квантування. Причому на слух це сприймається саме як спотворення, а не як шум.

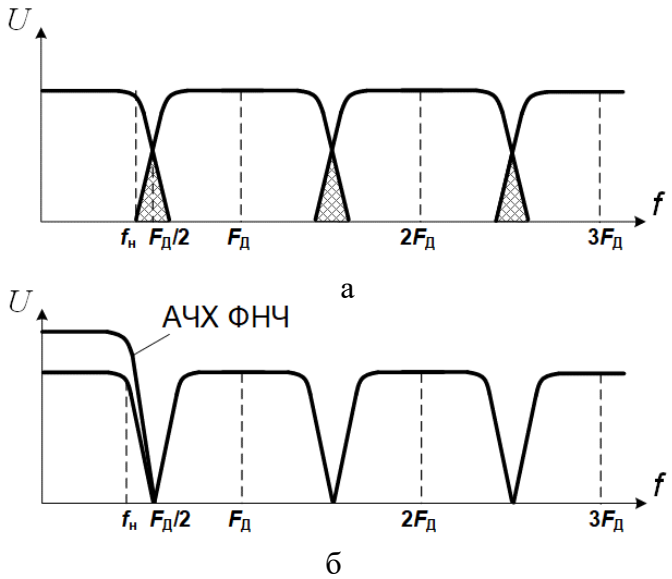


Рис. 8.5. Спектр дискретизованого сигналу, *а* - без ФНЧ; *б* - з ФНЧ

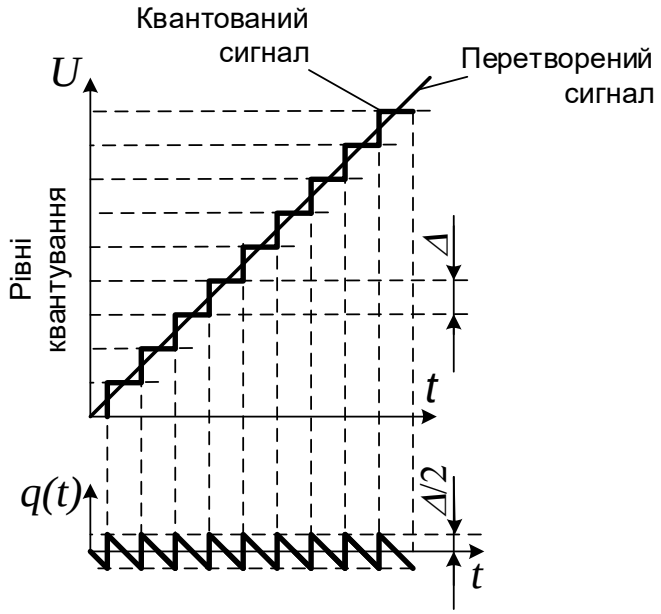


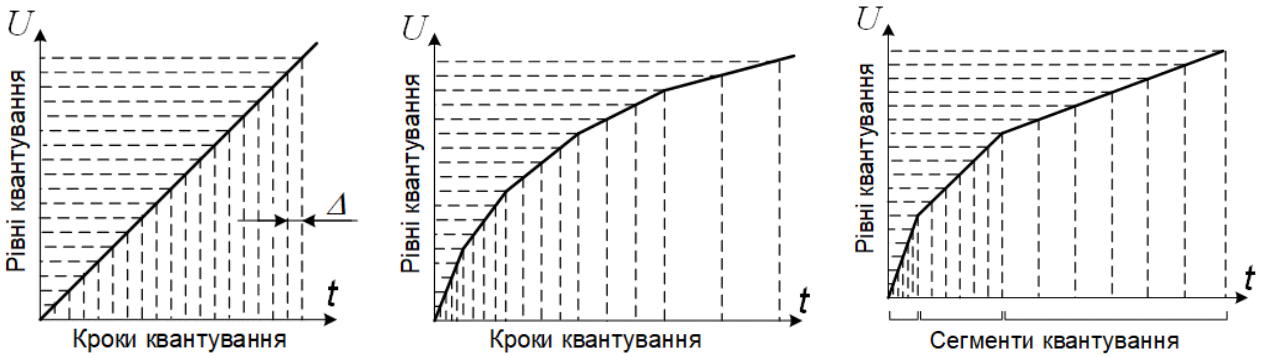
Рис. 8.6. Шум квантування

Послабити вплив таких спотворень можливо додаванням іншого шуму. Якщо підмішати у вхідній сигнал так званий «білий» шум (шум, амплітуда якого практично постійна в широкому діапазоні частот), то кореляція (зв'язок) між

шумами квантування і амплітудою сигналу порушується. При цьому відтворений сигнал вже не буде виглядати спотвореним. Додавання такого шумоподібного маскуючого сигналу (дифера) є важливою частиною процесу перетворення.

Призначення ще одного елемента тракту аналого-цифрового перетворення - пристрою вибірки і зберігання (ПВЗ) (рис. 8.4) - утримання виміряного миттєвого значення сигналу на відповідному рівні квантування до наступної вибірки. Після цього вузла сигнал має ступінчасту форму (рис. 8.4,*в*).

До цих пір мова йшла про такий вид аналого-цифрового перетворення, коли відстань між рівнями квантування однакова у всьому діапазоні зміни амплітуди перетворюваного сигналу. Цей вид квантування називають лінійним або квантуванням з постійним кроком (рис. 8.7, *а*).



а б в

Рис. 8.7. Лінійне та нелінійне квантування
а - лінійне; *б* - нелінійне логарифмічне; *в* - нелінійне трисегментне

Однак, іноді для перетворення використовують нелінійне квантування або квантування з змінним кроком (рис. 8.7,*б*). У цьому випадку крок квантування збільшується зі збільшенням рівня сигналу, що перетворюють. Для слабких сигналів крок квантування малий, для сильних сигналів - великий. Такий вид квантування дозволяє краще передавати слабкі сигнали, оскільки відношення сигнал/шум в цьому випадку буде вище, ніж в разі лінійного квантування.

Крім того, нелінійне квантування дозволяє значно підвищити щільність запису (або швидкість передавання інформації), оскільки невеликим числом розрядів можна передавати великий динамічний діапазон сигналу.

Однак, за всіх своїх переваг, нелінійне квантування має один дуже суттєвий недолік. Слабкі сигнали (або обертони) на тлі сильного сигналу (на ділянці характеристики з широким кроком квантування) можуть сильно спотворюватися або навіть зникати зовсім. Тому якість звуку у разі нелінійного квантування завжди гірша, ніж для лінійного [24].

Процес зворотного перетворення послідовності відліків в аналоговий сигнал називають цифро-аналоговим перетворенням, а пристрої для його здійснення – цифро-аналоговими перетворювачами (ЦАП).

На виході ЦАП утворено ступінчастий аналоговий сигнал, величина сходинок якого дорівнює чисельному значенню відповідних відліків. Щоб з ступінчастого сигналу отримати гладку криву, його необхідно пропустити через ФНЧ з характеристикою, аналогічною тій, яку мав ФНЧ на вході АЦП (рис. 8.8). Тут також

важливо, щоб спектр звукового діапазону не перекривався спектром найближчої бічної смуги, бо це також призведе до появи спотворень.

Для цього характеристика ФНЧ повинна мати достатньо крутий зріз - такий же, як у антиелайсингового фільтра в разі аналого-цифрового перетворення. Порядок такого ФНЧ повинен бути не нижче 12-го. Однак побудова фільтрів високого порядку пов'язана з деякими труднощами. Тут потрібне застосування прецизійних пасивних елементів і високоякісних операційних підсилювачів з хорошою температурною і часовою стабільністю. Причому, оскільки все це призначене для використання в побутовому пристрої невеликих розмірів, всі компоненти повинні бути до того ж малогабаритними.

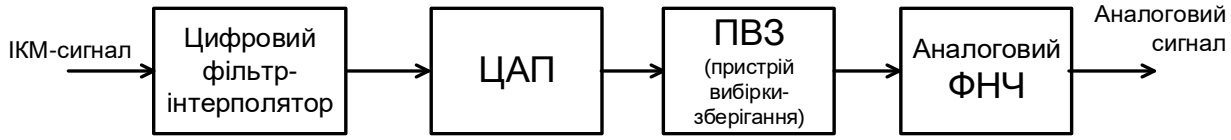


Рис. 8.8. Структура цифро-аналогового перетворення

Крім того, будь-який фільтр високого порядку має істотну нелінійність фазової характеристики. А це призводить до помітних на слух спотворень звуків з крутими перепадами рівня - барабанів, тарілок, рояля тощо.

Щоб полегшити вимоги до фільтрації перетвореного сигналу, перед ЦАП встановлюють цифровий фільтр. Виконати такий фільтр з потрібними характеристиками значно простіше, ніж аналоговий. Він може мати досить високий порядок і при цьому мати лінійну фазову характеристику.

Однак, характеристика цифрового фільтра, як і спектр цифрового сигналу, теж має періодичну структуру і теж повторюється на частотах, кратних частоті дискретизації. Тому, якщо цифровий фільтр буде працювати на частоті дискретизації $F_д$, то обмежити високочастотні компоненти все одно не вдасться.

Проблема може бути вирішена шляхом штучного збільшення частоти дискретизації $F_д$ в кілька разів. При цьому відсутні значення сигналу обчислюють за відомими значеннями методами інтерполяції (рис. 8.9). Схема блоку цифро-аналогового перетворення у цьому випадку набуде вигляду, наведеного на рис. 8.8.

Передискретизація дозволяє значно знизити вимоги до характеристики аналогового ФНЧ. Навіть подвоєння $F_д$ дає можливість зробити зріз його АЧХ досить пологим (рис. 8.10,*а*). А у разі збільшення частоти дискретизації в чотири, вісім і більше разів, вимоги до аналогового ФНЧ знижуються до цілком можливих (рис. 8.10,*б* і *в*). Внаслідок цього відношення сигнал/шум, а отже, і динамічний діапазон, можна зробити навіть більшим, ніж обумовлена 16-розрядним квантуванням величина в 98 дБ [24].

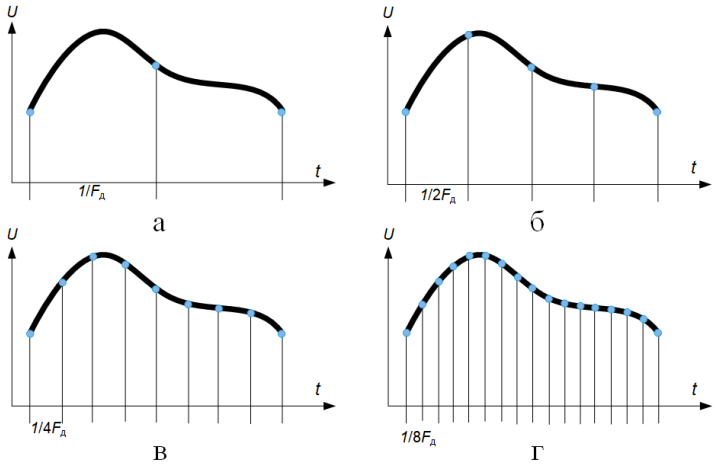


Рис. 8.9. Підвищення частоти дискретизації завдяки інтерполяції:
без підвищення (*а*), збільшення в 2 рази (*б*), збільшення в 4 рази (*в*), збільшення в 8 раз (*г*)

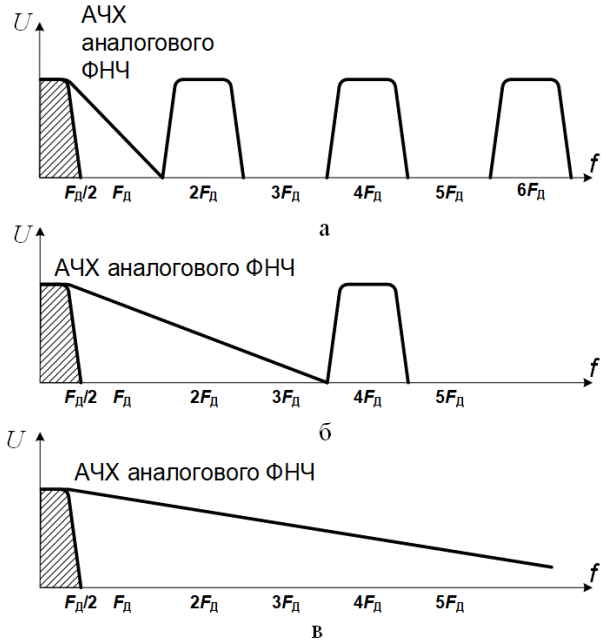


Рис. 8.10. АЧХ цифрового та аналогового ФНЧ після двократного (*а*), чотирикратного (*б*) та восьмикратного (*в*) підвищення частоти дискретизації

8.2. Особливості цифрового звукозапису та порівняння з аналоговим звукозаписом

Загальне питання, що краще – аналоговий чи цифровий звукозапис – завжди залишається актуальним. Вирішення цього питання залежить від таких напрямків: звукозапис у виробництві чи для споживача; фізика процесу формування сигналу запису та його ідентичність відносно оригіналу; застосовуване звуковідтворювальне обладнання у споживача; умови та процес звуковідтворення тощо.

Перше, що необхідно зазначити, - цифровий звукозапис достатньо актуальний в час стрімкого застосування цифровізації життя, наявності персональних комп’ютерів у кожного споживача медіаконтенту, до якого відносять і звуковий

контент, а для споживача важливо поєднати звук і комп'ютер; появою масово сучасного високоякісного звукотехнічного обладнання, що використовує цифрові технології з постійним удосконаленням технологій і форматів звукозапису тощо.

Аналого-цифрове перетворення звукового сигналу – це, по суті, повне перетворення форми сигналу. Сигнал у аналоговій формі і у цифровій ніяким чином не співпадають за формою. Якщо аналоговий сигнал на грамплатівці, що створено різцем запису; повторює коливання акустичного сигналу, на магнітній фонограмі коливання акустичного сигналу повторено зміною намагніченості у магнітній плівці, тобто, форма зміни сигналу залежно від технології запису практично не змінюється, то у цифровому сигналі ніякої відповідності немає і не може бути. Якщо втратяться закони аналого-цифрового перетворення, то відновити сигнал з цифрового виду не буде можливості [19].

За суб'єктивного сприйняття звукових сигналів теж не все так просто. Для добре натренованого слухача, музиканта, звукорежисера, використовуючи звуковідтворювальне аналогове обладнання високої якості, відмінності між аналоговим та цифровим сигналом можуть бути достатньо відчутними. Звичайний пересічний слухач, зокрема, використовуючи для звуковідтворення побутове обладнання, відмінності може і не помітити, більш того, іноді цифровий запис для нього може здаватися кращим, ніж цифровий. Це пояснюють деякими особливостями цифрового звукозапису, наприклад, звуженням динамічного діапазону, що збільшує загальну гучність звучання, або наявністю додаткових високочастотних складових, спричинених недоліками фільтрації цифрового сигналу, що призводить до більш «гострого» звучання.

Аналогове звучання більш м'яке, у той же час більш проникливе та викликає більше емоцій під час прослуховування, адже аналоговий запис і, відповідно, аналогове обладнання доносять до слухача більш яскраві нюанси гри самого музиканта (виконавця), його емоційний стан у процесі запису фонограми, навколишнє оточення і умови запису тощо, тобто те, що може відбуватися у реальному житті і у реальній концертній залі або студії звукозапису.

Більшість професійних музикантів у разі запису музичних альбомів намагаються записувати спочатку на аналоговому обладнанні, а потім формують цифрову копію для масового використання. Недарма історія зберігає такі факти: багато музикантів, які вперше "записалися" на компакт-диски, були дуже розчаровані як і різницею звучання "цифри" та студійної аналогової майстер-стрічки, яка була первинним матеріалом для виробництва компакт-дисків. Звичайно, з того часу цифрові технології зробили величезний крок уперед, однак... До того ж сучасне молоде покоління, у більшості, звикла до оцифрованого звуку і не завжди може порівнювати звучання аналогових фонограм з цифровими.

Для будь-якого цифрового джерела звукових програм блок цифро-аналогового перетворення є визначальною ланкою тракту запису-відтворення, відповідальним за якість і характер звучання обладнання. Від нього залежать всі основні параметри звуку - відношення сигнал/шум, динамічний діапазон, смуга відтворюваних частот, а також його тембральне забарвлення. Звичайно, динамічний діапазон і відношення сигнал/шум для носіїв, що використовують лінійне квантування (як наприклад CD або DVD-Audio) у першу чергу визначає його розрядність, а смугу відтворюваних

частот - частота дискретизації [20].

Відношення сигнал/шум та динамічний діапазон звукового сигналу можна покращити, застосовуючи більш складну та якісну схемотехніку та компоненти тракту цифро-аналогового перетворення, в тому числі і самого перетворювача, а також способом виконання цифрових і аналогових ФНЧ.

Смугу відтворюваних частот, на жаль, розширити неможливо. Так для CD-Audio граничне значення верхньої межі частотного діапазону - 20 кГц. Це обмеження закладено ще при підготовці фонограми для запису на майстер-диск. Усі частотні компоненти вище 20 кГц, ретельно фільтрують, точніше вище частоти 22,05 кГц, що відповідає половині частоти дискретизації для формату CD-Audio, адже частота дискретизації дорівнює 44,1 к Гц. Враховуючи, що зріз реальної амплітудно-частотної характеристики не буває абсолютно вертикальним, запас у 2,05 кГц потрібен для того, щоб забезпечити перехід від смуги пропускання до смуги затримування. Якщо залишиться хоч один компонент вище 22,05 кГц, то в фонограмі з'являться непереборні спотворення, зумовлені самим принципом аналого-цифрового перетворення.

Тому безглуздо намагатися розширити смугу відтворюваних частот в програвачі компакт-дисків або іншому цифровому пристрої, що використовує частоту дискретизації 44,1 кГц. Складових спектра вище 20 кГц там все одно немає (принаймні корисних), до того ж, щоб отримати і ці 20 кГц, необхідно використовувати всі існуючі на сьогоднішній день можливості - штучне підвищення частоти дискретизації, ефективну цифрову фільтрацію, а також добротні аналогові ФНЧ з малою нерівномірністю в смузі пропускання. Особливо складно це зробити на краях діапазону - поблизу одиниць герц і поблизу 20 кГц. Тому у більшості реальних моделях програвачів компакт-дисків формату CD-Audio частотний діапазон становить 20 Гц - 18 кГц, що у середньостатистичний умовах домашнього прослуховування особливо сильного впливу на звучання фонограм це не робить.

Отже, частотний діапазон цифрового звукозапису, зокрема, формату CD-Audio, визначено частотою дискретизації 44,1 кГц і обмежено верхньою теоретичною частотою 20 кГц, яка насправді сягає (16…18) кГц. Причому, у процесі АЦП та ЦАП 100% відновлення сигналу не відбувається і до реального сигналу відтворення буде додано специфічні спотворення, викликані власне перетворенням, що призводять до наявності жорсткості у звучанні і швидкого стомлення сприйняття звуку на верхніх частотах. Для, нібито, покращення звучання застосовують різноманітні оброблення, зокрема, передискретизація, переквантування сигналу, але і це призводить до додаткових, неприємних для сприйняття спотворень.

Частотний діапазон високоякісного аналогового студійного запису, сигнал для якого являє собою неперервний сигнал у часі, може сягати на верхніх частотах до (24…28) кГц і вище. Причому ці сигнали більш натуральні. Хоча людина і не чує ці частоти і аналоговий запис, все ж таки, вносить деякі спотворення, але це у чутному діапазоні людини сприймається саме більш натурально, чистіше і не так болісно.

Разом з тим, точність аналого-цифрового перетворення визначає ще і

розрядністю квантування аналогового сигналу, причому за різними технологіями це може бути послідовність відліків (як у CD, DAT, DVD-Audio), так і у вигляді безперервного однорозрядного потоку (Super Audio CD).

Для CD-Audio стандартизовано розрядність 16 біт, тобто, послідовність 16-розрядних відліків з частотою 44,1 кГц. Будь-яке перетворення сигналу з квантуванням у 18, 20 або 24 розряди реально кінцевий результат не покращить. Те ж саме вийде у разі формування 16-розрядних відліків за сигма-дельта модуляцією і подальшим зниженням частоти дискретизації до 44,1 кГц. Реально, у CD-Audio в разі застосування 16-розрядних АЦП можна отримати результат, що відповідає 15-розрядному, тому підвищення розрядності лінійних АЦП або застосування однорозрядного кодування може призвести до отримання якості, що відповідає дійсним 16 розрядам.

Найкращі результати дають однорозрядні АЦП з використанням сигма-дельта модуляції. З цієї причини, а також внаслідок їх простоти і дешевизни, вони отримують все більш широке поширення на практиці. Тільки з їх застосуванням можна отримати реальну точність у 20 або 24 розряди, яка потрібна у разі підготовки матеріалу для запису дисків DVD-Audio.

Перетворення однорозрядного цифрового потоку у послідовність відліків не потрібно, якщо мова йде про підготовку матеріалу для запису на диск Super Audio CD (SACD) [25].

Якщо ж зазначити особливості форматів, за якими звукову інформацію записують на носій у формі *n*-розрядних відліків (CD, DAT, MD, DVD-Audio), для відтворювального пристрою якість вихідного матеріалу визначає тільки параметри квантування - розрядність і частота дискретизації. За умови, звичайно, що ці параметри повністю забезпечено на етапі аналого-цифрового перетворення, незалежно від того, яким саме способом воно проводилося.

Якщо джерелом звукової інформації є компакт-диск, то подібний матеріал, представлений на ньому у вигляді 16-розрядних відліків, що слідують з частотою 44,1 кГц, номінально дозволяє отримати відношення сигнал/шум і динамічний діапазон близько 98 дБ, коефіцієнт нелінійних спотворень 0, 0015% і смугу частот до 20 кГц. Загалом, цього цілком достатньо, щоб якість звучання задовольняло самого вимогливого слухача. Для порівняння: кращі аналогові записи можуть забезпечити динамічний діапазон близько (60-70) дБ, а коефіцієнт нелінійних спотворень порядку (0,1-0,3)%.

Але у будь-якого цифрового джерела (навіть за умови реалізації номінальних якісних характеристик) є одна особливість. Величини відношення сигнал/шум і коефіцієнта нелінійних спотворень справедливі тільки для сигналу з амплітудою, близької до максимальної. Якщо ж у фонограмі є фрагменти тихого звучання - скажімо, такого, який кодують трьома-чотирма розрядами, то співвідношення між корисним сигналом і шумом квантування стрімко погіршується. Наприклад, для рівня сигналу, для кодування якого досить чотирьох розрядів, величина шуму квантування становитиме вже 1/16 = 6,25%. А це вже багато. Звучання фонограми у цьому випадку збагачено вищими гармоніками і виявляється специфічне «цифрове» забарвлення - як би з «пісочком».

Важливо також те, що для аналогового запису чим слабкіший сигнал, тим він

чистіше, так як у ньому менше нелінійних спотворень, а чим вище рівень сигналу, тим спотворень більше. У цифровому запису все навпаки - чим сильніше сигнал, тим він якісніший, а слабкі сигнали передають з спотвореннями. Причому залежність тут прямо пропорційна - чим менше число розрядів задіяно для кодування звуку, тим гірше його якість. Тому у разі формування цифрового запису часто створюють компресію динамічного діапазону сигналу, що підвищує середню гучність вихідного сигналу.

Однак тут не треба плутати із загальною гучністю звучання фонограми. Якщо просто зменшити рівень відтворення будь-якого цифрового запису, то якість звуку від цього не погіршиться. Йдеться тільки про тихі звуки всередині фонограми з присутністю гучних звуків.

Засоби боротьби з цифровими спотвореннями вже відомі - це використання пере дискретизації, високорозрядних ЦАП і сигма-дельта модуляції.

У разі підвищення частоти дискретизації цифровий фільтр-інтерполятор обчислює проміжні значення відліків. Число розрядів в отриманих результатах при цьому збільшують. Якщо застосовувати для перетворення 16-розрядний ЦАП, то зайві молодші розряди заокруглюють до найближчого 16-розрядного значення. Але якщо необхідно забезпечити відношення сигнал/шум 98 дБ і більше, то має сенс використовувати ЦАП вищої розрядності, наприклад, 18-розрядний або 20-розрядний. Хоча така заміна має сенс у будь-якому випадку.

Крім того, ЦАП сам є джерелом деякого фонового шуму, обумовленого шумами елементів, що входять до його складу. Існують також і інші похибки цифро-аналогового перетворення. Саме через наявність цих похибок багаторозрядні лінійні ЦАП (а також АЦП) далеко не завжди мають реальну роздільну здатність, відповідну номінальній. Крім того, успіх застосування багаторозрядних ЦАП у програвачах компакт-дисків досить сумнівний через те, що джерело цифрового сигналу - власне компакт-диск - все одно залишається 16-розрядним, так що, строго кажучи, який би високорозрядний ЦАП не використовували, роздільна здатність отриманого результату все одно залишиться 16-розряднию. Єдиною, але досить серйозною перевагою збільшення розрядності застосовуваного ЦАП, є зменшення рівня його власних шумів і поліпшення лінійності перетворення.

Іноді замість одного ЦАП в кожному стереоканалі використовують по два. При цьому один з ЦАП перетворює позитивну півхвилю аналогового сигналу, інший - негативну. Ефект від такого підключення у загальному випадку еквівалентний збільшенню роздільної здатності на один розряд. У деталях - все залежить від способу підключення і від самого перетворювача.

Більш ефективним способом боротьби з шумами дискретизації є використання сигма-дельта модуляції - як в системі «Bit Stream», що дозволило забезпечити відношення сигнал/шум 118 дБ, динамічний діапазон - 99 дБ, а коефіцієнт гармонійних спотворень - 0,0015%. Звучання апаратів з такими параметрами відрізняється особливою частотою і прозорістю із хорошим опрацюванням як дуже тихих на чутність, так і дуже гучних звуків.

Важливо зазначити, що цифровий звукозапис достатньо зручний у разі виробництва і відтворення фонограм. У виробництві можна широко

використовувати віртуальні пристрої оброблення звуку, що є у відповідних програмних засобах, можна використовувати ефекти і пом'якшувати недоліки виконання музичних творів музикантами. Для цифрового запису більш економно використовують час роботи. Велику частку роботи виконує цифрове обладнання.

За довговічністю носіїв цифрового запису, то, наприклад, компакт-диски оригінального виробництва мають термін зберігання з моменту появи технології оптичного запису 40 років, причому реальний термін служби становить 25 років, а для дисків CD-R ще менше [19].

Стосовно тривалості зберігання аналогових фонограм на грамплатівках, то механічний запис існує вже більше 140 років, а носії (грамплатівки) залишаються «читабельними» більше 100 років (хоча зберіглись і платівки, яким більше 120 років) Магнітним фонограмам вже більше 80 років, а для створення сучасних RAID-масивів застосовують магнітні носії. Реальні студійні магнітні фонограми, яким вже більше 50 років і зараз використовують для виробництва копій на компакт-дисках.

Необхідно зазначити, що виробництво аналогових фонограм на грамплатівках існує і зараз, магнітні плівки провідних виробників випускають і донині, адже, все ж таки, переграти аналоговий звук не вдається ніякому цифровому звуку.

8.3. Формування цифрового сигналу для запису на носій

Вхідним сигналом для запису на будь-який пристрій запису завжди є оригінальний акустичний аналоговий сигнал. Вихідним сигналом, що відтворює звукотехнічний пристрій звуковідтворення є той же акустичний аналоговий сигнал, перетворений, оброблений і збережений на носії звукозапису.

Часто виникає ситуація перезапису звукового сигналу з одного пристрою на інший. У цьому випадку вхідним сигналом для запису є електричний звуковий сигнал. Однак, в кінці кінців, вихідним сигналом буде той же акустичний сигнал.

У процесі запису акустичний аналоговий сигнал перетворюють в електричний аналоговий мікрофонами або іншими звукознімачами, а потім, за необхідністю або технологією запису, у цифровий сигнал. Отриманий аналоговий або цифровий сигнал може бути записано на носій і у подальшому безпосередньо або після зворотного перетворення для цифрового сигналу може бути відтворений гучномовцями як акустичний сигнал, що сприймає людина.

Процес запису аналогового сигналу наведено вище у розд. 6.

Формування сигналу для запису у цифровому вигляді починають з аналого-цифрового перетворення. Структуру аналого-цифрового перетворення наведено на рис. 8.11.

Для запису звукових сигналів на носій передбачено мінімальний формат подальшого звуковідтворення – стереофонічний, тому вхідними джерелами є два мікрофони й, відповідно, два канали запису. У стереофонічному форматі це лівий (ЛК) та правий (ПК) канали. Цифрові технології дозволяють записувати і багатоканальні джерела сигналів (4, 8, 16 і більше). Тому на рис. 8.11 наведено N входів.

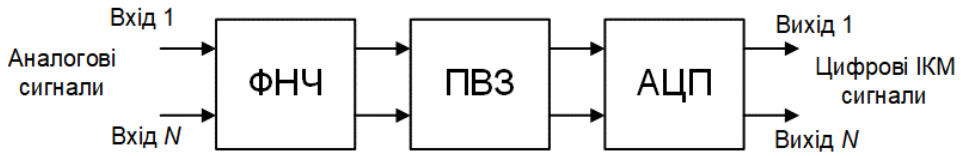


Рис. 8.11. Структура аналого-цифрового перетворення звукових сигналів для запису на носій

У разі аналого-цифрового перетворення для формування цифрового імпульсно-кодово-модульованого (ІКМ) сигналу основними вхідними вузлами є фільтр нижніх частот (ФНЧ), пристрій вибірки-зберігання (ПВЗ) та, безпосередньо, аналого-цифровий перетворювач (АЦП). Для кожного джерела звуку і, відповідно, каналу запису використовують незалежні ФНЧ, ПВЗ та АЦП. На виході АЦМ формують ІКМ сигнали кожного вхідного джерела запису.

Запис на цифровий носій, зокрема, компакт-диск, здійснюють на одній доріжці, що являє собою спіраль незалежно від кількості вхідних каналів для запису. Тому всі паралельні сигнали кожного каналів об’єднують в один послідовний сигнал мультиплексором [11].

Процес формування сигналу запису на цифровий носій наведемо на прикладі оптичного запису на компакт-диск, враховуючи, що вхідними сигналами є два канали стереофонічного формату (ЛК та ПК).

У разі аналого-цифрового перетворення основними параметрами є частота дискретизації та розрядність квантування. Для аналізу процесу формування сигналу для запису на цифровий носій будемо враховувати частоту дискретизації 44,1 кГц та розрядність 16 біт, що відповідає формату CD-Audio.

Аналоговий звуковий сигнал, призначений для запису, надходить на два входи (ЛК і ПК) блоку аналого-цифрового перетворення.

Вхідний сигнал для формату CD-Audio стереофонічний, тому у блоці АЦП має бути два однакових канали аналого-цифрового перетворення. Причому, якщо сам перетворювач досить швидкодійний, то він може бути один і обробляти по черзі обидва канали, підключаючись то до ПВЗ лівого каналу, то до ПВЗ правого каналу. Але це стосується тільки багаторозрядних АЦП. Перетворювачі на основі сигма-дельта модуляції можуть обробляти тільки один канал, тому в блоці АЦП на рис. 8.11 їх має бути два.

Загальну структуру формування сигналу запису наведено на рис. 8.12,*а*.

Вихідними сигналами блоку АЦП (при двоканальному перетворенні) будуть дві послідовності 16-розрядних відліків, що слідують з частотою дискретизації 44,1 кГц (рис. 8.12). За одну секунду в кожному каналі будуть проходити 16·44100=705,6 Кбіт.

За допомогою мультиплексора (рис. 8.12,*а*) ці дві послідовності об'єднують у одну, після чого частота проходження відліків збільшують вдвічі і вона буде становити 88,2 кГц, а швидкість слідування біт за секунду буде становити

$$V_{\text{пер}} = 2 \cdot 16 \cdot 44100 = 1,41 \text{ Мбіт/с}.$$

Важливо нагадати, що для ІКМ сигналу не важлива тривалість імпульсу, тобто

біта, важлива напруга, що відповідає «1» або «0». Тривалість біта визначено кількістю імпульсів синхрогенератора. Причому, початок і закінчення кожного біта повинні починатись синхроімпульсом (рис. 8.12,*б*).

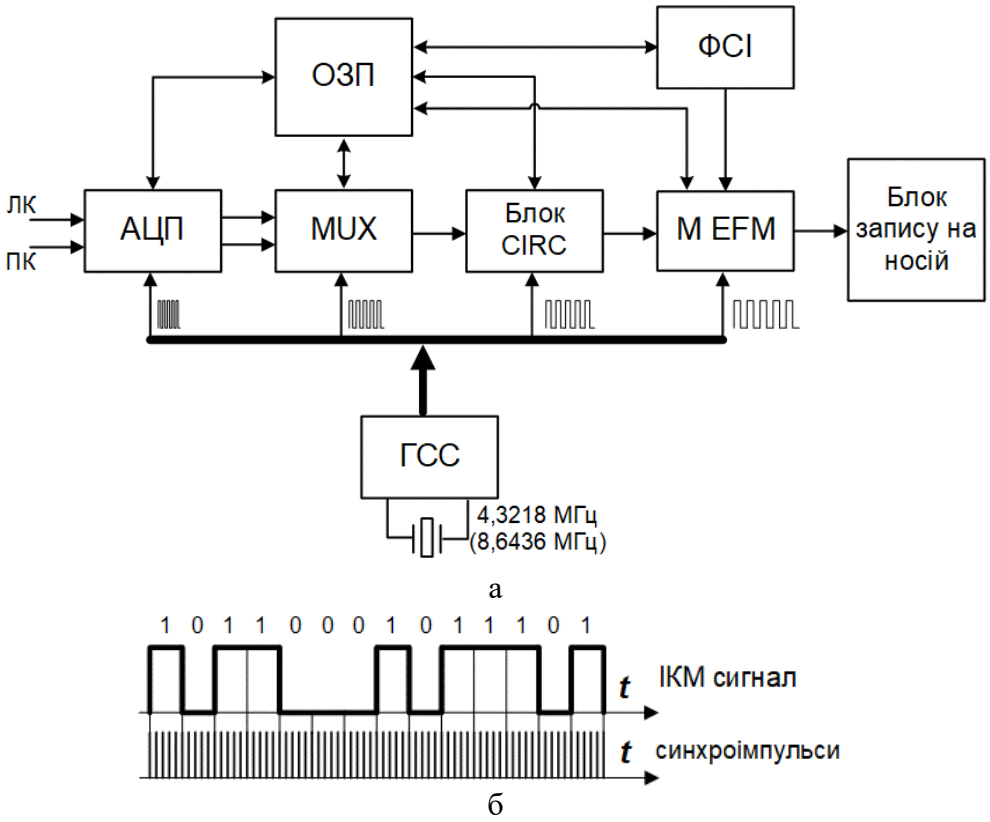


Рис. 8.12. Загальна структура формування сигналу запису (*а*) та синхронізація ІКМ сигналу з синхроімпульсами (*б*)

Роботою апаратури цифрового кодування керує високостабільний генератор синхросигналів (ГСС), який формує всі синхронізуючі послідовності, необхідні для функціонування кожного блоку. Генератор стабілізовано кварцовим резонатором, робоча частота якого дорівнює або кратна основній тактовій частоті і в системі CD ця частота дорівнює 4,3218 МГц. Найчастіше використовують кварц з подвоєною частотою резонансу - 8,6436 МГц (рис. 8.12). Ця частота цілочисельно кратна частоті дискретизації. Зокрема, на АЦП, параметри якого визначено частотою дискретизації 44,1 кГц, на кожний період дискретизації передбачено 98 синхроімпульсів, що отримано шляхом ділення основної тактової частоти 4,3218 МГц на частоту 44,1 кГц.

Враховуючи, що тривалість біта і, відповідно, частота надходження бітів у кожному блоці структури формування сигналу запису різна, на кожний біт буде приходитись різна кількість синхросигналів. Залежно від частоти слідування бітів в процесі перетворення сигналів у вузлах формування сигналу запису кількість синхроімпульсів, що будуть припадати на кожний біт, буде змінюватись (зменшуватись).

Отже, мультиплексор перетворює два паралельні сигнали ЛК та ПК у один послідовний сигнал з частотою слідування відліків 88,2 кГц, а на кожний біт буде припадати 49 синхроімпульсів.

Крім того, безперервну послідовність ділять на блоки - по 6 відліків лівого і 6 відліків правого стереоканалу в кожному. Такі блоки тут називають кадрами. Частота слідування кадрів ($F_{кадр}$) дорівнює

$$F_{кадр} = 44{,}1 \text{ кГц} / 6 = 88{,}2 \text{ кГц} / 12 = 7{,}35 \text{ кГц}.$$

Формування кадру інформації для системи CD-Audio наведено на рис. 8.13 [11].

Робота кожного цифрового блоку формування сигналу запису нерозривно зв'язана з оперативно-запам'ятовуючим пристроєм (ОЗП), адже формування потоків інформації передбачає часове ущільнення, зміну тривалості бітів, часові затримки.

Кожен 16-розрядний відлік ділять навпіл - старші розряди (А) окремо, молодші (В) - окремо. У результаті виходить послідовність 8-розрядних груп (байтів), званих тут символами, частота слідування яких ($F_{симв}$) дорівнює

$$F_{симв} = 88{,}2 \text{ кГц} \cdot 2 = 176{,}4 \text{ кГц}.$$

Кожний кадр при цьому містить 24 символи (рис. 8.13,*в*).

Отримана послідовність далі надходить на вхід блоку захисту від помилок (блок CIRC, рис. 8.12), що складено з двох ступенів завадостійкого кодування інформації кодами Ріда-Соломона і трьох ступенів перехресного перемежовування. Використану в форматі CD система захисту від помилок часто позначають абревіатурою CIRC (Cross Interleave Reed-Solomon Code - код Ріда-Соломона з перехресним перемежовуванням). Тому блок захисту від помилок можна ще назвати кодером CIRC [25].

Завадостійке кодування необхідно для того, щоб у разі зчитування інформації з носія можна було виявити спотворені символи і виправити їх або, принаймні, зробити непомітними на слух. Якщо таких заходів не вживати, то через суцільні потріскування і клацання, спричинені випадінням втрачених або спотворенням символів, що пройшли, слухати відтворювану інформацію буде неможливо.

Блок завадостійкого кодування Ріда-Соломона додає зайві окремі (надлишкові) символи до інформаційного потоку, які умовно описують порядок проходження інформаційного коду, разом з цим відбувається переміщення символів (перемеження) за певним законом для запобігання пакетних помилок (рис. 8.14). На рис. 8.14 символи *a, b, c, d* є інформаційними символами, а символи *k, m, n, g* – символами завадостійкого кодування, які ніякого відношення до інформаційних не мають, є надлишковими у загальному потоці, але необхідними для відновлення корисного сигналу у разі втрати або виникнення помилки.

Перемежовування - це спосіб зміни положення символів в інформаційному потоці, після якого кожні два сусідніх символи розташовано на деякій відстані один від одного. Це потрібно для того, щоб в потоці інформації не створювались тривалі спотворення, які не піддаються корекції кодами Ріда-Соломона. З множиною коротких спотворень декодери Ріда-Соломона можуть легко виявляти та у подальшому відновлювати корисну інформацію.

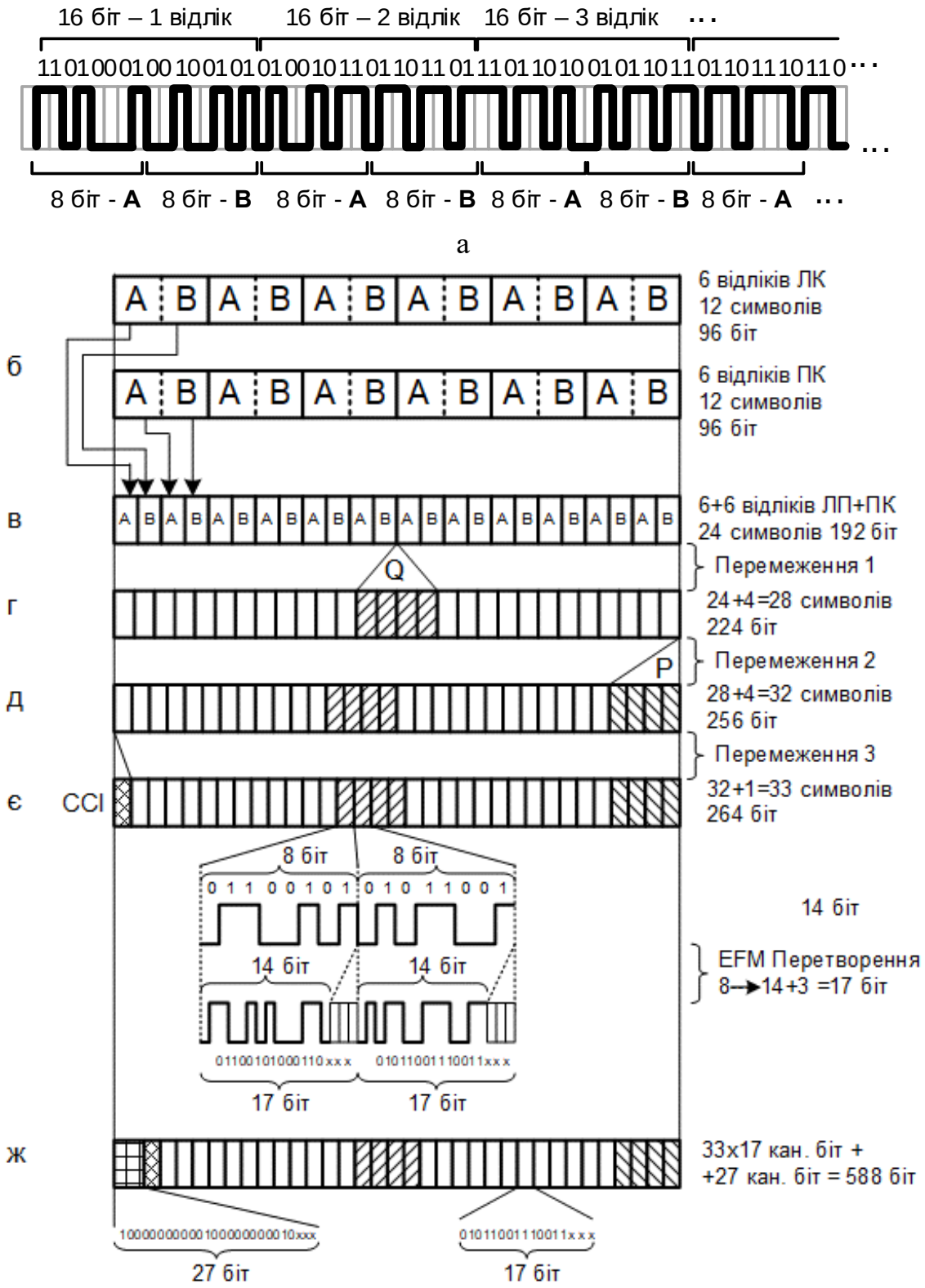


Рис. 8.13. Формування кадру інформації для системи CD-Audio: розподілення ІКМ сигналу на символи (*а*), паралельний потік у 6 відліків ЛК та ПК (*б*), послідовний потік даних кадру (*в*), почергове завадостійке кодування кадру інформації з перемежуванням та додаванням надлишкових символів кодування (*г, д, є*), формування кадру після канального кодування (*ж*)

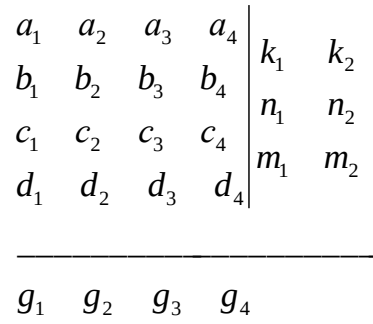


Рис. 8.14. Формування «надлишкових» символів завадостійкого кодування

У процесі формування кадру інформації для подальшого запису на носій після кожного етапу завадостійкого кодування кодами Ріда-Соломона до інформаційних символів, що містяться в кожному кадрі, додають ще чотири перевірочних символи. Після першого етапу кодування кодером додають символи Q і у кадрі виходить 28 символів (рис. 8.13,*г*), а після другого етапу кодування кодером - P-символи (рис. 8.13,*д*). Перемежовування проводять перед кожним етапом кодування і після другого, тобто, тричі.

Далі послідовність 32-символьних кадрів надходить на канальний модулятор. Туди ж надходить ще один символ - 33-й (рис. 8.13,*є*), який містить інформацію щодо характеру записаної програми - кількості музичних творів (доріжок, треків), тривалості кожного з них, наявності або відсутності передспотворень преімфазиса, сигнал «музика/пауза» та іншу інформацію, необхідну для реалізації в програвачі різних споживчих функцій - програмування, повтору, пошуку тощо. Цей додатковий символ називають службовим (символ службової інформації (CCI)). Службову (споживачу) інформацію створено у відповідному вузлі структури формування сигналу запису – ФСІ (формувач службової інформації).

Після блоку завадостійкого кодування послідовність символів (біт) надходить на модулятор канального кодування (M EFM – Eight to Fourteen Modulation, модулятор 8 у 14).

Модулятор потрібен для того, щоб перетворити отриману цифрову послідовність до виду, найбільш придатного для запису на відповідний носій з високою щільністю (наприклад, компакт-диск), а також забезпечує найкращі умови для її безпомилкового зчитування при відтворенні. Цим умовам відповідає використовуваний для модуляції, наприклад, у форматі CD-Audio канальний модулятор EFM [25].

В основі EFM перетворення лежить заміна вхідних 8-розрядних символів у 14-розрядні канальні. Крім того, між кожними двома суміжними 14-розрядними символами вставляють ще три з’єднувальних біти. Ці біти самі по собі ніякої інформації не несуть і потрібні лише для того, щоб надати формованій послідовності необхідні властивості. Справа в тому, що за правилами кодування EFM між двома сусідніми одиницями має бути не більше 10, але не менше двох «нулів». Якби не було цих допоміжних розрядів, то при з'єднанні двох 14-розрядних символів вимогу на обмеження послідовних «нулів» могло бути порушено. Їх наявність дозволяє вставити в один з них додаткову «одиницю», якщо відстань між останньою «одиницею» попереднього символу і першою подальшого

вийшло більше 10 або, навпаки, створити необхідний інтервал, коли остання «одиниця» попереднього символу і перша подальшого виявилися поруч або ближче, ніж через два «нуля».

І нарешті, для того, щоб у безперервному потоці інформації можна було відокремити один кадр від іншого, на початку кожного з них встановлюють так звану кадрову синхрогрупу з 24+3-канальних розрядів (біта) (рис. 8.13,*ж*). Синхрогрупа має цілком певну конфігурацію, що не існує в інформаційному потоці - два послідовних інтервали по 10 «нулів» між двома «одиницями».

Після цього отриману послідовність перетворюють таким чином, що «одиницям» коду відповідає зміна рівня сигналу, а «нулям» - відсутність такої зміни. Тим самим забезпечено незалежність інформації від полярності сигналу.

Сформований сигнал (рис. 8.13,*ж*) подають потім в блок запису інформації на відповідний носій, для запису на компакт-диск це – керуючий вхід оптичного модулятора, який лазерним променем проводить запис інформації на майстер-диск, для магнітного запису – це підсилювач запису магнітної головки.

8.4. Перетворення звукового сигналу в системі "компакт диск"

8.4.1. Принцип запису та параметри формату CD-Audio

Технологія цифрового звукозапису на компакт-диск (формат CD-Audio) з’явилась у 80-х роках минулого століття, а ухвалення в жовтні 1982 р. стандарту на систему «Компакт-диск» поклало початок нової ери в історії звукозапису - переходу до масових цифрових джерел програм. Носій - компакт-диск - не дивлячись на малі розміри в порівнянні з віниловим диском, добре захищений від пошкоджень і може містити звукову програму високої якості до 74 хв.

Одним з вирішальних переваг цифрових методів запису є те, що звукову інформацію, перетворену у двійковий код, можна як завгодно перемішувати, ущільнювати і вписувати в неї будь-які службові відмітки. Саме тому програвач компакт-дисків може працювати за заданою слухачем програмою, відтворюючи записані на диску інформаційні фрагменти у будь-якій бажаній послідовності.

Технічні параметри системи «Компакт-диск» наведено в табл. 8.2, їх узагальнено вимогами міжнародного стандарту IEC 61104:1992, а структурну схему тракту формування та запису звукового сигналу на диск-оригінал наведено на рис. 8.15 [11].

Носієм технології цифрового оптичного запису CD-Audio є полікарбонатний диск діаметром 120 мм, товщиною 2 мм, прозорий для світлового променя лазера з однієї сторони та металізований алюмінієвим шаром для відбиття світлового променя з іншої сторони. Полікарбонат - це прозора пластмаса, стійка до викривлення, має малий коефіцієнт зміни розмірів під впливом вологи, має високу теплостійкість і високу ударну в'язкість. На диску зі сторони відбивного шару створена доріжка у вигляді спіралі, на якій розташовані мікропоглиблення, що називають «pit - піт» - з англійської западинка, та мікровиступи, що називають «flat-флет» - з англійської площина. Кожний піт характеризує одиницю в двійковій системі числення («1»), а флет – відповідно нуль («0») інформаційного ІКМ

сигналу.

Довжина піт може змінюватися від 0,9 до 3,3 мкм. Те ж саме відноситься і до флет. Найкоротший піт відповідає мінімальному інтервалу між двома сусідніми перепадами рівня, який містить три сигнальних «1» коду EFM. Таким чином, легко підрахувати, що один канальний розряд займає на диску 0,3 мкм, а один кадр, що складено з 588 канальних розрядів - 176,4 мкм довжини доріжки. Загальна ж довжина доріжки на компакт-диску - близько 5 км.

Таблиця 8.2. Технічні параметри системи «Компакт-диск»

Параметри	Значення для CD	Значення для DVD
Діаметр диска, мм	120	120
Діаметр центрального отвору, мм	15	15
Товщина диска, мм	1,2	2×0,6=1,2
Матеріал диска	Полікарбонат	Полікарбонат
Спосіб відтворення інформації ($V_{лін} = \frac{\pi Dn}{60}$ [м/с] де D - діаметр канавки, м; *n* - кількість обертів за хвилину)	Постійна лінійна швидкість 1,2... 1,4 м/с, 500-200 об/хв.	Постійна лінійна швидкість 1,2... 1,4 м/с, 500-200 об/хв.
Крок доріжки, мкм	1,6	0,74
Мінімальна довжина піта, мкм	0,83	0,451
Довжина хвилі лазера, нм (λ_R = 700,1 нм; λ_G =546,1 нм; λ_B =435,8 нм)	780	650/635
Числова апертура зчитувального об'єктива	0,45	0,6
Частота дискретизації, кГц	44,1	44,1; 88,2; 176,4; 48; 96; 192
Число розрядів і характеристика квантування	16, лінійне	16; 20; 24 лінійне/нелінійне
Швидкість зчитування звукової інформації, Мбіт/с	1,4112	10,5 (1,32 Мбайт/с)
Загальна швидкість зчитування інформації, Мбіт/с	1,9404	1,69 Мбіт/с
Канальна швидкість зчитування, Мбіт/с	4,3218	9 Мбіт/с
Канальна модуляція	EFM (перетворення 8- 14)	EFM+ (перетворення 8-16)
Корекція помилок CIRC	CIRC (подвійний код Ріда-Соломона з потрійним перемеженням)	CIRC+
Максимальна тривалість запису, хв.	74	133
Максимальний обсяг звукової інформації, записаної на диску, Гбайт	0,78	4,7 Гбайт на 1 шар

Всю поверхню диска розділено на зони. Зону, де записана безпосередньо корисна інформація, називають програмною зоною. Ближче до центрального отвору знаходиться зона вступної доріжки або зона введення, де записано зміст диска, а біля краю диска - зона вивідної доріжки або зона виведення.

На рис. 8.16 наведено збільшений фрагмент компакт-диска та принцип

зчитування інформації з диска лазерним променем.

Інформацію, записану на диск у вигляді спіральної доріжки з послідовності піт, розташовано в програмної зоні, а також в зонах введення і виведення. Відстань між сусідніми витками спіралі 1,6+0,1 мкм. Для порівняння: крок між доріжками у вінілового диску 160 мкм, тобто в 100 разів більше. Ширина піт може коливатися від 0,6 до 0,8 мкм. Глибина - 0,1 ... 0,13 мкм (рис. 8.16, а).

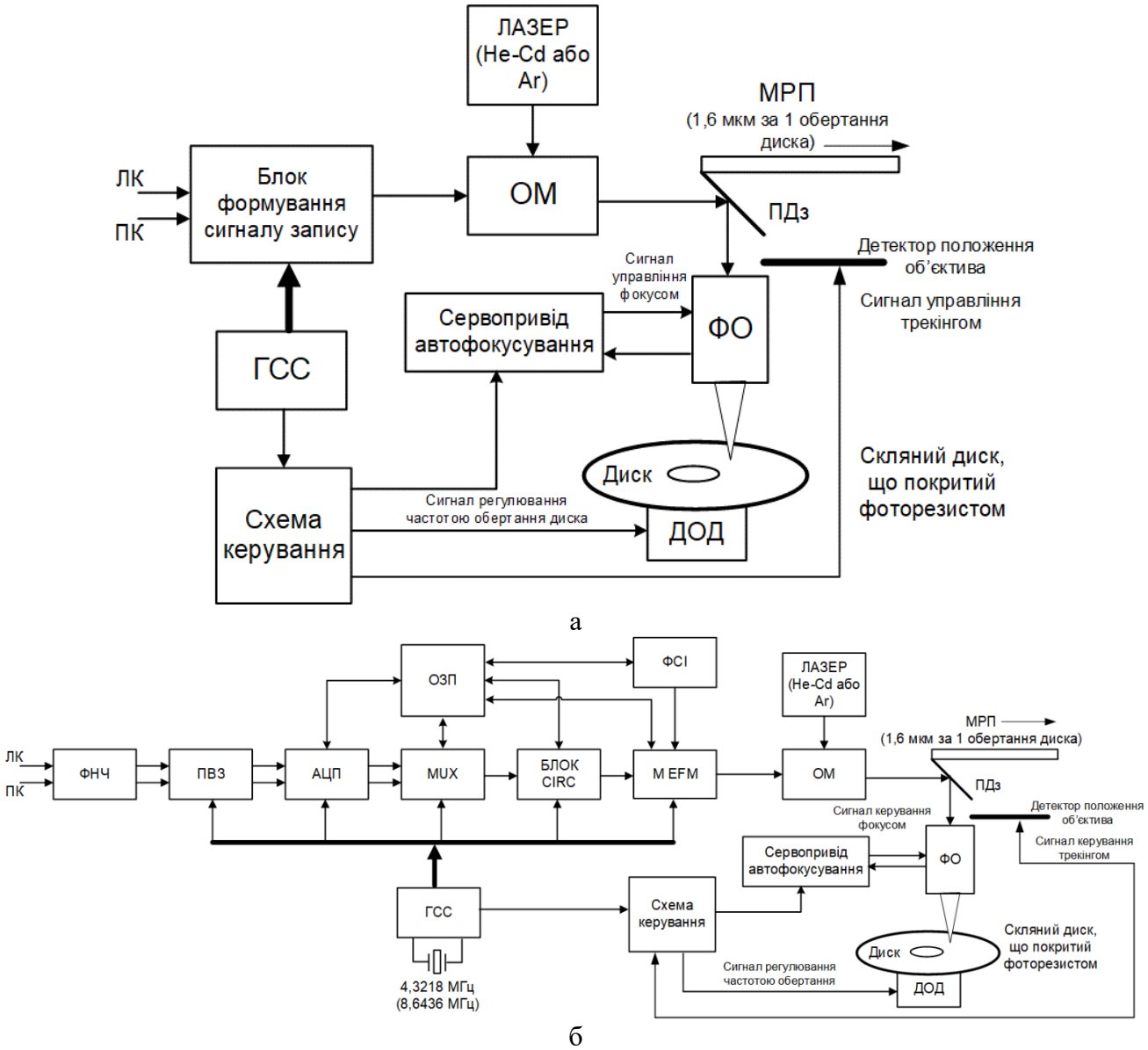
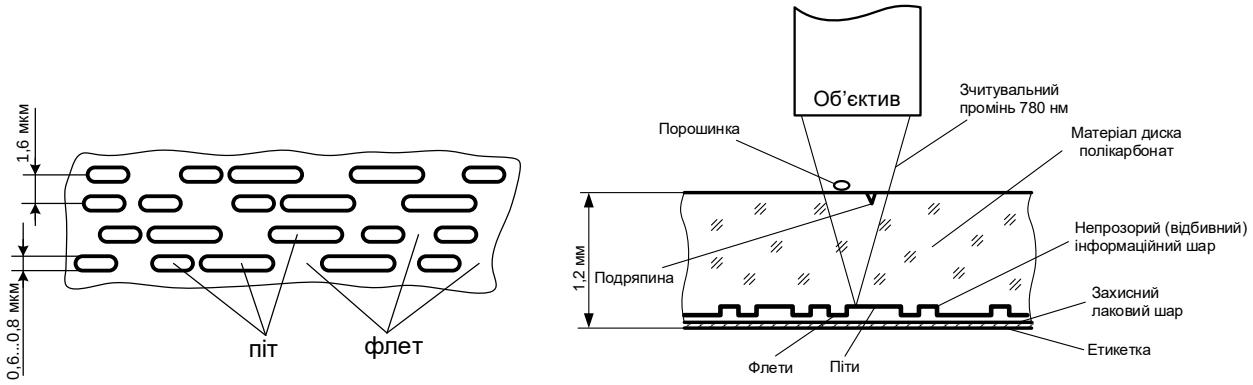


Рис. 8.15. Структурна схема запису цифрової інформації на компакт-диск без відображення вузлів блоку формування сигналу запису (а) та повна (*б*)

Запис і відтворення компакт-диска починають не від зовнішнього краю, як для вінілової платівки, а від центрального отвору і проводять проти годинникової стрілки, якщо дивитися з боку прозорого шару. Доріжка рухається щодо зчитувального променя з постійною лінійною швидкістю. Це досягають завдяки зміні швидкості обертання диска. Коли зчитування виконують поблизу центрального отвору, він обертається швидше, а коли ближче до краю, то повільніше. Швидкість руху доріжки щодо променя у різних дисків може

коливатися в межах від 1,2 м/с до 1,4 м/с.

Процес виробництва компакт-дисків починають з виготовлення диска-оригіналу. Основу для нього створюють з ретельно відполірованого скла. На поверхню основи диска-оригіналу, яка при цьому повинна бути ідеально плоскою, наносять тонкий шар світлочутливого матеріалу - фоторезиста. Товщина шару фоторезиста визначає глибину майбутніх піт (0,1...0,13) мкм, тому ретельно її контролюють в процесі виробництва. На всіх стадіях виготовлення диск-оригінал ретельно перевіряють, оскільки всі його дефекти у подальшому неминуче будуть перенесені на матрицю і розтиражовані [11].



а б

Рис. 8.16. Фрагмент поверхні компакт-диска (*а*) та зчитування інформації з диска (*б*)

Для запису інформації на компакт-диск, як правило, використовують або аргоновий лазер з довжиною хвилі випромінювання 457,9 нм, або гелій-кадмієвий лазер з довжиною хвилі випромінювання 441,6 нм. Вибір такої довжини хвилі пояснюють рядом причин. По-перше, зменшена довжина хвилі випромінювання дозволяє отримати світлову пляму потрібного діаметру з більш чіткими кордонами, ніж в разі використання лазера з довжиною хвилі 0,78 мкм, як той, що застосовують для зчитування. По-друге, така довжина хвилі краще узгоджена з характеристиками світлочутливості фоторезиста, що дозволяє обмежити для запису потужність лазера.

В процесі запису випромінювання лазера через оптичний модулятор (ОМ на рис. 8.15) модулюють цифровим сигналом, який формує апаратура кодування звуку в повній відповідності з вимогами стандарту. Випромінювання лазера впливає на фоторезист, що покриває поверхню диска, який обертається і залишає на ньому зони засвічення, відповідні одиницям цифрового коду. Після закінчення запису диск із «засвіченим» фоторезистивним шаром занурюють в спеціальний розчин, де експоновані зони розчиняються і на їх місці утворюються поглиблення - піти.

Для модуляції лазерного променя використовують умовний швидкодійний комутатор, який у разі появи «1» відкриває проходження світлового променя лазера на диск, а у разі появи «0» перекриває проходження променя. Як модулятор може бути використаний електрооптичний ефект Поккельса, який полягає у тому, що під впливом електричного поля змінюється коефіцієнт заломлення кристала, що не має внутрішньої симетрії (наприклад, п'єзокристала). У результаті промінь, що проходить крізь такий кристал, то потрапляє на поверхню диска, формуючи піт, то

відхиляється у сторону, формуючи флет. Також можливо використовувати акустооптичний ефект, коли пружні формації, що виникають при проходженні ультразвуку через прозорий акустооптичний матеріал (кристал $PbMoO_4$, TeO_2, $LiNbO_3$, або телурового скла), працює як дифракційна решітка, яка змінює напрям світлового променя.

Для того, щоб забезпечити точне фокусування записуючого променя на фоторезистивному шарі диска, використовують фокусуючий об'єктив (ФО на рис. 8.15), в якому передбачено систему контролю відстані на основі вимірювання ємності між шаром фоторезиста і електродом, закріпленим на об'єктиві записуючої оптичної головки.

Щоб забезпечити необхідний крок між доріжками (1,6 мкм) використовують механізм радіальної подачі (МРП, рис. 8.15) з поворотним дзеркалом (ПДз) як виконавчого механізму, що спрямовує лазерний промінь на ФО і, відповідно, поверхню диска.

Для того, щоб забезпечити сталість лінійної швидкості переміщення променя щодо записуваної доріжки, використовують систему регулювання швидкості обертання двигуна, де контрольованим параметром є відстань від центру диска до записуючої плями.

На рис. 8.15 ДОД - двигун обертання диска, СК - схема керування, що забезпечує керування лінійною швидкість обертання диска, радіальну подачу дзеркала, фокусування об'єктива і трекінг.

Після «проявлення» експонованого променем лазера диска-оригіналу його поверхню металізують тонким шаром срібла. Потім на основу диска методом гальванопластики формують інший оригінал – гальванометалевий, умовний «негатив» диска-оригіналу. Після цього рельєф з нього переносять на проміжні копії, а з проміжних копій - на матриці. Матриці використовують в подальшому для тиражування компакт-дисків.

Тиражування може здійснювати трьома способами: методом гарячого пресування, литтям під тиском і завдяки фотополімеризації.

Загальний принцип тиражування полягає в тому, що на розм'якшеному або розігрітому до температури, близької до температури плавлення, полікарбонаті металевою матрицею створюють відтиск з рельєфом пітів та флетів, що повторює рельєф матриці. Потім диск охолоджують, відокремлюють від матриці та обробляють по краю. На отриманому диску поглиблення визначають «1», відсутність поглиблення – «0».

Після того, як компакт-диск виготовлено за однією з вищеописаних технологій, на його поверхню з боку піт методом вакуумного напилення наносять шар, що відбиває, з алюмінію завтовшки 0,1 мм. Алюмінієвий шар покривають тонким захисним шаром з міцної пластмаси. Потім обробляють і полірують центральний отвір і передню кромку диска, а на захисному шарі формують етикетку (рис. 8.17).

Завдяки добре продуманій конструкції компакт-диска, інформація, що міститься на ньому у вигляді піт, надійно захищена від будь-яких пошкоджень: з одного боку прозорим матеріалом самого диска, з іншого - шаром міцної пластмаси і етикеткою. Так що дістатися до неї, не зруйнувавши сам компакт-диск, практично

неможливо.

Зчитування інформації здійснюють з боку прозорої основи (полікарбонату), тобто крізь всю товщину компакт-диска. Оскільки промінь, що зчитує інформацію, фокусують на доріжці, яка знаходиться глибоко всередині диска, майже на відстані товщини диска, то на його поверхні розмір плями, що формує лазерний промінь достатньо великий (близько 1 мм) і дрібні порошинки і подряпини практично не впливають на величину інтенсивності відбитого світла. Можна сказати, що промінь, який зчитує інформацію з доріжки, ці дрібні порошинки і подряпини просто «не бачить» (рис. 8.16,*б*).

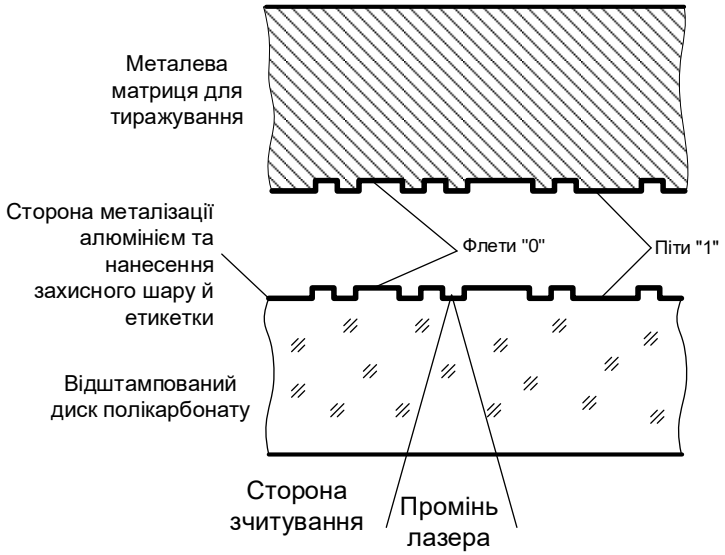


Рис. 8.17. Тиражування компакт-диска

Необхідно зазначити, що абсолютно безпомилкової інформації, що записують та відтворюють на компакт-диску не буває навіть на дуже хороших фірмових дисках, виготовлених з дотриманням всіх технологічних норм. Якась кількість дефектів присутня навіть на них. Однак число таких дефектів у доброякісних дисків завжди обмежена зверху відповідно до вимог міжнародного стандарту IEC 61104:1992 на систему CD.

Якщо кількість дефектів не перевищує зазначеного розміру, то система корекції помилок будь-якого програвача CD легко відновить інформацію, якої бракує - як ніби ніяких дефектів і не було. Якщо ж кількість дефектів більше норми, то результат може бути непередбачуваний. Диск може звучати з спотвореннями, зникненням звуку або взагалі не зчитуватись - все залежить від кількості дефектів і характеру їх розташування на диску.

8.4.2. Варіанти дисків формату CD

Компакт-диск формату CD-Audio являв собою виключно звуковий носій. Назва стандарту на нього звучало як «Compact Disk Digital Audio System», тобто «Цифрова звукова система компакт-диск».

З часом компакт-диск, враховуючи його не малу ємність (600...650) Мбайт, стали використовувати як елемент постійної пам’яті для зберігання архівних даних.

Така версія компакт-диска з'явилася в 1985 р. і отримала назву CD-ROM (Read Only Memory - пам'ять тільки для читання).

Для такого диска як носія постійної пам’яті був розроблений спеціальний комп’ютерний дисковод та змінена структура даних, що записували на диск. Зокрема, покращилась система захисту від помилок, адже для зберігання комп’ютерних програм та іншої інформації такі операції як інтерполяції і притлумлення не припустимі, а помилки необхідно виправляти тільки точно – вдяки застосуванню коригувальних кодів.

Для цього були додані ще три додаткові ступені завадостійкого кодування на рівні блоків (1 блок = 98 кадрів). Достовірність відтворення інформації при цьому зросла на 3...5 порядків [11].

Додаткове кодування в CD-ROM проводять ще до надходження даних на кодер CIRC, точно такий же, як у системі захисту помилок формату CD-Audio. Додаткове кодування здійснюють кодами EDC (error detection code) і ECC (error correction code). Код EDC використовують лише для виявлення помилок, а код ECC дозволяє і виявляти, і виправляти помилки. В разі додаткового кодування дані, що містить кожний послідовний кадр, об'єднують в блок або сектор з 98 кадрів. Всього у секторі міститься 24x98 = 2352 символи. Кожен кадр містить 24 вихідних інформаційних символи (байта). У форматі CD-Audio ці 24 символи є 12 розділених навпіл 16-розрядних відліків звукового стереосигналу: 6 відліків лівого каналу і 6 відліків правого каналу. У форматі CD-ROM ці символи є знеособленими і можуть містити яку завгодно інформацію, аби її було перетворено в двійкову форму і розподілено за байтами.

Однак, якщо в CD-Audio всі ці символи містили первинну інформацію, то у CD-ROM таку інформацію містять тільки 20 символів. Решта 2352-2048=304 - надлишкові, і потрібні для того, щоб забезпечити додаткові ступені захисту інформаційних символів. Через наявність цієї надмірності диск CD-ROM має меншу інформаційну ємність (до 650 Мбайт) у порівнянні з CD-Audio (до 740 Мбайт), зате інформацію цю набагато краще захищено. Такою ситуацією застосовують за кордоном для зберігання різних фонограм. Там їх записують не на CD-Audio, а на CD-ROM.

Оскільки кодування даних у форматі CD-ROM містить необхідний атрибут кодування за стандартом CD-Audio, то всі дисководи CD-ROM здатні зчитувати диски CD-Audio і потребують лише у наявності звукової плати, яка перетворює цифровий код у звуковий сигнал. Програвачі ж CD-Audio відтворити CD-ROM не в змозі (навіть якщо там записана звукова інформація), оскільки їх процесори не розраховані на декодування кодів EDC і ECC, так само як і здійснення інших операцій, закладених у основу формату CD-ROM

Інформацію про те, що даний компакт-диск є диском CD-ROM, записано у службових даних каналу Q.

Крім CD-Audio і CD-ROM, на споживчому ринку існує і диск Video-CD. Цей диск може містити відеопрограм тривалістю до 74 хв. з якістю звичайного VHS, що забезпечено завдяки використанню компресії за стандартом MPEG1.

Слід зазначити, що основні формати CD-дисків іноді пов'язують з певними кольорами. Наприклад, формат CD-Audio називають «Red Book» (Червона Книга),

CD-ROM - «Yellow Book» (Жовта Книга), Video-CD - «White Book» (Біла Книга), книги – це відповідно стандарти на зазначені типи ком пакт-дисків [19].

Диски CD-Audio, Video-CD і CD-ROM, які записано і тиражовано в заводських умовах, відносять до класу дисків, «тільки для читання», запис нового матеріалу на них неможливий. Однак, крім них існують диски, спеціально створені для того, щоб на них можна було проводити запис. Це диски CD-R (Recordable), на які можна писати інформацію тільки один раз, і диски CD-RW (Rewritable), що допускають багаторазовий перезапис. Ці диски в Книзі Стандартів пов'язані з помаранчевим кольором і часто іменують «Orange Book».

Диск CD-R з одноразовим записом розроблений ще на початку 90-х років. Крім самого диска, довелося розробляти також і більш потужний напівпровідниковий лазер, оскільки для здійснення запису потрібне створення в області реєструючого шару високої температури. Якщо потужність лазера, що зчитує, може бути не більше 1мВт, то лазер, що записує, повинен мати потужність близько 4...8 мВт для швидкості запису, яка дорівнює швидкості зчитування, (8...10) мВт - на подвійній швидкості, (10...12) мВт - на чотирикратній, (14...18) мВт - на восьмикратній тощо.

Конструкцію диска CD-R наведено на рис. 8.18. Як реєструючий шар в даний час використовують органічні барвники, оптичний спектр поглинання яких збігається з довжиною хвилі випромінювання лазера. У період розроблення CD-R було створено близько півсотні таких барвників, але до промислової технології доведено тільки три з них - ціанін, фталоціанін і азотофарбник [17].

Ціанінові шари відрізняються досить високою чутливістю до випромінювання лазера, але, разом з тим, і відносною нестійкістю, так як з часом розкладаються під впливом світла. Цей недолік згодом усунено введенням в ціанін добавок спеціальної стабілізуючої речовини, завдяки якій їх довговічність становить близько 70 років. Диски з ціаніновим реєструючим шаром мають зелений колір і їх випускають фірми BASF, TDK, MITSUBISI, RICOH тощо.

Фталоціанінові шари більш стійкі до впливу природного світлового випромінювання, і термін їх служби досягає 100 років. Диски з такими шарами краще за інших працюють на підвищених швидкостях запису, коли потужність лазера велика. Випускають компанії KODAC, MITSUI і TOATSU CHEMICHALS. Мають золотисто-коричневий колір.

Ціанінові і фталоціанінові диски містять відбивний шар з золота, що є обмеженням прагнення виробників знизити їх вартість. Срібний відбивний шар мають диски з реєструючим шаром з азотофарбника, розроблені фірмами MITSUBISHI і VERBATIUM. Такі диски добре працюють на низьких швидкостях запису - до 4-кратної. Їх термін служби - до 100 років. З боку реєструючого шару вони виглядають синіми, зі зворотного боку - безбарвними.

Під час запису інформації променем лазера відбувається розігрів структури підкладка-шар органічного барвника-відбивний шар і вона деформується, утворюючи піти (рис. 8.18,*в*). В разі зчитування світло лазера на таких пітах буде розсіюватися, забезпечуючи різницю в інтенсивності відбитого пучка на деформованих і недеформованих ділянках доріжки.

Доріжки на дисках CD-R служать для забезпечення автотрекінгу під час

запису. Їх ширина - 0,8 мкм, крок - 1,6 мкм. Формують їх під час виготовлення диска методом лиття під тиском. Потім на поверхню полікарбонатної основи методом центрифугування наносять реєструючий шар (органічний барвник), а поверх нього методом вакуумного напилення - відбивний шар. Все це покривають захисним шаром з міцної пластмаси, а зверху формують етикетку (рис. 8.18,*а*).

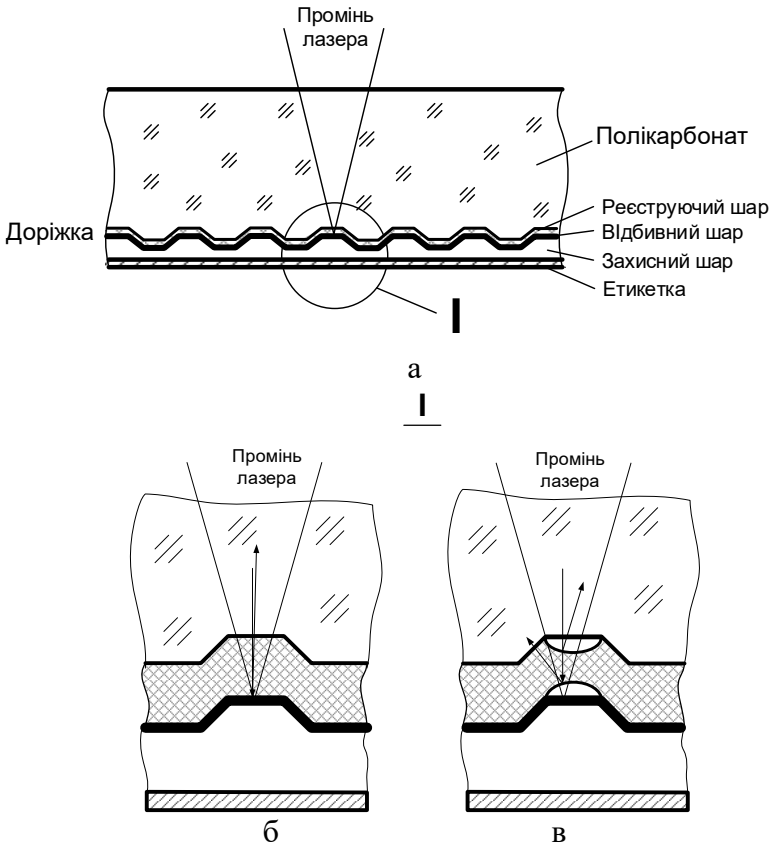


Рис. 8.18. Вид диска CD-R (*а*) (розріз поперек доріжок) та формування піта на реєструючому шарі (до запису (*б*), та після запису (*в*))

До родини дисків CD-R відносять і диски PhotoCD, розроблені фірмою KODAK та призначені для запису високоякісних нерухомих зображень (фотографій).

Реверсивні диски CD-RW, що допускають багаторазовий перезапис, конструктивно схожі на диски CD-R. Однак, замість органічного барвника тут функцію реєструючого середовища виконує шар неорганічного речовини, здатної багаторазово змінювати свій стан з кристалічного в аморфний і навпаки. Для запису інформації на них потрібно лазер з меншою потужністю, ніж для запису CD-R, але й контраст записаної доріжки виходить менший, тому якість запису буде дещо гірше.

Основна відмінність штампованих компакт-дисків від записуваних і перезаписуваних дисків – це оптичний контраст запису. Оптичний контраст запису (різниця між інтенсивністю відбитого від поверхні диска світла, відповідного одиницям і нулям записаного сигналу) у тиражованих (штампованих) дисків становить 45…85% («0» - «1»), у дисків CD-R 30…60%, а у дисків CD-RW - всього 18...30% (за 100% тут прийнята інтенсивність падаючого пучка). Ті дисководи, які

не розраховані на відтворення записів з таким контрастом (в їх число входять всі дисководи перших поколінь), звичайно ж, зчитувати реверсивні диски не зможуть.

Всі диски CD-R і CD-RW після здійснення запису набувають властивостей того формату, в якому цей запис виконано і можуть відтворюватися відповідними пристроями. Якщо записано музику в форматі CD-Audio, то диск можна відтворювати звичайним CD-програвачем, якщо записано програму у форматі CD-ROM - будь-яким комп'ютерним дисководом. Однак не слід забувати, що контраст запису як у дисків CD-R, так і у дисків CD-RW завжди нижче, ніж у нормального тиражованого диска, не кажучи вже про набагато більшу кількість помилок, які внесено на нього під час запису, тому якість такого відтворення не гарантовано [17].

8.4.3. Відтворення інформації з компакт-диска

Зчитування (відтворення) інформації з компакт-дисків здійснюють лазерним променем з фокусуванням на інформаційній доріжці безконтактно відносно до диска, тобто без торкання диска. Інформацію на диску записано за спіраллю від центру диска (від центрального отвору) до краю диска. Структурну схему програвача компакт-дисків (ПКД) наведено на рис. 8.19.

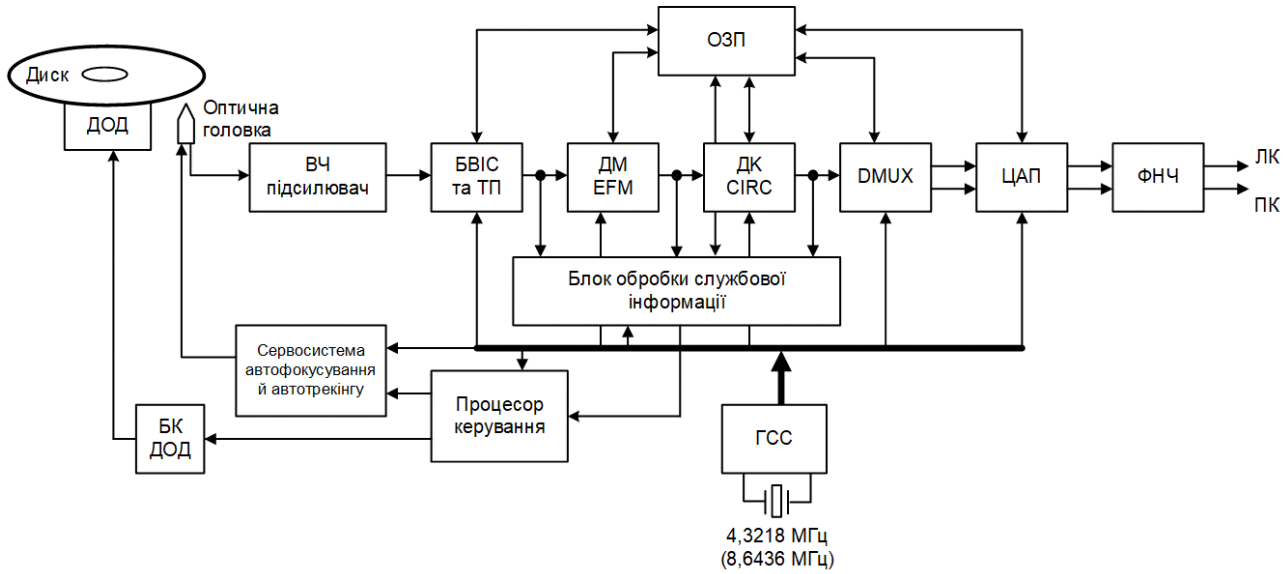


Рис. 8.19. Структурна схема програвача компакт-дисків (ПКД)

Під час відтворення, як і у разі запису диск обертається з постійною лінійною швидкістю. Оптична головка фокусує промінь лазера на інформаційному шарі, точніше на рівні розташування пітів. Промінь лазера, відбиваючись від реєструючого шару і промодульований пітами компакт-диска, повертається в оптичну головку і спрямовується на фотоприймач, який перетворює світлову енергію в електричний сигнал. Для створення паралельного пучка світла в оптичній головці застосовано систему лінз (коліматор), а для виділення відбитого променя і спрямовування цього пучка на фотоприймач застосовують систему призм (поляризаційний розщеплювач променя) та додаткову фокусувальну лінзу.

Лазер (англ. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation -

Підсилення світла вимушеним випромінюванням»), або оптичний квантовий генератор - це пристрій, що перетворює енергію світла в енергію поляризованого та вузькоспрямованого потоку випромінювання з визначеною довжиною хвилі. У програвачах компакт-дисків застосовують напівпровідниковий лазер з довжиною хвилі 780 нм.

Інформаційний сигнал на виході оптичної головки, вихідним елементом якої є фотоприймач, являє собою високочастотний інформаційний сигнал, форму якого наведено на рис. 8.20,*а*. Для підсилення сигналу і виділення цифрового потоку ІКМ сигналу (послідовності прямокутних імпульсів) у структурі програвача компакт-дисків використано високочастотний підсилювач-перетворювач. ВЧ підсилювач виконує порівняння рівня вихідного сигналу фотоприймача з деяким середнім рівнем (компарування) та формує дворівневий сигнал, в якому більший рівень відповідає «1», а менший – «0».

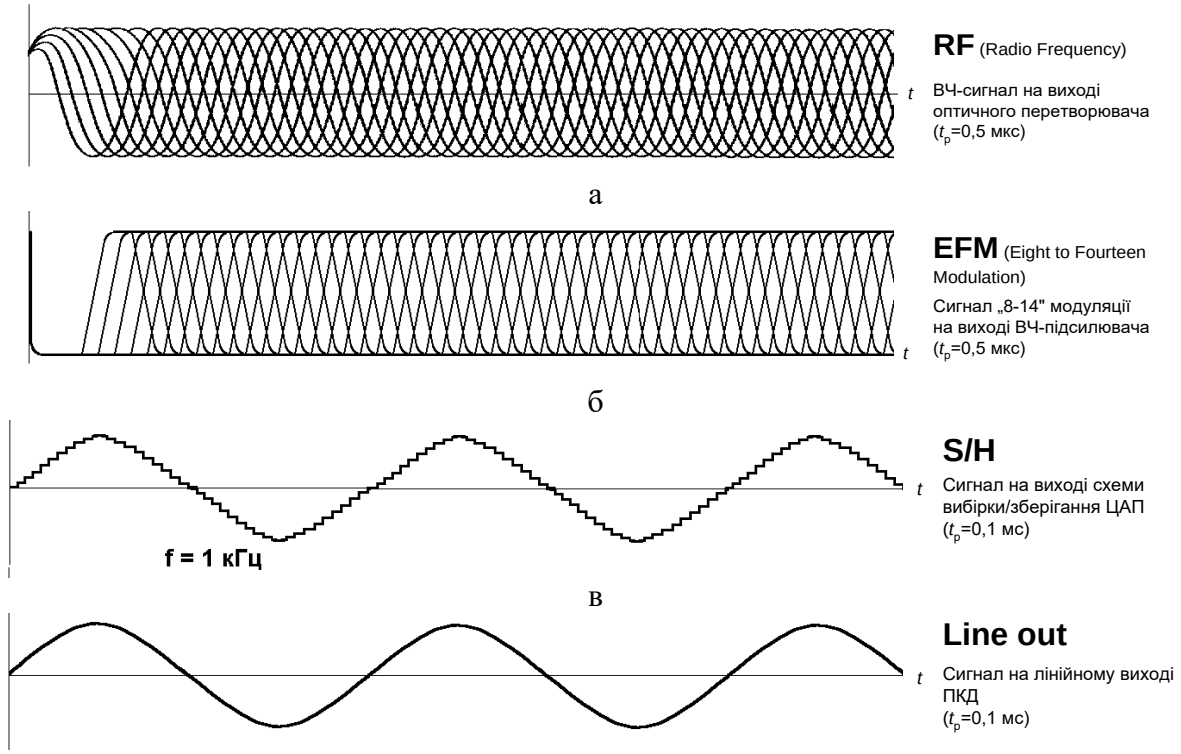


Рис. 8.20. Форма сигналів на виході оптичної головки (*а*), ВЧ підсилювача (*б*), ЦАП (*в*), лінійному виході програвача після ФНЧ (*г*)

Якщо спрощено пояснювати принцип роботи оптичної головки, то в режимі відтворення за наявності світла на виході фотоприймача і, відповідно, на виході ВЧ підсилювача, формують рівень, що відповідає «1», а за відсутності світла – «0».

Для виключення різноманітних неточностей формування імпульсів на виході ВЧ підсилювача, зокрема, тривалості імпульсів біт та спотворення їх фронтів, викликаних, наприклад, нестабільністю потужності лазера, нелінійністю АЧХ та ФЧХ тракту, спотвореннями оптичної системи тощо, у програвачі компакт-дисків застосовують блок виділення інформаційного сигналу та тактової послідовності (БВІС та ТП). Цей блок у структурі ПКД формує тривалість біта постійно кратним

синхросигналам, початок і закінчення імпульсу – початку імпульсу синхросигналу. Цей блок містить пристрій тактової синхронізації, побудований на основі фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ). БВІС та ТП структурно зв'язано з генератором синхросигналів (ГСС) та оперативно-запам'ятовуючим пристроєм (ОЗП).

Сформований за рівнем і по фронтах інформаційний сигнал після БВІС та ТП як ІКМ сигнал надходить на демодулятор EFM (ДМ EFM). Він виконує обернені щодо модулятора EFM операції, які зроблено під час запису (див. рис. 8.13). Тобто видаляють, а точніше перерозподіляють між відповідними блоками для формування сигналів керування «надлишкові» символи кадрової синхрогрупи (27 біт), три з'єднувальних біти та замість 14-розрядних канальних символів отримують 8-розрядні символи (8 біт = 1 байт).

Так, частину символів спрямовують у блок оброблення службової інформації, а з нього формують сигнали управління в процесор управління і потім у блок керування двигуном обертання диска (БК ДОД), сервосистему автофокусування і автотрекінгу. Також блок оброблення службової інформації разом з ГСС формує необхідні синхропослідовності для всіх цифрових блоків структури ПКД, в системи кадрової та блочної синхронізації.

Для підтримування необхідної відстані між оптичною головкою і диском, і, відповідно, забезпечення оптимального фокусування променя на інформаційному шарі диска, а також перебування світлового променя лазера на відповідній доріжці запису застосовують систему автофокусування й автотрекінгу (track – доріжка).

Для роботи з часовими спотвореннями, нестабільністю сигналів у часі та оперативного реагування на зміни тривалості біт в структурі ПКД передбачено буферний оперативний запам'ятовуючий пристрій (ОЗП), що реалізовано на основі запам'ятовуючого пристрою з довільною вибіркою. В цю пам'ять інформаційні біти заносять з нерівномірною швидкістю, а зчитуються строго рівномірно і синхронізовано з кварцовим генератором (ГСС). Наявність такого ОЗП позбавляє будь-який цифровий пристрій запису-відтворення від завжди проблемного параметра аналогового запису – детонації.

З виходу ДМ EFM інформаційні (звукові) дані, що об'єднано в блоки з 98 символів надходять на декодер завадостійкого кодування (ДК CIRC), де здійснюється виявлення та виправлення помилок та втрат інформації. ДК CIRC разом з ОЗП здійснює деперемеження та декодування інформаційного сигналу з видаленням помилкових символів. Управління всіма процесами декодування синхронізовано з синхросигналами, що створено кварцовим генератором ГСС з тактовою частотою 4,3218 МГц.

Деперемеження та декодування полягає в тому, що необхідні символи інформаційного сигналу отримують з оперативної пам'яті у необхідному порядку, використовують у процедурі декодування і знову заносять в ОЗП. В процесі декодування видаляють помилкові коди з кодування і залишається інформаційний код, що створено на виході АЦП під час запису інформації. Завдяки наявності у кодованій послідовності перевірочних символів декодер, використовуючи достатньо складні розрахунки і аналіз, визначає наявність помилок і які саме символи помилкові (пошкоджені). Декодер деякі виявлені помилки виправляє,

деякі маскує, а деякі, які не може виправити, видаляє.

Втрачені і невиправлені помилки в інформаційному сигналі можуть проявлятися під час відтворювання як потріскування, клацання або, навіть, відсутність сигналу. Щоб цього не було втрачені відліки замінюють інтерполяціями – середніми арифметичними значеннями від значень сусідніх неспотворених відліків (рис. 8.21,*а*) [25].

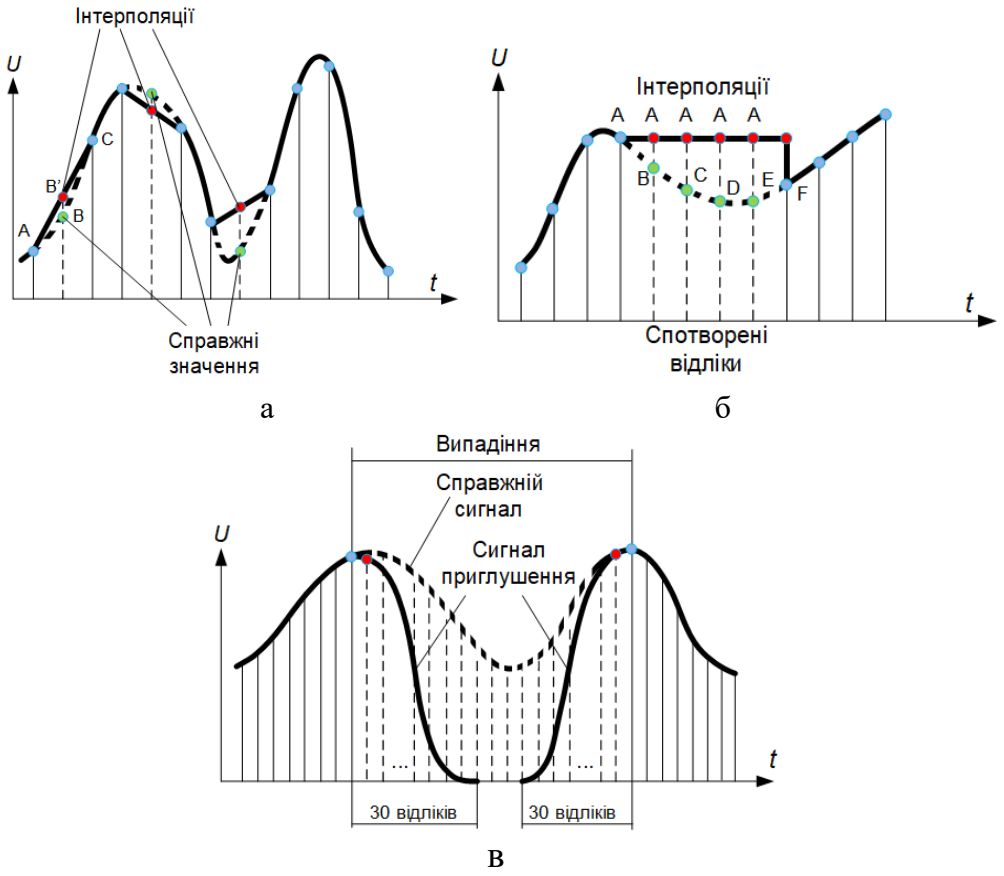


Рис. 8.21. Маскування інтерполяцією (*а*), утриманням (*б*), приглушенням (*в*)

Маскування інтерполяцією ефективно для одиночних відліків. Для більш тривалих помилкових відліків застосовують маскування утриманням (рис. 8.21,*б*), коли замість спотворених послідовних значень відліків встановлювалось значення останнього правильного відліку. Однак такий спосіб маскування в місті переходу до неспотворених значень відліків може призвести до клацання. Тому для достатньо тривалих спотворених відліків підряд розроблено метод маскування приглушенням (рис. 8.21,*в*). Для цього методу передбачено після останнього правильного значення відліку встановлювати це значення з плавним зменшенням його за законом косинуса, на що виділяється 30 відліків (періодів частоти дискретизації). Далі, за 30 відліків до першого правильного значення відліку сигнал починають плавно збільшувати за тим ж законом косинуса до значення неспотвореного відліку.

На слух такі маскування інтерполяцією або приглушенням майже не сприймаються або присутні у вигляді короткочасних завмирань звуку без неприємних клацань або потріскувань. Короткочасні не сприймаються зовсім через

інерційність людського слуху.

Після декодування інформаційного звукового сигналу ІКМ послідовність надходить на демультиплексор (DMUX), який розділяє послідовний сигнал, що містить два канали стереофонічного сигналу, на два незалежних сигнали ЛК та ПК.

ЦАП перетворює ІКМ сигнал в аналоговий сигнал, але форма цього сигналу, зокрема на високих частотах явно виражена ступінчаста (рис. 8.20,*в*). Для згладжування ступінчастості сигналу застосовують ФНЧ (рис. 8.20,*г*).

8.4.4. Система DVD

В 90-х роках минулого століття було багато спроб і розробок нових більш досконалих носіїв і систем цифрового запису, зокрема на оптичний компакт-диск для запису інформації практично будь-якого характеру, включно з відеоінформацією. Нові системи розробляли з урахуванням останніх досягнень в області прикладної хімії, оптики, мікроелектроніки, інформатики. Так з'явились нові системи з носіями MMCD (MultiMediaCD, SONY/PHILIPS)), SD-DVD (Super Density Digital Video Disc, TOSHIBA, HITACHI, PIONEER та ін.) або SDD (Super Density Disc), HD-DVD (High Density Digital Video Disc), HD-CD (Hiqh Density CD), які не завжди були сумісні з форматом CD-Audio [7].

Для запису звуку з'явились ще дві новітні технології і, відповідно, формати цифрового лазерного звукозапису на оптичний диск, а саме DVD-Audio і Super Audio CD (SACD).

Носієм звукозапису цих форматів є той же самий, як і для CD-Audio, компакт-диск, діаметром 120 мм та товщиною 2 мм (відмінністю від формату CD-Audio у диска є те, що його склеєно за товщиною двох дисків, товщиною 0,6 мм, що і дає в сумі 1,2 мм). Програвачі обох форматів сумісні з форматом CD-Audio і здатні відтворювати звичайні компакт-диски.

Однак, за способом подання інформації DVD-Audio і SACD принципово різні. Якщо DVD-Audio використовує звичайне лінійне квантування, хоча і з надвисокою точністю (частота дискретизації може бути 44,1; 88,2 і 176,4 кГц або 48; 96 і 192 кГц за 16, 20 і 24-розрядним квантуванням), то в SACD застосовано однорозрядне дельта-сигма перетворення аналогового сигналу (Direct Stream Digital - DSD) з частотою дискретизації 2,8 МГц. Це дає SACD ряд переваг, які полягають у відносній простоті реалізації апаратури за найвищої якості звучання фонограми.

Серед особливостей нових носіїв і технологій запису на них були, наприклад, у диска MMCD двошарова структура диска, тобто два інформаційних шари – один напівпрозорий, інший відбивний з ємністю 3,7 Гбайт на кожному шарі та зчитування з однієї сторони. У цій технології застосовують лазер з довжиною хвилі 0,635 мкм (червоне світло), і оптичну систему з числовою апертурою 0,52, що дозволило отримати світлову пляму набагато менших розмірів, ніж у CD, це в свою чергу забезпечує можливість зменшення більш ніж у два рази геометричних розмірів піт і відстані між доріжками. У CD ті ж параметри - 0,78 мкм і 0,45 відповідно. У разі використання компресії за стандартом MPEG2 на такому диску можна розмістити 135 хвилин відеозапису мовленнєвої якості.

Диск SD-DVD відрізнявся від MMCD тим, що два інформаційні шари

розміщувались на двох незалежних половинках диска із зчитуванням з обох сторін. Інформаційна ємність кожного шару виявляється більше - 5 Гбайт.

Напрямок розвитку нових технологій оптичного цифрового запису передбачав запис відеоінформації з високою якістю зображення та багатоканального звукового супроводу.

Групою представників індустрії розваг, в яку входили Columbia Pictures, MGM, Disney, Warner Brothers тощо розроблено рекомендації і вимоги до нових носіїв цифрового запису, зокрема відеоносія.

Так у 90-х роках з'явилась технологія DVD (Digital Versatile Disc – цифровий багатопрофільний, різнобічний диск). У конструкції самого диска відбилися технічні рішення більшості груп розробників - диск може бути одностороннім одношаровим, одностороннім двошаровим, двостороннім одношаровим і двостороннім двошаровим, тобто може мати до чотирьох інформаційних шарів [11]. Остаточні параметри DVD такі:

- діаметр диска, мм 120;
- товщина диска, мм 1,2 (0,6x2);
- ємність диска, Гбайт ..... 4,7 (на кожному інформаційному шарі);
- крок доріжки, мкм 0,74;
- мінімальна довжина піт, мкм 0,451;
- довжина хвилі випромінювання лазера, нм 650/635;
- числова апертура об'єктива 0,6;
- корекція помилок ..... CIRC Plus;
- модуляція сигналу ..... EFM Plus (8-16);
- середнє значення швидкості потоку даних, Мбіт / с 4,69;
- тип компресії відеоданих MPEG2;
- звуковий сигнал ..... CD-Audio, MPEG1 або MPEG2 Audio, Dolby Digital (AC-3);
- максимальне число звукових каналів .....…8;
- максимальне число
- додаткових каналів (субтитри) 32;
- тривалість відеозапису

на кожному інформаційному шарі, хв. ..... 133.

Конструктивно диски DVD маю чотири типи дисків, що мають від одного до чотирьох інформаційних шарів. З урахуванням того, що крім 120-міліметрового диска випускається ще й 80-міліметровий, всього виходить 8 найменувань, які відрізняються своєю інформаційною ємністю. На рис. 8.22 наведено конструкції різних типів дисків [17].

Одношаровий однобічний - SSSL (Single Sided Single Layer) (рис. 8.22,*а*) - являє собою дві склеєні підкладки товщиною 0,6 мм кожна. Одну з них, що з інформаційним шаром, виготовлено з прозорого полікарбонату. Іншу виготовлено з непрозорої пластмаси. На ній, зрозуміло, інформаційного шару немає, і призначено її тільки для того, щоб забезпечити потрібну товщину диска. На неї наносять етикетку. Інформаційний шар металізовано шаром алюмінію товщиною

0,05 мкм. Ємність SSSL диска, діаметром 120 мм 4,7 Гбайт.

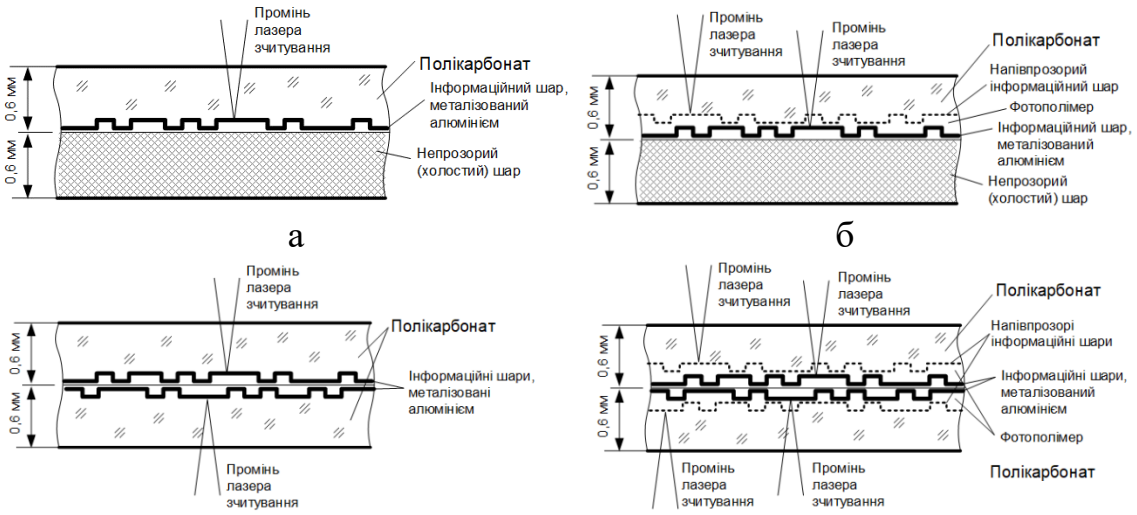


Рис. 8.22. Конструкція диска SSSL (*а*), SSDL (*б*), DSSL (*в*), DSDL (*г*)

Односторонній двошаровий - SSDL (Single Sided Double Layer) (рис. 8.22,*б*). Має інформаційний шар на кожній підкладці, але зчитується з одного і того ж боку. Справа в тому, що інформаційний шар на одній з підкладок (тієї, крізь яку здійснюється зчитування) металізований не алюмінієм, а найтоншим напівпрозорим шаром золота або кремнію. У разі зчитування промінь лазера може фокусуватися або на поверхні напівпрозорого шару, або на поверхні непрозорого шару, металізованого алюмінієм. Під час склеювання двох підкладок між ними вводиться розплавлений прозорий фотополімер, який потім піддається опроміненню потоком ультрафіолетових променів і твердне. Товщина його становить частки мікрона. Оскільки рівень шумів носія тут значно вище, а рівень корисного сигналу нижче, ніж у SSSL, піти доводиться робити набагато більші стандартних і інформаційна ємність диска виходить менше, ніж у DSSL (8,54 Гбайт), який теж має два інформаційних шари.

Особливістю диска SSDL є те, що якщо на ньому записаний DVD-Video або DVD-Audio, то перший шар (напівпрозорий) зчитується як зазвичай - від центру до краю, а ось другий (непрозорий) - від краю до центру. Це зроблено для того, щоб під час переходу від одного шару до іншого програма, що записана на ньому, не переривалася. Однак якщо диск SSDL є DVD-ROM, то обидва шари зчитуються від центру до краю.

Двосторонній одношаровий - DSSL (Double Sided Single Layer) (рис. 8.22,*в*). Аналогічний SSSL, але інформаційний шар є на кожній з двох підкладок. Звідси - загальна ємність диска в два рази більше, ніж у SSSL (9,4 Гбайт).

Двосторонній двошаровий - DSDL (Double Sided Double Layer) (рис. 8.22,*г*). Диск з двома інформаційними шарами на кожній з підкладок. При виготовленні таких підкладок один інформаційний шар покривають напівпрозорим шаром золота або кремнію, після чого наносять рідкий фотополімер і прикладають матрицю з рельєфом другого інформаційного шару. Після затвердіння фотополімеру під впливом ультрафіолетових променів на отриманий рельєф

напилюють шар алюмінію. Дві підкладки склеюють разом і отримують диск з чотирма інформаційними шарами. Ємність його у два рази вище, ніж у SSDL (17,08 Гбайт).

За характером записаної інформації диски можна розподілити на три типи DVD-Video, DVD-Audio і DVD-ROM.

На DVD-Video записують відеопрограми. DVD-Audio є джерелом високоякісних звукових програм. На DVD-ROM, як правило, записують комп'ютерні програми, текстову, графічну та іншу інформація, у тому числі може бути записаний звук або відео. У цьому відношенні DVD-ROM, крім набагато більшої інформаційної ємності, нічим не відрізняється від CD-ROM.

Стосовно можливості запису на диски нової інформації їх теж можна розподілити на три типи [17].

1. Диски тільки для читання.

До них відносять диски всіх трьох вищезазначених типів у разі, якщо їх виготовлено тиражування в заводських умовах. Змінити записану на них інформації неможливо.

2. Диски для одноразового запису - DVD-R (Recordable).

Як правило, мають ємність SSSL - 4,7 Гбайт, хоча вже з'явилися диски DVD-R з ємністю DSSL. Запис на них можна виробляти лише один раз, так само як на CD-R. Залежно від змісту і способу розміщення даних, диск DVD-R після запису набуває властивостей того формату, в якому проводився запис (DVD-Video, DVD-Audio або DVD-ROM) і у подальшому його можуть відтворювати ті ж пристрої, що і однойменні диски заводського виробництва.

Але можуть і не відтворювати. Причин такого явища дві.

По-перше, оптичний контраст запису на DVD-R значно нижче, ніж у запису на тиражованих дисках, і далеко не всі дисководи здатні надійно розпізнавати інформацію за таких умов, тобто все залежить від типу дисковода.

По-друге, під час підготовки записуваного матеріалу повинен бути проведений повноцінний премастеринг, що охоплює формування всієї необхідної для зчитування даного формату інформації службового характеру. Якщо підготовку проведено за якоюсь іншою програмою, то відтворення буде можливо лише на тому дисководі, на якому проводили запис. Або на іншому, але із застосуванням тієї ж програми. Її, до речі, можна записати на тому ж диску.

3. Диски для багаторазового запису.

Їх наразі відомо три види - DVD-RW (Rewritable – перезаписуваний, основний розробник фірма PIONEER, ємність 4,7 Гбайт), DVD+RW (основний розробник – PHILIPS, ємність - 2,8 Гбайт) і DVD-RAM (Read Access Memory - пам'ять з довільним доступом, основний розробник фірма Panasonic, ємність може бути від 2,8 до 5,2 Гбайт. Це магнітооптичний диск, подібний мінідиску). Це одношарові односторонні диски і ємність їх не перевищує SSSL. Запис їх так само як і CD-RW здійснюється шляхом зміни фазового стану речовини інформаційного шару. Як речовина може використовуватися сплав германію, сурми і телуру (GeSbTe), який під час розігріву до відповідних температур здатний переходити з кристалічного стану в аморфний і навпаки. Нижче шару такої речовини розташовується шар, що відбиває. У разі зчитуванні інформації променем лазера малої потужності відбитий

пучок змінює свою інтенсивність.

Перезаписувані диски, так само як і DVD-R у разі копіювання на них інформації з дисків DVD-Video, DVD-Audio або DVD-ROM, набувають властивостей того формату, до якого належить ця інформація, і теоретично її мають зчитувати відповідні DVD-пристрої.

Оптичний контраст запису у тиражованих дисків становить (45…85)% («0» - «1»), у дисків DVD-R – (30…60)%, а у дисків DVD-RW і DVD+W - всього (18...30)% (за 100% тут прийнята інтенсивність падаючого пучка). Що ж стосується DVD-RAM, то вони мають ще менший контраст – (12...25)%. Крім того, внаслідок особливостей магнітооптичного запису, для його відтворення потрібно дещо інша конструкція оптичної головки.

Всі диски DVD мають захист від прямого копіювання, що не дозволяє здійснювати їх перезапис в цифровому вигляді.

Як уже зазначалося, за характером записаної інформації диски DVD розподілені на три типи: DVD-Video, DVD-Audio і DVD-ROM, причому останній відрізняється від CD-ROM тільки набагато більшою ємністю. Два інших типи, на відміну від їх аналогів формату CD, припускають зовсім іншу якість матеріалу.

Диск DVD-Video є носієм відеопрограм. Програми, записані на ньому, мають найвищу якість, наближену до мовленнєвої. Крім того, завдяки великому об’єму, що міститься на диску і, зокрема, службової інформації, програвачі DVD-Video забезпечують користувачеві небачену раніше кількість різноманітних сервісних можливостей.

Відеоінформація, в тому числі субтитри і інші графічні елементи зображення, записують на диск, як правило, з використанням технології стиснення даних за стандартом MPEG2. Роздільна здатність відеозображення у разі такого способу стиснення сягає 720 пікселів на 480 рядків, а тривалість фільму, який можна записати на один інформаційний шар диска - до 135 хв.

Крім того, відеозображення може бути записано зі стисненням за стандартом MPEG1, де передбачено фіксовану швидкість кодування потоку даних. Зображення при цьому є менш якісним, з роздільною здатністю всього 352 пікселя на 240 рядків.

Звуковий супровід фільмів на DVD-Video може бути в чотирьох варіантах. Перший відповідає стандарту CD-Audio, а якщо вже бути точним, то стандарту R-DAT - 16 біт/48 кГц. Компресію в цьому разі не використовують. Щодо якості - це найкращий варіант. Записаний таким способом звук може бути перекодований в об'ємний за системою Dolby Surround [19].

Другий варіант - багатоканальний звук за системою Dolby Digital (AC-3, 5.1). Цей варіант забезпечує шість звукових каналів - п'ять основних (передні - правий, центральний і лівий; задні - правий і лівий) з смугою частот 3...20000 кГц і один додатковий - низькочастотний з смугою 3...120 Гц. Розрядність може бути від 16 до 24 розрядів для частоти 48 кГц, але зі стисненням. Оскільки відтворення такого звуку передбачає наявність у програвачі відповідного декодера, а також відповідного підсилювача і акустичних систем, то передбачено його перетворення в Dolby Surround, коли ефект об'ємного звучання досягають із застосуванням тільки двох акустичних систем. Якщо ж немає і такого декодера, то звуковий супровід

буде звичайним - моно або стерео.

Третій варіант - з використанням компресії за стандартом MPEG1 Audio або за стандартом MPEG2 Audio. Останній дає змогу перекодовувати звук як в Dolby Digital, так і в Dolby Surround.

Четвертий варіант - це також шестиканальний (формат 5.1) цифровий об'ємний звук майстер-класу в стандарті DTS (Digital Theatre Systems). Цей варіант - найкращий за емоційним сприйняттям - до недавнього часу був рідкістю на дисках DVD, оскільки кодування звукового матеріалу за стандартом DTS Digital Surround здійснювали тільки в центральній студії компанії Digital Theatre Systems.

Що ж стосується мовного супроводу, то його може бути записано на восьми мовах. Користувач може обрати будь-який з них на свій розсуд.

Крім того, зображення може супроводжуватися субтитрами на 32-х мовах світу, у тому числі самих екзотичних. Користувач також може обрати один з них або прибрати титри з екрану.

Для DVD-Audio основною вимогою, що забезпечує надвисоку якість звукових програм, записаних на DVD-Audio, є використання лінійного кодування матеріалу (без компресії) з такими характеристиками:

- частота дискретизації, кГц ..... 44,1; 88,2; 176,4 і 48; 96; 192;
- розрядність квантування, біт 16, 20, 24;
- число незалежних каналів ..... від 1 до 6 (5.1).

Таким чином, навіть найгірший з усіх можливих варіантів має якісні показники, аналогічні CD-Audio (16 біт/44,1 кГц). Найкращим буде шестиканальний звук (формат 5.1) з параметрами кодування в кожному з каналів 24 біта/196 кГц. Однак цей варіант, на жаль, неможливий, оскільки швидкість потоку даних, яка потрібна була для зчитування такого об’єму інформації у реальному масштабі часу повинна наближатися до значення 27,6 Мбіт/с, а максимальна ж величина цього параметра у DVD - 9,6 Мбіт/с. Тому звук з параметрами 24 біт/192 кГц (а також 24 біт/178,4 кГц) можливий тільки у дво- або одноканальному варіантах (стерео або моно).

Більш того, шестиканальне звучання з параметрами 24 біт/96 кГц (швидкість потоку даних 13,8 Мбіт/с) можливо тільки з використанням спеціального виду компресії - MLP (Meridian Lossless Packing - упаковка «без втрат», що розроблена фірмою MERIDIAN). Правда, цей вид компресії забезпечує повне відновлення даних після декодування - як ніби ніякої компресії і не було. Саме тому він і доступний для DVD-Audio. Ступінь стиснення в MLP невелика – об’єм даних зменшено всього на 25...55%. Проте, цього достатньо, щоб даний варіант кодування можна було відтворювати в реальному масштабі часу.

Програму з шестиканальним звучанням може бути записано на диск або за технологією Surround Dolby Digital, або за технологією DTS (Digital Theatre Systems). Однак з урахуванням того, що більшість відтворювальних систем домашнього користування є все-таки стереофонічними, передбачено, що у програвачах DVD-Audio шестиканальний звук можливо відтворювати у режимі стерео. Для цього апарат має бути оснащений системою автоматичного зведення шести каналів в два. Така систему називають SMART - System Managed Audio Resourse Technique (техніка системного управління звуковими ресурсами). В

окремих випадках двоканальний (стерео) варіант може бути записано на диску разом з шестиканальним. Тоді у програвачі потрібно вибрати відтворення саме цього варіанту, оскільки будь-яке автоматичне зведення завжди гірше оригінального запису, зробленого звукорежисером. Якщо ж двоканальний варіант відсутній, то буде відтворено шестиканальний і його перекодовано у стерео системою SMART.

З огляду на те, що ємність диска DVD-Audio хоча і велика, але не безмежна, у стандарті передбачено різні комбіновані варіанти з різним розрізненням в різних каналах для шестиканального запису. Найвищий пріоритет у таких варіантах віддано правому і лівому фронтальним каналам, за ними можуть слідувати або центральний, або задні бічні канали і, нарешті, низькочастотний.

Не так давно стандарт на DVD-Audio був доповнений і тепер він передбачає можливість запису на диск крім звукового сигналу ще й елементів відеоінформації - мультимедійного і текстового супроводу музики. Таким чином, в майбутньому, разом з програвачами DVD-Audio і DVD-Video, все більше число моделей буде мати універсальні функції, тобто відтворювати як диски DVD-Audio, так і диски DVD-Video.

Крім того, передбачено, що програвачі DVD-Audio у подальшому зможуть відтворювати диски Super Audio CD з однорозрядним кодуванням DSD (Direct Stream Digital).

Програвачі DVD. На рис. 8.23,*а* наведено структурну схему програвача DVD-Video.

Сигнал, зчитаний з диска оптичною головкою, надходить на блок попередніх підсилювачів, після чого з нього формують цифровий код і виділяють імпульси тактової синхронізації. Крім того, сигнал з оптичної головки надходить на сервопривід, який виділяє і корегує можливі під час відтворювання диска помилки фокусування і автотрекінгу.

Інформаційний сигнал і тактові імпульси надходять на демодулятор і блок захисту від помилок (декодер CIRC Plus). Модулюючим кодом в DVD є канальний код 8-16 (EFM Plus), який ставить у відповідність кожному байту інформації 16-розрядну канальну групу. З'єднувальні розряди тут, на відміну від простого EFM-коду, не використовують, оскільки усунення постійної складової і дотримання обмежень на мінімальний і максимальний інтервали забезпечено іншими способами - вибором однієї з кількох можливих 16-розрядних комбінацій.

Після демодуляції (зворотного перетворення 16-розрядних канальних груп у вихідні байти інформаційного потоку) з нього виділяють службові дані і спрямовують на центральний процесор, що керує роботою всіх систем програвача. А відео- та аудіо обробляють декодером CIRC Plus, який здійснює деперемеження і корекцію виявлених помилок. Тут же відбувається виділення сигналу управління двигуном, що обертає диск і сигналів блокової, кадрової та інших видів синхронізації.

Після цього інформаційні дані надходять на систему VBR (Variation Bit Rate), яка управляє потоком даних для відеодекодера MPEG2. Оскільки його робота передбачає нерівномірну швидкість цього потоку, що залежить від динаміки відеосюжету, то система VBR виконує роль буфера, що накопичує в ОЗП дані, які

зчитують з диска і передає їх декодеру MPEG2 у відповідь на його запит.

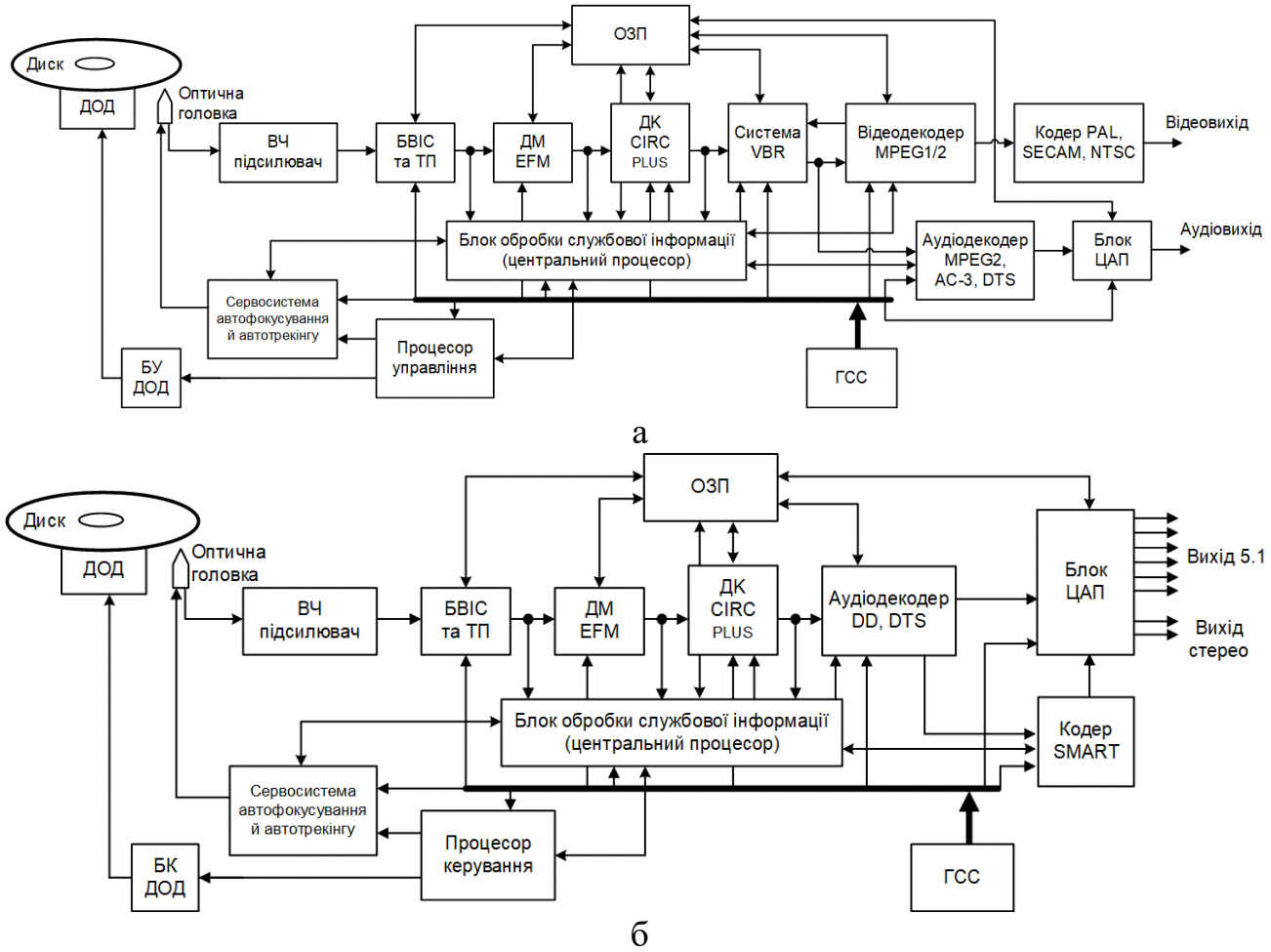


Рис. 8.23. Структурна схема програвача DVD-Video (*а*) та DVD-Audio (*б*)

Відеодекодер, крім того, може працювати з даними, компресованими за технологією MPEG1, яка передбачає постійну швидкість потоку даних.

Після декомпресії відеоінформацію транскодують у той чи інший телевізійний формат (NTSC, PAL, SECAM) і вона надходить на вихід програвача (вхід телевізора).

Звукова інформація надходить на блок аудіодекодера (MPEG2, AC-3, DTS), де, залежно від способу її запису на диску, технічних можливостей програвача і бажання користувача, виконують її декодування або перекодування. Отримана в результаті послідовність відліків або буде перетворено в аналогову форму внутрішніми ЦАП, або надходить на вихід у цифровій формі для перетворення у зовнішньому декодері.

Роботою всіх систем програвача керує центральний процесор, яким, у свою чергу, керує користувач або з пульта дистанційного управління (ДУ), або органами керування на передній панелі програвача. У DVD-дисководів функцію органів керування виконує відповідний драйвер комп'ютера.

Що стосується сумісності з іншими носіями, то тут неухильно виконано тільки одну умову - всі DVD-програвачі здатні відтворювати диски CD-Audio і CD-Video. Стосовно CD-R, CD-RW, а також DVD-R м DVD-RW - такої вимоги немає, тому

найчастіше програвачі DVD їх не відтворюють або відтворюють без гарантії якості.

Структурну схему програвача DVD-Audio наведено на рис. 23,*б*. Вона значно простіше схеми програвача DVD-Video і більше схожа на схему програвача CD-Audio.

8.4.5. Super Audio CD (SACD)

Формат цифрового звукозапису SACD розроблений тандемом SONY / PHILIPS як альтернатива звуковій версії формату DVD - диска DVD-Audio [18].

Формат SACD докорінно відрізняється від усіх інших цифрових звукових форматів (CD, DAT, MD, DVD-Audio) тим, що запис матеріалу на носій тут проведено не в формі лінійних ІКМ-відліків, а як безперервний цифровий потік, сформований одноразрядним квантуванням аналогового звукового сигналу за частоти дискретизації 2,8224 МГц. Слід зауважити, що технології одноразрядного квантування використовують наразі і для перетворення звуку в інших форматах, однак там отриманий однорозрядний потік, в кінці кінців, все-таки зводять до послідовності багаторозрядних відліків (16-, 20-, 24-розрядних) і в подальшому всі операції з формування потоку даних перед записом на носій виконують вже з ними. У форматі SACD нічого подібного не роблять. Отриманий в результаті квантування цифровий потік безпосередньо записують на носій. До нього тільки додано необхідну службову і синхронізуючу інформацію. Таку технологію названо розробниками Direct Stream Digital (DSD) – безпосередній цифровий потік.

Останнім часом все більшого поширення набувають методи А/Ц і Ц/А перетворення на основі використання сигма-дельта модуляції, коли квантування здійснюють лише одним розрядом, але з частотою, що в десятки і сотні разів перевищує частоту Найквіста. У процесі такого перетворення аналізують не амплітуду аналогового сигналу, а напрямок її зміни. Якщо амплітуда зростає, то результатом перетворення буде 1, а якщо зменшується - то 0. Нульовий рівень кодується нулями і одиницями, що чередуються (рис. 8.24).

В результаті, шум квантування цифрового звукозапису залишається в своїй найбільш «безпечній» формі з частотою першої гармоніки 2,8 МГц і його легко фільтрувати (точніше, зміщується в область нечутних частот) під час відтворення запису, не потребуючи для цього складних апаратних засобів.

Внаслідок цього технічні характеристики SACD мають дуже високі показниками, а програвачі – відрізняються простотою реалізації. Динамічний діапазон і відношення сигнал/шум у звуковому діапазоні сягають 120 дБ і вище, а амплітудно-частотна характеристика лінійна до частоти 100 кГц.

Щодо сумісності з програвачами CD на диску SACD, крім версії матеріалу у формі DSD, записують ще й версію того ж матеріалу у звичайному форматі CD-Audio, що закладено ву конструкції диска SACD і дає можливість відтворювати програму на CD-програвачах або CD-дисководах.

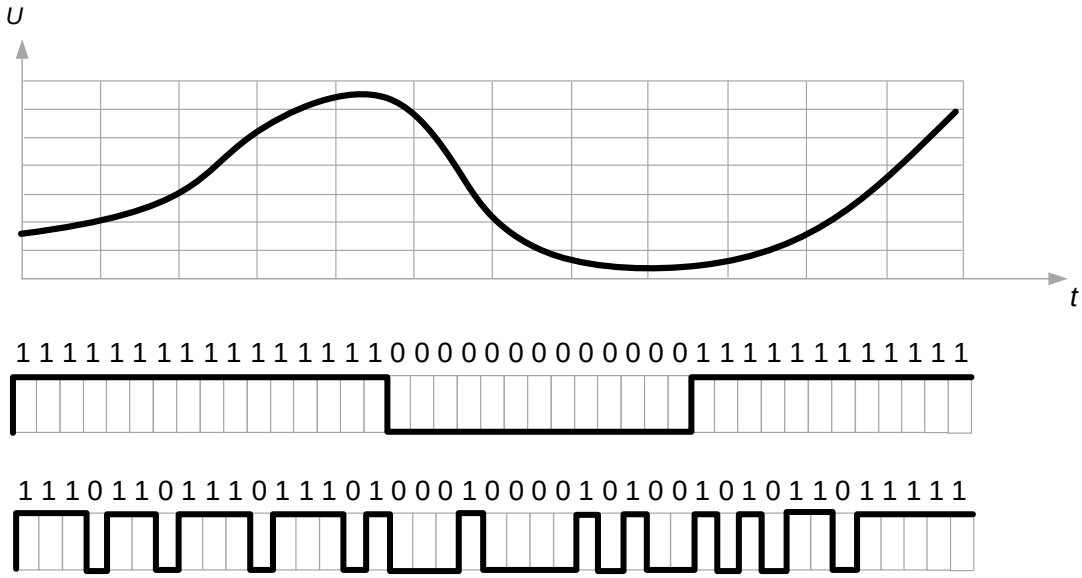


Рис. 8.24. Особливості формування цифрового потоку при сигма-дельта модуляції

Розміри диска SACD такі ж, як у CD і DVD - діаметр 120 мм, товщина 1,2 мм. Фізична структура його представляє собою щось середнє між звичайним диском CD і одностороннім двошаровим DVD (SSDL) (рис. 8.25).

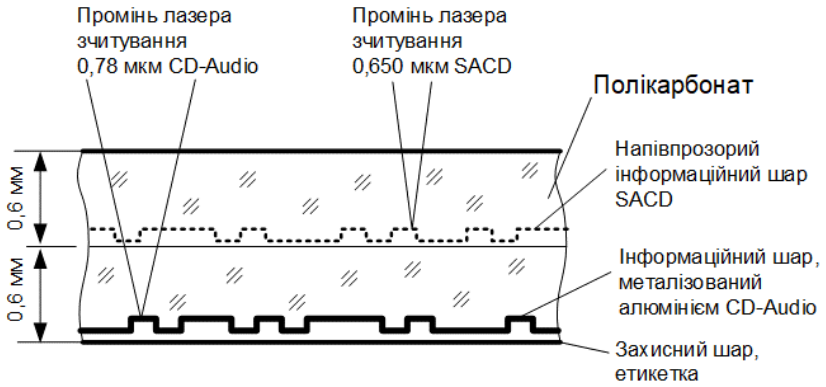


Рис. 8.25. Конструкція диска SACD

Так само як диск DVD, його складено з двох склеєних разом підкладок товщиною 0,6 мм кожна. Так само як у диска SSDL, зовнішня (для пристрою, що зчитує промені) підкладка містить напівпрозорий інформаційний шар високої щільності (4,7 Гбайт), утворений шляхом напилення найтоншої плівки золота. Цей шар є носієм даних DSD і їх зчитує оптична головка з числовою апертурою 0,6 променем лазера з довжиною хвилі випромінювання 650 нм. Однак, другий інформаційний шар з непрозорим алюмінієвим покриттям розташовано не поблизу місця склейки підкладок (як у диска SSDL), а біля протилежної поверхні, що покрита захисним шаром з міцної пластмаси. Цей інформаційний шар містить версію матеріалу у стандарті CD-Audio (16 розрядів з частотою дискретизації 44,1 кГц) і доступний тільки для зчитування оптичною головкою звичайного CD-програвача або дисковода з числовою апертурою 0,45 і довжиною хвилі випромінювання лазера 780 нм. Відстань від цього шару до зовнішньої поверхні

диска, як і у CD - близько 1,2 мм. Таким чином, досягли повної сумісності, як дисків, так і програвачів CD і SACD.

Інформаційний шар DSD дає змогу записати на ньому до 74 хв. музики у стереозвучанні або з використанням технології стиснення Direct Stream Transfer, розробленої фірмою PHILIPS. До стереоваріанту додано ще і можливість запису шестиканального варіанту (найчастіше - SDDS - SONY Dinamic Digital System).

Інформаційний шар формату CD-Audio містить версію того ж матеріалу, отриману шляхом зниження частоти дискретизації в 64 рази розробленим фірмою SONY алгоритмом Super Bit Mapping Direct. Може бути і оригінальний запис, зроблений у форматі CD-Audio.

Для захисту матеріалу, записаного на диск SACD, від копіювання розробники передбачили так звану систему PSP - Pit Signal Processing, яка підмішує до потоку даних спеціальний ідентифікаційний сигнал у процесі виготовлення майстер-диска. Крім того, ширина піт, що записують, модульовано за певним законом, створюючи додаткову ступінь захисту інформації.

Що стосується суб'єктивного порівняння якості звучання форматів DVD-Audio (24 біт/96 кГц) і SACD, то обидва формати настільки досконалі, що важко однозначно визначити, який з них краще. Тут все залежить від умов прослуховування і від конкретного змісту музичного матеріалу.

У разі прослуховування CD-Audio і DVD-Audio з розрізненням 24 біт/96 кГц в одних і тих же умовах різницю можна помітити тільки за безпосереднього порівняння. Звичайно, звучання DVD більш прозоро і деталізовано.

Цифровий звукозапис формату CD-Audio впритул наблизився до межі, за якою подальше покращення технічних характеристик, по суті, мало що дає. Різницю можна помітити тільки за наявності дуже високоякісного відтворювального комплексу. Тільки для такої апаратури оптимальним можна вважати розрізнення порядку 24/96 кГц або 24/192 кГц. Подальше поліпшення вухо все одно вже не оцінить. А в звичайних домашніх умовах прослуховування якості CD більш ніж достатньо.

Набагато більший емоційний вплив на слухача надає не збільшення розрізнення, а збільшення числа каналів відтворення. Панорамний 5.1-канальний звук у форматі Dolby Digital (AC-3) або Digital Theatre Systems (DTS) навіть для розрізнення 16 біт/48 кГц істотно краще в порівнянні з будь-яким двоканальним - хоча б і з більшим розрізненням - 24 біт/192 кГц. Так що досягнуті на сьогоднішній день технічні характеристики цифрового звуку (за умови, звичайно, високопрофесійного запису музичних програм і такої ж високопрофесійної розробки апаратури звукозапису і звуковідтворення) цілком достатні для задоволення потреб органів слуху людини.

Зусилля має сенс направити на збільшення інформаційної ємності носіїв, яка хоча і вельми велика, але все ще дуже далека від гранично можливої.

8.5. Цифровий магнітний запис

8.5.1. Основні принципи цифрового магнітного запису

Цифровий магнітний запис використовує принципи магнітного запису, тобто формування магнітного потоку в зазорі магнітної головки і намагнічування магнітної стрічки, що рухається з постійною швидкістю повз головки [9].

Принципи аналого-цифрового перетворення, кодування, модуляції абсолютно ідентичні як для CD, різниця лише у носії і способі записи.

Якщо звуковий сигнал в аналоговому магнітофоні перетворено в просторовий розподіл намагніченості на стрічці, то стрічка цифрового магнітофона зберігає лише виконавчі символи, отримані у результаті перетворення сигналу у послідовність чисел. У разі правильного їх відтворення звуковий сигнал може бути відновлено без будь-яких спотворень. Тому для цифрового магнітного запису зникає головне обмеження підвищення якості звукозапису - залежність від властивостей магнітної стрічки і головки, шумів і інших спотворень характерних для аналогового запису, та її визначає лише параметри АЦП і ЦАП. Часові спотворення сигналу, спричинені детонацією, також легко усувають, оскільки значення часових інтервалів у ІКМ-сигналі відомі. У підсумку, звучання з цифрового магнітофона, зазвичай, не відрізнити від звучання пристроїв, де АЦП і ЦАП з'єднані безпосередньо, без каналу магнітного запису [18].

Для забезпечення стійкості записаного на стрічку цифрового сигналу до помилок, спричинених забрудненням магнітних головок, пошкодженням магнітного шару стрічки, шумами, ривками стрічки в СПМ тощо, використовують принципи завадостійкого кодування (кодер CIRC). До ІКМ-сигналу під час запису додають додаткові перевірочні або коригувальні дані. Під час відтворення їх використовують спеціальна система корекції для виявлення та виправлення помилок в цифровому сигналі. Процес додавання до сигналу додаткових даних носить назву кодування. Виявлення і виправлення помилок називають декодуванням.

Одиночна помилка в кодовому слові після його перетворення в ЦАП викликає таке спотворення аналогового сигналу, яке може сприйматися на слух, як клацання. Величина спотворення і гучність клацання залежать від ваги спотвореного розряду кодового слова. У цифрових системах звукопередавання вживаються заходи для усунення або істотного зменшення будь-яких цифрових помилок. Для їх виявлення і виправлення застосовують так звані надлишкові коди.

Найбільш простим способом введення надмірності для виявлення одиночних помилок є таке кодування цифрового слова, за якого кількість одиниць доповнюють до непарного числа. Для цього у кодове слово вводять один розряд - одиницю або нуль. Якщо під час зчитування інформації було прийнято слово з парною кількістю одиниць, то приймається рішення про те, що такий відлік повинен бути підданий корекції.

Неважко помітити, що таке кодування дозволяє лише виявити спотворення одного з біт кодового слова. Правильно вказати на спотворений біт і тим більше виправити його неможливо.

На практиці застосовують значно складніші коди, які забезпечують виявлення помилки будь-якої кратності і виправлення спотворень кількох біт у прийнятому кодовому слові. Такі коди називають завадостійкими.

Одним з найбільш поширених завадостійких кодів є код Хеммінга. Для виявлення та виправлення одиночних помилок, що виникають під час передавання 16-розрядних слів, в слово, що передають, додано ще 6 біт, які кодують спеціальним чином. При цьому є можливість виявляти всі дворазові помилки (спотворення будь-яких двох біт в 22-розрядному слові). Однак надмірність коду Хеммінга становить 37,5%.

Завдяки завадостійкому кодуванню ІКМ-сигнал під час кожного відтворення повністю очищено від помилкових значень і стає можливим багаторазовий перезапис фонограм без погіршення якості.

У разі відтворення ІКМ-сигналу його значення попередньо запам'ятовують у пристрої відновлення часового масштабу. Потім його зчитують з ЦАП з частотою дискретизації (для цифрового магнітного запису прийнято частоту дискретизації 48 кГц), що задано кварцовим генератором. Таким чином усувають часові спотворення, пов'язані з детонацією і дрейфом швидкості.

Основні переваги цифрового магнітного запису [20]:

- можливість отримання як завгодно великого динамічного діапазону і як завгодно малих спотворень сигналу;
- відсутність детонації звуку;
- можливість багаторазового копіювання фонограм без погіршення якості;
- відсутність модуляційних шумів і шуму носія;
- відсутність спотворень амплітудно-частотної характеристики за будь-яких рівнів сигналу в межах динамічного і частотного діапазонів.

Однак, необхідність запису довгих послідовностей двійкових сигналів, що представляють значення закодованого ІКМ-сигналу, вимагає дуже широкої смуги частот запису, оскільки швидкість потоку двійкових символів за високої частоти дискретизації і великої розрядності АЦП досягає значної величини. Це вимагає розміщення на плівці набагато більшого числа переходів намагніченості, ніж у разі аналогового запису. Тільки одне значення ІКМ-сигналу, обчислене 16-розрядним АЦП, являє послідовність з шістнадцяти одиниць і нулів, які записують на стрічку. За одну секунду таких послідовностей за частоти 48 кГц має бути записано 48000. Для двоканального стереозапису швидкість передавання даних складе:

$$V_{\text{пер}} = 2 \times 16 \times 48000 = 1{,}54 \text{ Мбіт/с}.$$

Після додавання перевірочних даних завадостійкого коду швидкість передавання зростає приблизно до 2,5 Мбіт/с.

Якщо мінімальна довжина хвилі записи (λ) в звичайному касетному магнітофоні становить 3 мкм, а інтервал намагніченої ділянки, що відповідає одному біту, дорівнює половині довжини хвилі запису ($B = \lambda/2$), то для запису цифрового сигналу на 2 доріжки потрібна швидкість руху стрічки :

$$V = \frac{\lambda V_{\text{пер}}}{2n_{\text{дор}}} = \frac{3 \cdot 10^{-6} \cdot 2{,}5 \cdot 10^{6}}{2 \cdot 2} = 1{,}9 \ \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

При цьому час звучання звичайної компакт-касети складе всього 1,5 хв. Звичайно, це абсолютно неприйнятно, оскільки цифровий магнітофон повинен, щонайменше, забезпечити однакові витрати стрічки порівняно з аналоговим. Для цього, перш за все, повинна бути зменшена мінімальна довжина хвилі запису, що вимагає застосування більш високоякісних стрічок і магнітних головок. Сучасні стрічки (наприклад, металопорошкові) і магнітні головки на основі сендасту і фериту дозволяють проводити запис за мінімальної довжини хвиль до 0,5 мкм.

Час звучання можна збільшити і іншим способом: число доріжок на стрічці для цифрового запису може бути збільшено у разі зменшення їх ширини в порівнянні з доріжками аналогового запису. Така можливість виникає в зв'язку з особливостями запису двійкових сигналів, що мають всього два стани - «0» і «1». При цьому зникають проблеми забезпечення лінійності передавальної характеристики каналу магнітного запису, оскільки необхідно визначити не точне значення амплітуди відтвореного сигналу, а надати висновок щодо одного з двох їх крайніх значень. При цьому значно спрощено структуру каналу запису.

Підсилювач запису має забезпечить тільки перемикання напрямку струму запису в голівці відповідно до двійкових символів (0 або 1) на виході. Оскільки немає необхідності точно відтворювати форму імпульсів під час запису, канал цифрового магнітного запису більш стійкий до змін параметрів стрічки, струму запису тощо, ніж канал аналогового магнітного запису. І при цьому, що особливо важливо, не потрібно великого відношення сигнал-шум. У разі цифрового запису це відношення визначає лише правильність відновлення двійкового символу, а не динамічний діапазон, як для аналогового звукозапису.

Для досягнення прийнятної ймовірності помилок у каналі запису, за якої на виході системи корекції забезпечено безпомилкове відтворення, досить мати відношення сигнал-шум (20…30) дБ. У результаті стає можливим зменшення ширини доріжок для цифрового магнітного запису до (10…20) мкм, що забезпечує підвищення поверхневої щільності запису. Додаткова перевага прямого способу запису - відсутність спеціальної головки стирання. Стирання попереднього сигналу зроблено безпосередньо сигналом нового запису.

Важливою особливістю магнітного запису є те, що канал магнітного запису не здатний передавати постійну складову сигналу. Магнітна головка диференціює сигнал намагніченості стрічки, реагуючи лише на зміни намагніченості. Чим частіше відбуваються ці зміни (чим вище частота сигналу запису або більше швидкість руху магнітної плівки), тим більше рівень сигналу з головки відтворення. А чим більші послідовності з незмінним значенням намагніченості (тривалі послідовності «нулів» або «одиниць»), тим більша ймовірність неправильного відновлення сигналу, адже вихідний сигнал з головки в цьому випадку дорівнює нулю. На рис. 8.26 наведено типовий відгук головки відтворення на записаний цифровий сигнал [20].

Для того, щоб у каналі відтворення відбувались зміни рівня сигналу,

застосовують канальне кодування сигналу. Перед записом на стрічку цифровий сигнал перетворюють так званим канальнім кодуванням (модулятор EFM) з додаванням надлишкових біт, яке для цифрового запису в якійсь мірі аналогічно введенню передспотворень до записаного сигналу для аналогового запису.

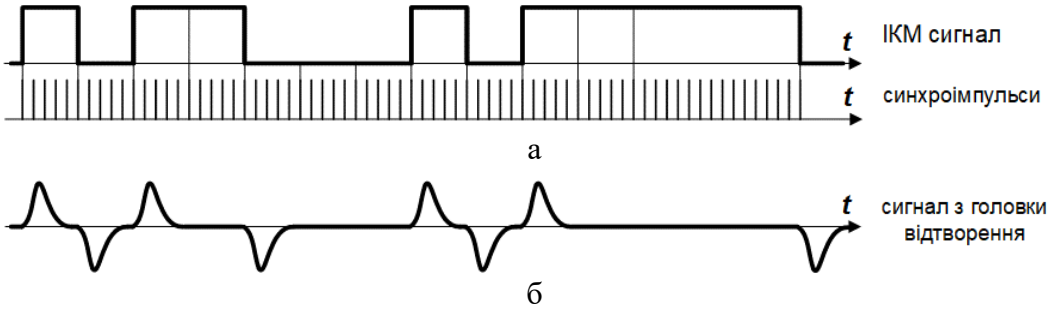


Рис. 8.26. Форма ІКМ сигналу намагніченості магнітної плівки (*а*) та на виході головки відтворення (*б*)

За допомогою канального кодування тривалі послідовності одиниць або нулів «проріджують» протилежними за рівнем бітами і перетворюють у двійковий сигнал, який досить часто змінює своє значення. Чим частіше відбувається зміна стану сигналу від «1» до «0» і навпаки, тим вужче смуга частот, яку займає цифровий сигнал (внаслідок зменшення низькочастотних складових), тим сприятливіші умови для правильного відновлення цифрового сигналу в разі відтворення.

Друга мета застосування канальних кодів - надання записаному сигналу властивості самосинхронізації для забезпечення правильного визначення тактового інтервалу (інтервал тривалості одного біта відносно кількості синхроімпульсів та їх початку) в умовах шумів, паразитної амплітудної і частотної модуляцій відтвореного сигналу.

У деяких ситуаціях за невисокої щільності запису для цього застосовують додаткову доріжку, на якій паралельно з основними даними записано тактову частоту. Для високощільного цифрового магнітного запису використовують властивості самосинхронізації канальних кодів: спеціальною схемою фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ) під час відтворення формують тактову частоту, відповідну тактовим інтервалам відтвореного цифрового сигналу. Схема ФАПЧ стежить за часовими змінами відтвореного сигналу і змінює тактову частоту таким чином, щоб забезпечити правильне відновлення значень ІКМ-сигналу.

Як уже зазначалось, важлива перевага цифрового запису ІКМ сигналу полягає у можливості довільної зміни його часового масштабу (тривалості біт) під час запису на стрічку. Перед записом ІКМ сигнал, який умовно поділяють на фрагменти певної довжини, як правило, попередньо запам'ятовують у блоці напівпровідникової пам'яті - оперативному запам'ятовуючому пристрої (ОЗП). Запис у ОЗП виконують з частотою дискретизації, а зчитування даних під час запису на стрічку - з більш високою частотою. У результаті на інтервалі часу блоку даних з'являється вільне місце, яке можна використати для запису разом із стиснутим фрагментом ІКМ сигналу додаткових даних. Перш за все, це дані завадостійкого кодування, що застосовують для захисту значень ІКМ сигналу від

випадкових помилок. Крім того, записують спеціальні маркерні сигнали початку кожного блоку даних, сигнали для системи автоматичного регулювання двигунів СПМ, додаткову інформацію, яка потрібна для пошуку потрібного фрагменту запису тощо.

Під час відтворення ОЗП використовують для відновлення часового масштабу ІКМ сигналу. Сигнал, відтворений з стрічки, запам'ятовують в ОЗП, а потім зчитують з ОЗП з частотою дискретизації для подання на вхід ЦАП. Оскільки частоту дискретизації при цьому задано кварцовим генератором, детонація практично відсутня.

Часто разом з перетворенням часового масштабу ІКМ сигналу під час запису-відтворення ОЗП виконує операції перемеження-деперемеження значень ІКМ сигналу. У разі запису на стрічку відліки ІКМ сигналу розміщують не у природному порядку, а врозкид, за певним алгоритмом. Під час відтворення виконують обернене перетворення (деперемеження) і подачу значень відліків у ЦАП у природному порядку. Перемеження-деперемеження необхідно для захисту значень ІКМ сигналу від пакетних помилок (випадінь, коли спотворено одразу цілий ряд символів цифрового сигналу), які не можуть бути виправлено застосованим завадостійким кодом, що виправляє зазвичай не більше 2…3 помилок в кодовому слові. Пакетні помилки створено внаслідок пошкодження шару стрічки на якій-небудь ділянці або забруднення головки і стрічки, що призводить до втрати сигналу. Пакетні помилки можуть досягати довжини до декількох тисяч біт. Завдяки перемеженню такі пакетні помилки в процесі деперемеженні перетворюють в одиночні (подвійні) помилки окремих кодових слів, які можуть бути виправлено завадостійким кодом. Техніка перемеження-деперемеження дозволяє ефективно боротися з випадіннями і значно спрощує реалізацію схем кодування-декодування.

Подальше нарощування здатності коду щодо виправлення помилок призводить до сильного зростання обсягу додаткових перевірочних (надлишкових) даних, які необхідно записувати разом з ІКМ сигналом.

8.5.2. Цифрові магнітофони S-DAT та R-DAT

Апаратуру цифрового магнітного запису (цифрові магнітофони) за призначенням розподіляють на професійну і побутову. За конструктивними особливостями та особливостями експлуатації цифрові магнітофони поділяють на апаратуру з повздовжнім записом та апаратуру з похило-рядковим записом [25].

Узагальнену схему запису цифрового сигналу на магнітну стрічку наведено на рис. 8.27,*а*.

Як зазначалося вище, цифровий сигнал, який в ІКМ формі містить звукові сигнали двох стереоканалів, має швидкість передавання до 2,5 Мбіт/с. Спектр частот повного цифрового сигналу з додатковими службовими даними, промодульований канальним кодом, сягає (4…6) МГц. Щоб записати такий сигнал на стрічку, потрібна швидкість руху стрічки щодо головки до (3…5) м/с.

Для зменшення інтенсивності цифрового потоку застосовують багатоканальні (багатодоріжкові) блоки головок з повздовжнім записом. При цьому швидкість

передавання даних знижено пропорційно кількості доріжок на стрічці, що призводить до зменшення необхідної смуги частот запису і дає можливість зменшити швидкість руху стрічки. Якщо використовувати, наприклад, 20-доріжковий блок головок, то швидкість руху стрічки повинна становити (15…25) см/с.

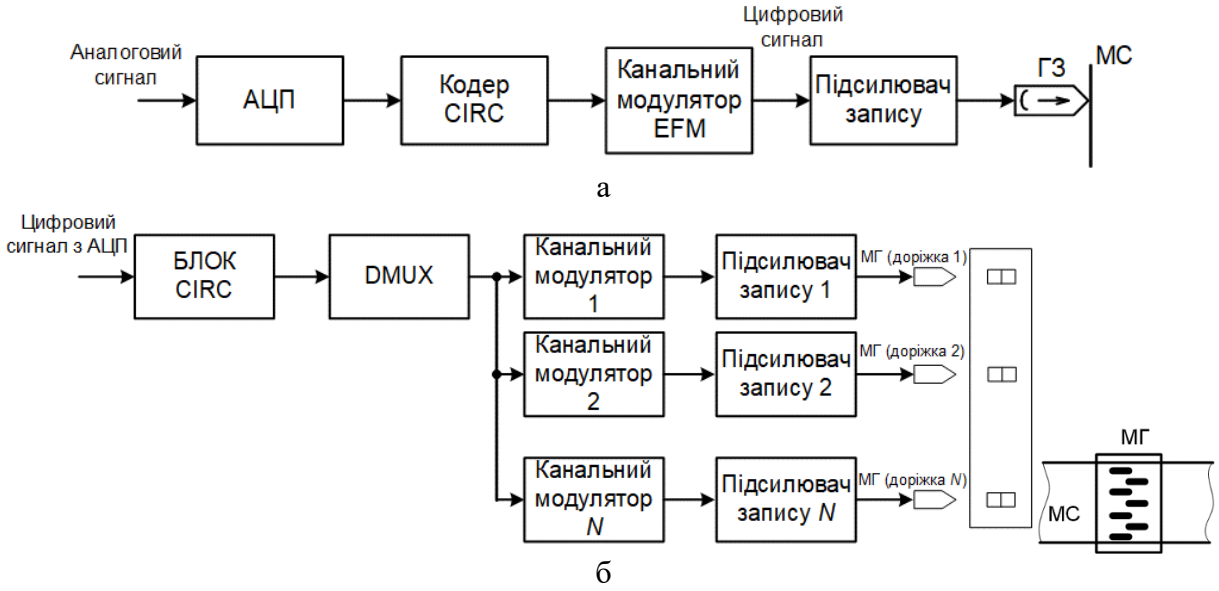


Рис. 8.27. Узагальнена схема запису цифрового сигналу на магнітну стрічку (*а*) та структура багатодоріжкового запису (*б*)

Цифрові магнітофони, побудовані за таким принципом, мають нерухомий блок головок, повз який протягують стрічку (рис. 8.27,*б*). Такі магнітофони із стаціонарними магнітними головками позначають S-DAT - Stationary head Digital Audio Tape, DASH - Digital Audio Stationary Head (розробники Sony, Studer), PD - Professional Digital (розробники Mitsubishi, Telefunken).

Перевага такої схеми побудови - малий знос стрічки і головок та простота СПМ з мінімальною кількістю рухомих вузлів. До недоліків слід віднести складність виготовлення блоків магнітних головок і збільшений обсяг електронних пристроїв. Магнітофон повинен мати множину (за числом доріжок) підсилювачів запису-відтворення і, можливо, канальних модуляторів-демодуляторів зі схемами ФАПЧ. Необхідно, особливо у разі високощільного запису, вживати особливих заходів з нейтралізації часових неузгодженостей цифрових сигналів різних доріжок, що виникають навіть внаслідок невеликих перекосів стрічки щодо блоку головок.

Інший спосіб запису широкосмугового цифрового сигналу на стрічку полягає у реалізації необхідної високої швидкості руху стрічки щодо головки. Щоб досягти бажаного результату у разі малих витрат стрічки, використовують головки, встановлені на барабані, що обертається. Залежно від розташування обертового барабана з головками щодо стрічки, що рухається, можливі поперечно-рядковий запис (доріжки запису розташовано майже під прямим кутом до краю стрічки) і похило-рядковий запис (доріжки розташовано під гострим кутом до краю стрічки). Такі принципи вперше були використано для відеозапису. Поперечно-рядковий

формат і зараз продовжують застосовувати в професійних студійних відеомагнітофонах.

Похило-рядковий формат широко застосовували як у професійному, так і в домашньому відеообладнанні. На невеликих лінійних швидкостях транспортування стрічки (2…5) см/с такі відеомагнітофони мають велику відносну швидкість головка-стрічка (5…6) м/с і більше, що дозволяє проводити запис сигналів зі смугою частот до 5 МГц за відношення сигнал-шум до 40 дБ. Перші цифрові магнітофони для запису звуку були зроблені саме на основі відеомагнітофонів.

Одна з головних переваг техніки запису головками, що обертаються, - можливість досягнення більшої щільності у порівнянні з поздовжнім багатодоріжковим записом. У разі запису багатодоріжковим блоком головок між доріжками запису необхідно мати захисні інтервали шириною не менше (10…15)% від ширини доріжки запису, які потрібні для обмеження взаємовпливу каналів, що породжується зміщенням головок щодо доріжок запису, а також ефектом бокового зчитування, що полягає у тому, що головка може зчитувати сигнали з ділянки ширшої, ніж довжина зазору. У результаті поверхня магнітної стрічки не може бути повністю використана для запису.

У разі використання так званого азимутального похило-рядкового запису запис похилих рядків виконують без проміжків між ними, впритул. Відсутність впливу сусідніх доріжок на відтворений сигнал забезпечено використанням двох головок з взаємно-перекошеними зазорами. Кут нахилу (азимут) однієї з головок становить, наприклад +6°, а інший - -6°. Тому магнітні штрихи, що записують головки, виявляються на сусідніх рядках запису похилими під кутом відносно один одного.

Магнітна головка з нахилом робочого зазору реагує при цьому тільки на штрихи, нахил яких збігається з нахилом зазору. Під час відтворення головка може відслідковувати доріжку запису з деякою помилкою - захоплювані з сусідньої доріжки сигнали притлумлюють. Захисний ефект азимутального запису посилюється із зростанням частоти записаного сигналу. Для низькочастотних (довгохвильових) сигналів він виявляється слабше, а для високочастотних сигналів неточний кут нахилу зазору головки призводить до значного зменшення рівня сигналу на виході головки відтворення.

Однак виграш у щільності породжує і ряд труднощів. Велика швидкість руху стрічки щодо головки в магнітофонах з головками, що обертаються, призводить до швидшого зносу головки, стрічки, барабана. СПМ такого магнітофона складніший, ніж у магнітофона із стаціонарної головкою, потрібно більш висока точність оброблення його деталей. Необхідна також спеціальна сервосистема, що забезпечує правильне проходження головок доріжками запису.

Вибір тієї чи іншої структури цифрового магнітофона залежить від сфери застосування, технічних вимог до параметрів, припустимої вартості однієї години запису, необхідної тривалості запису, обмежень за розмірами і багатьох інших факторів.

На рис. 8.28 наведено зовнішній вигляд стрічкопротягувального механізму R-DAT магнітофона (*а*), узагальнену конструкцію барабана магнітних головок, що

обертається (*б*) та розташування доріжок на магнітній стрічці похило-рядкового запису (*в*) [21].

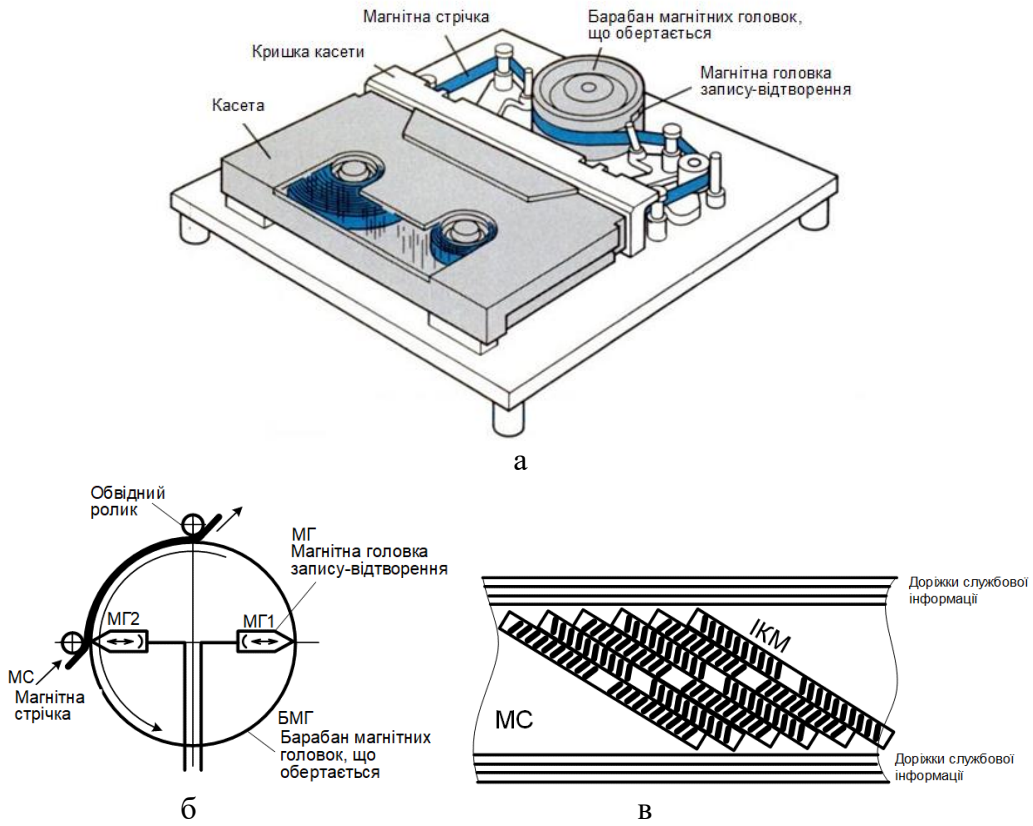


Рис. 8.28. Зовнішній вигляд стрічкопротягувального механізму R-DAT магнітофона (*а*), узагальнена конструкція барабана магнітних головок, що обертається (*б*) та розташування доріжок на магнітній стрічці похило-рядкового запису (*в*)

Магнітофони з барабаном магнітних головок, що обертається, позначають як R-DAT - Rotary head Digital Audio Tape. Стандарт на R-DAT-магнітофон передбачає шість режимів роботи, що забезпечують їх широкі можливості і гнучкість використання. Звуковий носій DAT-формату на вигляд нагадує зменшену вдвічі компакт-касету (розміри 73 мм × 54 мм × 10,5 мм), усередині якої розташована чотиримініметрова (3,81 мм) магнітна стрічка товщиною 13 мкм з металопорошковим робочим шаром. Серед основних параметрів стандарту R-DAT зазначають [21]:

· кількість каналів запису-відтворення 2;

· частота дискретизації – основна, 48 кГц, додаткова, 32 кГц і для відтворення фонограм з попереднім записом, 44,1 кГц;

· розрядність квантування – 16 біт, додатково, 12;

· швидкість руху стрічки – основна, 8,15 мм/с;

· швидкість руху стрічки відносно головок – основна, 3,133 м/с;

· швидкість обертання головок – 2000 об/хв;

· кут охоплення стрічкою барабана, що обертається - 90º, діаметр барабана – 30 мм;

· кут нахилу доріжок - 6º23”, кут нахилу зазорів головок±20º;

· швидкість передавання даних – основна, 2,46 Мбіт/с;

· код системи коригування помилок - подвійний код Ріда-Соломона з перемеженням;

· канальний код – 8/10:

· час запису – 120 хв;

· магнітна стрічка – металопорошкова, товщиною 13 мкм;

· ширина доріжки – 13,591 мкм;

· смуга відтворюваних частот – 2…22000 Гц.

В основному режимі роботи використовують частоту дискретизації 48 кГц і 16-розрядний лінійне квантування. Цей режим є обов'язковим для R-DAT-магнітофонів і застосовують його для запису-відтворення з аналогового входу магнітофона. Крім того можливий також цифровий перезапис фонограм з магнітофона на магнітофон з використанням їх цифрових входів і виходів.

Додаткові режими є необов'язковими і призначені для запису з цифрового входу програм цифрового радіомовлення (ІКМ-мовлення), або для збільшення часу запису-відтворення R-DAT-магнітофона, або для запису чотирьох каналів. Для них передбачено іншу частоту дискретизації та іншу розрядність й інші параметри якості. Також є режими відтворення попередньо записаних в студіях звукозапису касет з частотою дискретизації 44,1 кГц для узгодження з форматом CD-Audio.

8.5.3. Функціональна схема цифрового магнітофона

На рис. 8.29 наведено спрощену блок-схему магнітофона формату R-DAT. У разі запису аналоговий сигнал надходить на вхід АЦП, на виході якого сформовано ІКМ сигнал [25].

Кількість вхідних каналів може бути різною Для побутового магнітофона вхідних каналів два (ЛК і ПК). Для студійних магнітофонів кількість вхідних каналів може бути 8, 16 і більше.

Усі цифрові дані вхідних каналів (ІКМ сигнали кожного каналу) формують у послідовний потік з часовим ущільненням мультиплексором каналу запису та оперативного запам’ятовуючого пристрою ОЗП1.1. Кодер завадостійкого кодування забезпечує перемежовування даних потоку та додає перевірочні надлишкові символи, що описують порядок кодування інформаційних даних для подальшого виявлення та виправлення помилок під час відтворення. Це збільшує стійкість системи до довгих серій помилок у разі відтворення. Дані зчитують з пам'яті зі швидкістю більшою, ніж записують, що забезпечує стиснення сигналу. Крім того до основної додають виконавчу інформацію (субкод).

Після етапу завадостійкого кодування послідовний потік даних розділяють на два потоки, кожний з яких після незалежного канального кодування та підсилення буде потрапляти у магнітну головку, створюючи відповідний магнітний потік і забезпечуючи залишкову намагніченість в магнітній стрічці (МС).

Канальне кодування забезпечує модулятор канального коду 8/10, де всю інформацію перетворено до виду, оптимального для магнітного запису-відтворення.

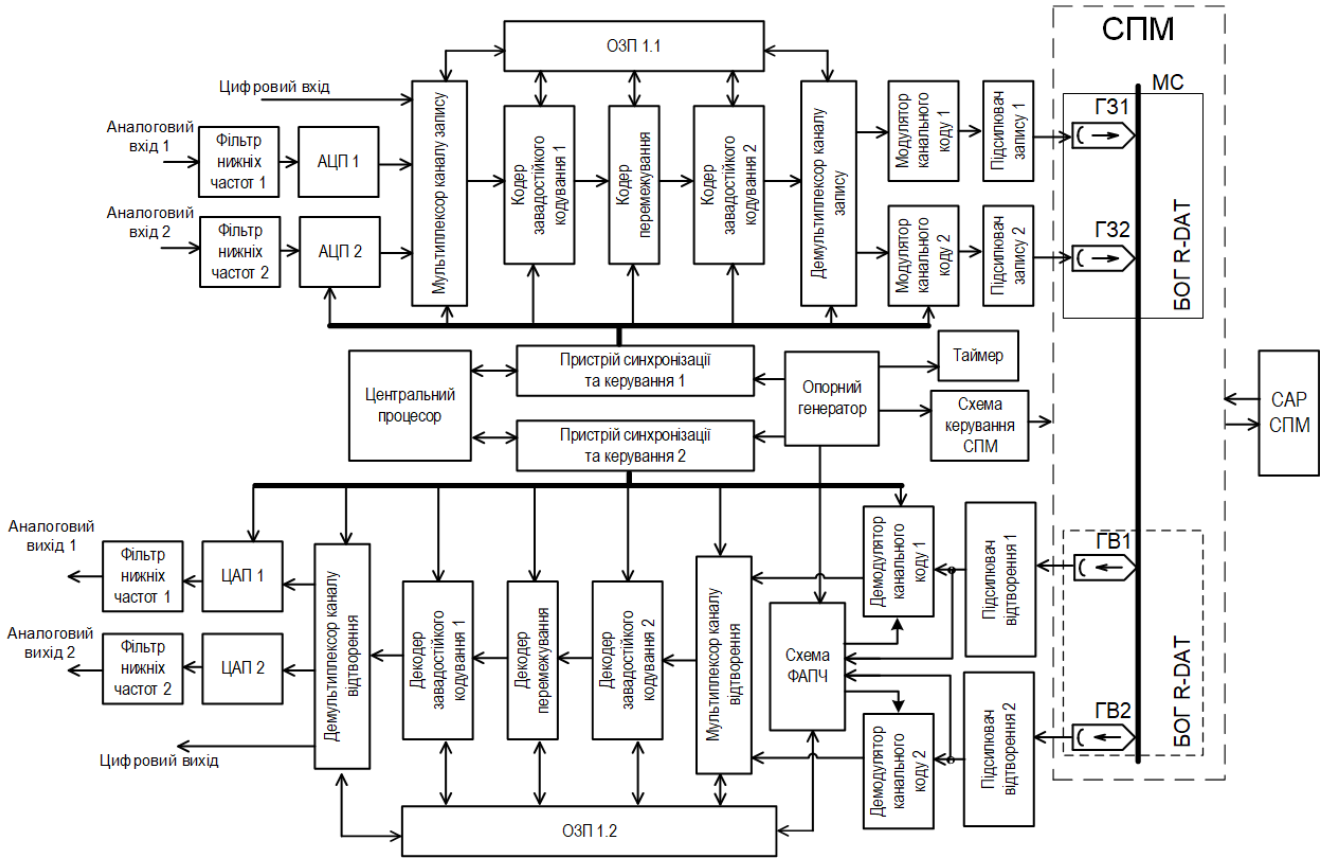


Рис. 8.29. Функціональна схема магнітофона R-DAT

При відтворенні на виході головок з'являються імпульси, які використовують для відновлення вихідного бінарного сигналу. Цей сигнал з виходу магнітної головки підсилює підсилювач відтворення і він надходить в схему фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ) та демодулятор канального коду (ДМ КК). Ці два вузли каналу відтворення (ФАПЧ і ДМ КК), працюючи з синхроімпульсами опорного генератора забезпечують формування прямокутного бінарного сигналу з послідовністю нулів та одиниць і повністю відновлюють ІКМ сигнал.

На цьому етапі декодування виконують виділення службових даних (субкоду) та відокремлення їх від основного сигналу. Інформацію щодо додаткових даних використовує схема управління для встановлення необхідного режиму роботи магнітофона. Ці службові дані надходять у схему керування режимами магнітофона і систему сервокерування роботою рухомих елементів стрічкопротягувального механізму (систему автоматичного регулювання (САР) стрічкопротягувального механізму (СПМ)).

Враховуючи, що на виході канального декодування є два потоки даних з кожної головки, для формування послідовного потоку даних застосовано мультиплексор каналу відтворення.

Важливо зазначити, що у разі об’єднання або розділення потоків обов’язково використовують оперативно-запам’ятовуючий пристрій (ОЗП), адже виконують при цьому часове ущільнення або розширення бітів інформації.

Схемою корекції (декодером завадостійкого кодування з деперемеженням) здійснюють виявлення та виправлення помилок. У разі зчитування з оперативної

пам'яті відліків ІКМ сигналу під час завадостійкого кодування виконують деперемеження символів, виправлення помилок, що виникли у процесі запису-відтворення, або маскування невиправлених символів схемою інтерполяції.

Далі сигнал надходить на демультиплексор каналу відтворення, де його розподіляють з послідовного потоку даних на два канали.

Відновлення аналогового сигналу з цифрового виду виконує ЦАП та ФНЧ.

Для того, щоб головки, що обертаються, чітко слідували дуже вузькими похилими доріжками, на стрічку даних записують спеціальні сигнали системи пошуку доріжок (автотрекінгу). Автоматична система стеження оперує цими сигналами для того, щоб управляти двигуном ведучого валу. Схема керування двигуном блоку обертовних головок (БОГ) забезпечує можливість зчитування даних субкоду ву режимах швидкого пошуку потрібної ділянки запису.

Керування та синхронізація роботи всіх пристроїв магнітофона здійснюють спеціальними схемами.

Для цифрового магнітофона, що працює у декількох режимах з різними частотами дискретизації, схема керування може автоматично встановлювати потрібний режим відтворення. Додаткову сервісну інформацію щодо часу звучання, порядкового номеру фрагмента запису може бути використано для точного пошуку потрібної ділянки запису, редагування тощо. Для здійснення електронного монтажу на стрічці передбачено запис спеціального адресно-часового коду. Схема керування також формує команди керування СПМ магнітофона у разі натискання відповідних кнопок.

Двигунами і електромагнітами СПМ керує схема сервокерування, що забезпечує постійний натяг стрічки в усіх режимах роботи, підтримання сталості середньої швидкості стрічки і деякі інші функції, що залежать від конкретного побудови тракту руху цифрового магнітофона.

Крім аналогових входів і виходів цифровий магнітофон може мати і цифрові входи-виходи. Це дозволяє, минаючи стадію цифро-аналогового і аналого-цифрового перетворень, виконувати так званий цифро-цифровий перезапис фонограм з одного магнітофона на інший.

8.6. Система магнітооптичного запису звуку «Мінідиск»

У 90-х роках минулого століття з'явився новий вид цифрової аудіоапаратури - програвач мінідисків (MD). Носієм запису такого формату був мініатюрний диск, діаметром 64 мм, встановлений в плоску пластикову касету, розміром 68х72х5 мм. Доступ до робочої поверхні диска здійснюють через спеціальне вікно, яке поза дисковода закрито шторкою, що зсувається. Тривалість записаної на ньому програми досягала 74 хв., як і у компакт-диска. Параметри цифрового запису теж відповідали формату CD - 16 розрядів квантування, частота дискретизації 44,1 кГц. Всі основні етапи перетворення звукового сигналу в системі «Мінідиск» також відповідали формату CD [11].

Однак, на відміну від компакт-диска формату CD-Audio, який не передбачав можливість запису, на мінідиск можна записувати звукову інформацію, причому як у аналоговому, так і у цифровому вигляді. Останнє означає, що фонограма з

компакт-диска або DAT-касети може бути скопійована на новому пристрої практично без втрати якості.

Але система «Мінідиск» мала деяку відмінність у структурі сигналу, що записували. Запис здійснено не в повній відповідності до оригіналу, а із стисненням об'єму інформації в 5…6 разів за стандартом ATRAC (Adaptive Transform Acoustic Coding) з втратою вхідних даних. Це призвело до можливості застосовування носіїв малих розмірів без зміни тривалості запису.

Стиснення інформації за методом ATRAC засновано на усуненні так званої психофізичної надмірності звукового сигналу, тобто тієї його частини, яку людське вухо все одно не сприймає. Ті ж принципи лежать у основі стиснення за стандартами MPEG1 і MPEG2, особливо з високим рівнем компресії (Layer 3). Видалену під час стиснення надлишковість під час відтворення не відновлюють, тому записані на міні-диск програми вже не можуть вважатися точними копіями, а отже, ніякого порушення авторських прав у разі копіюванні не відбувається.

Для розширення можливостей системи MD щодо запису фонограм в цифровому вигляді, більшість мінідискових апаратів має у своїй структурі перетворювач частоти дискретизації. Окрім основної частоти 44,1 кГц передбачено можливість проводити запис цифрових сигналів і з частотами дискретизації 48 кГц і 32 кГц.

Швидкість під час зчитування даних з мінідиска може бути 1,2 м/с, що забезпечує тривалість 74-хв. та 1,4 м/с - відповідно 60-хв.

Сам носій – мінідиск –є магнітооптичним диском (МОД), що поєднує в собі магнітний запис інформації магнітною головкою на кшталт DAT магнітофона і оптичне зчитування сфокусованим променем лазера, як у компакт-диска.

В основі зчитування інформації з магнітооптичного диска лежить магнітно-оптичний ефект Керра, який передбачає зміну оптичних властивостей речовини залежно від її намагніченості або прикладеного магнітного поля (рис. 8.30).

Під оптичними властивостями тут слід розуміти відбиття, пропускання, поляризацію світла і інші явища. Серед речовин, у яких спостерігають магнітооптичний ефект, можуть бути феромагнетики, що мають у своїй структурі магнітні атоми, - такі, як $Y_3Fe_5O_{12}$ або $GdFe_3O_{12}$; ортоферити, що утворюють магнітні домени - такі, як CdTbFe або TbFeCo (сплав ферум, кобальт, тербій) і інші матеріали, що містять метали та рідкоземельні елементи. Тонкі плівки з таких матеріалів мають переважно перпендикулярну намагніченість, тобто силові лінії магнітного поля, утвореного ними, перпендикулярні поверхні плівки.

Магнітооптичний ефект Керра полягає у наступному. Якщо плівку, яка містить ділянки з протилежною намагніченістю, висвітлити променем лінійно поляризованого світла, то кути поляризації пучка, відбитого від цих ділянок, будуть різними (рис. 8.30,*а*). Кут між векторами поляризації світла, відбитого від різнополярних ділянок, називають кутом Керра.

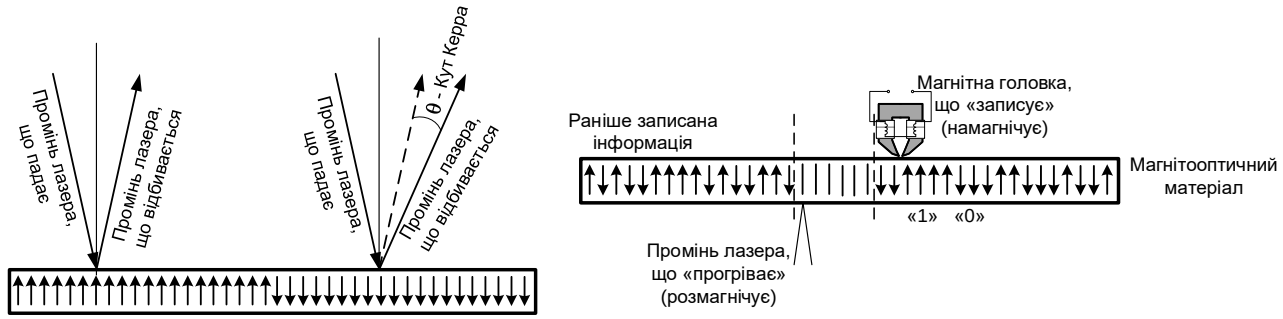


Рис. 8.30. Магнітооптичний ефект Керра (*а*) та термомагнітний ефект (*б*)

Якщо відбите світло пропустити через аналізатор (пластинку з анізотропного речовини), то його інтенсивність також вийде різною. Помістивши далі на шляху променя фотоприймач, можна отримати електричний сигнал інформації, що містить поєднання зон намагніченості реєструючого шару.

Щоб записати інформацію на магнітооптичний носій, використовують термомагнітний ефект. Він полягає у тому, що якщо ділянку плівки, що має певну намагніченість, помістити в магнітне поле протилежного напрямку і нагріти променем лазера вище деякої температури, званої точкою Кюрі, то ця ділянка отримає напрямок намагніченості, що збігається з напрямком зовнішнього магнітного поля (рис. 8.30,*б*) . У разі охолодження плівки, отримана таким чином орієнтація магнітного поля зберігається.

У системі «Мінідиск» у режимі запису сигналу застосовують термомагнітний ефект, коли за допомогою лазерного променя більшої потужності магнітний матеріал прогрівають до температури Кюрі або вище, тим самим якби розмагнічуючи магнітооптичну речовину. Для формування магнітного поля відповідного інформаційному ІКМ сигналу застосовують магнітну головку, якою магнітний матеріал диска намагнічують відповідно до цифрового ІКМ сигналу, створюючи, умовно, протилежну намагніченість окремих ділянок («+» відповідає «1», «-» - «0»), забезпечуючи формування магнітограми. За такого способу запису нова магнітограма ніяк не залежить від того, що було записано на диску раніше [11].

У разі зчитування той же лазерний промінь, але зі зменшеною потужністю випромінювання, фокусують на доріжку запису. Під час обертання диска, як і у системі CD, світловий промінь лазера відбивається від поверхні магнітооптичної плівки залежно від намагнічування диска і потрапляє на фотоприймач, на виході якого формовано цифровий потік, відповідний магнітооптичному запису.

Крок доріжки в системі MD - 1 мкм. Мінімальна довжина піта близько 1 мкм.

Зчитування мінідиска, як і компакт-диска, здійснюють від центра до периферії. Мінімальний діаметр зони запису - 32 мм. Кількість циклів запису - не менше мільйона.

Типову структуру магнітооптичного диска наведено на рис. 8.31. Основою його, як і для компакт-диска, є полікарбонат. Реєструючий шар *в* даному випадку - з'єднання тербія (Tb), заліза (Fe) і кобальту (Co). Для захисту від корозії реєструючий шар з обох боків охоплено шарами нітриду кремнію SiN. Як відбивний шар використовують алюміній (Al).



Рис. 8.31. Структура магнітооптичного диска

Функціональну схему програвача мінідисків наведено на рис. 8.32.

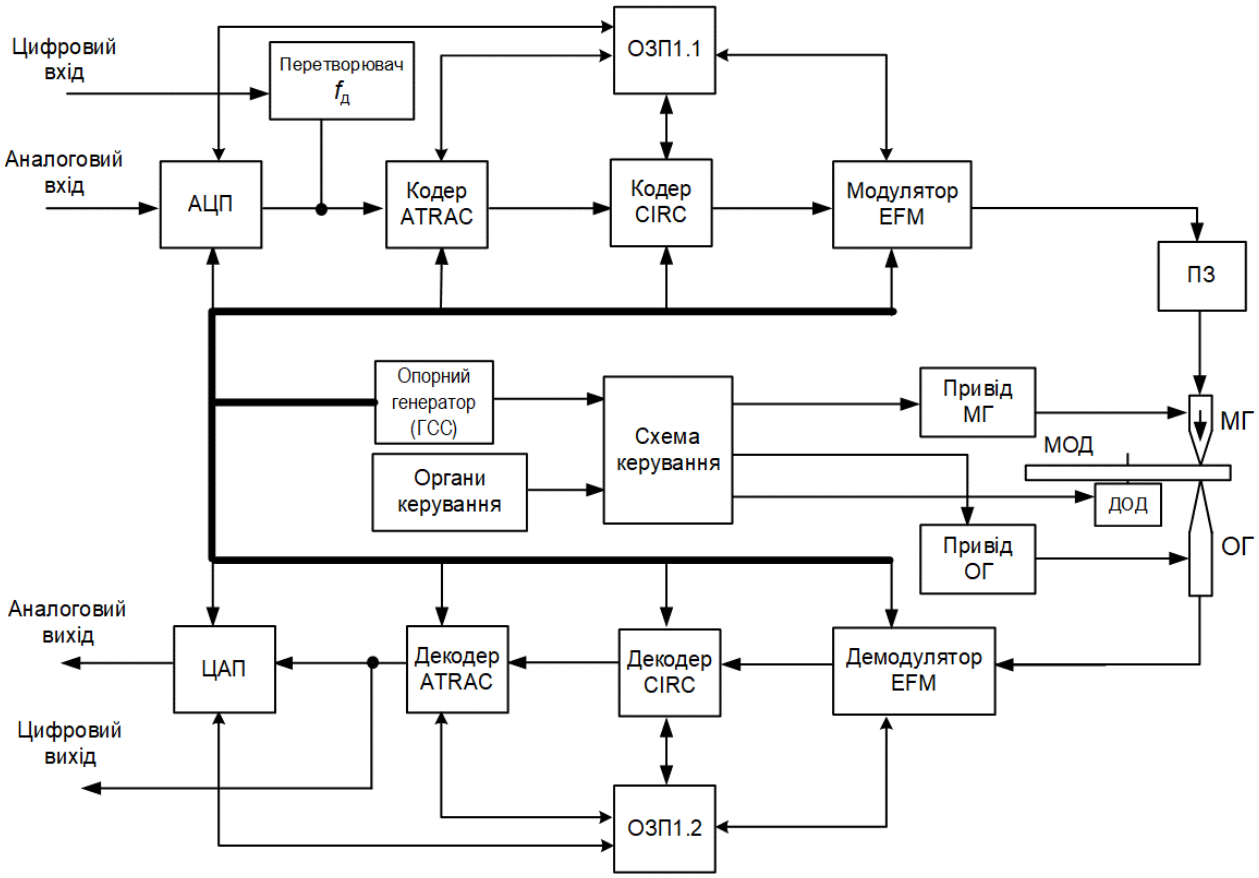


Рис. 8.32. Функціональна схема програвача мінідисків

У режимі запису аналогового сигналу його спочатку в АЦП перетворюють у цифровий, тобто у послідовність 16-розрядних відліків, з частотою дискретизації 44,1 кГц. Якщо сигнал цифровий, але його частота дискретизації відмінна від 44,1 кГц, то здійснюють її перетворення відповідним перетворювачем.

Отриманий цифровий сигнал надходить на кодер ATRAC, де виконують компресію цифрового сигналу, у результаті чого обсяг даних скорочено в 5-6 разів.

Далі отриману послідовність кодують системою завадостійкого кодування CIRC, модулюють кодом EFM і подають на підсилювач запису (ПЗ) і, відповідно, вхід магнітної головки (МГ). Головка формує змінне магнітне поле, відповідне

одиницям і нулям записуваної інформації. Цю інформацію фіксує робочий шар носія в точці його розігріву, який забезпечено сфокусованим променем лазера, що працює в режимі підвищеної потужності.

Під час відтворенні промінь того ж самого лазера, але у режимі зниженої потужності, сканує поверхню диска. Відбитий пучок з промодульованою магнітограмою площини поляризації, проходячи через аналізатор, надходить на фотоприймач, який формує електричний сигнал, що містить зчитану інформацію. Все це відбувається в оптичній головці (ОГ).

У подальшому, як і у разі відтворенні фонограм у системі CD «Компакт-диск», виконують демодуляцію EFM, декодуванню CIRC, але є додаткова функція, відсутня у компакт-диска - декомпресія ATRAC, і остаточне перетворення цифрового сигналу в аналоговий у ЦАП.

Як і у будь-якому цифровому пристрої запису-відтворення звукових сигналів у системі «Мінідиск» для усунення часових спотворень, часового ущільнення тощо застосовують оперативно-запам'ятовуючий пристрій (ОЗП) і опорний генератор синхроімпульсів (ГСС). А для керування роботою рухомих частин мінідискового апарата, фокусуванням, трекінгом, регулюванням потужністю лазера тощо передбачена система керування (СК) і відповідні приводи: оптичної головки (ОГ), магнітної головки (МГ), двигуна обертання диска (ДОД).

8.7. Перспективи розвитку носіїв інформації

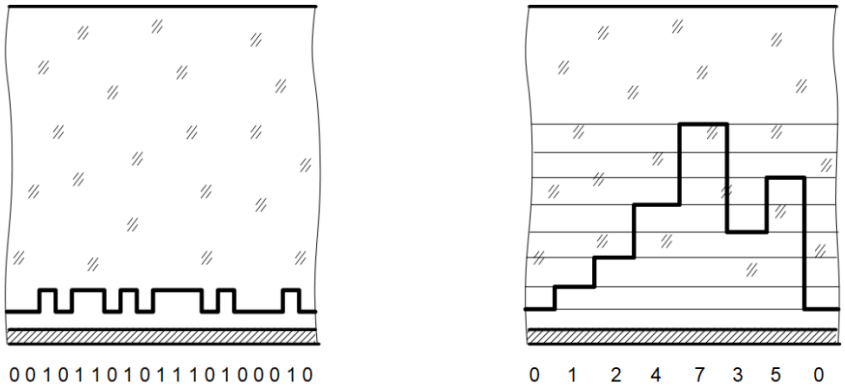
Ще влітку 2000 р. компанія SONY анонсувала вихід нових форматів DDCD і MDLP. Формат MD Long Play (MDLP) є вдосконаленим форматом MD (Mini Disc - «міні-диск»). MDLP-формат дозволяє записувати інформації вдвічі або навіть вчетверо більше ніж на звичайний «міні-диск». У результаті тривалість запису стає приблизно 5 год. 20 хв. проти звичайних 74 хв., максимально можливих для MD-формату. Формат MDLP компанія SONY позиціонує як для побутового, так і професійного застосування.

Формат Double Density CD (DDCD) є новим форматом компакт-дисків підвищеної щільності. Розроблено його спільно компаніями SONY і PHILIPS для загального використання. У порівнянні зі звичайним компакт-диском DDCD дозволяє зберігати вдвічі більше інформації, тобто замість 650 Мбайт - цілих 1,3 Гбайта. Новий формат не передбачає створення нових виробничих потужностей, а збільшення ємності досягнуто незначними модифікаціями звичайного CD-формату. Новий дисковий формат має більш вузьку доріжку і меншу довжину піта у порівнянні з CD-форматом для запису однакової кількості інформації. Внаслідок цього зменшено площу, що займає інформація [19].

У відповідь на розробки SONY, компанія TDK запропонувала свій формат компакт-диска високої щільності Multilevel Recording. Технологія, розроблена для TDK фірмою CALIMETRICS, дозволяє збільшити обсяг інформації, що зберігають на компакт-диску інформації у три рази. Це становить понад 2 Гбайта.

Основа технології Multilevel Recording полягає у багаторівневому принципі запису. Як відомо, на звичайному компакт-диску дані кодують пітамі. Довжина піта характеризує кількість одиниць двійкового коду, довжина інтервалу між

пітами - кількість нулів двійкового коду (рис. 8.33,*а*). Розробники CALIMETRICS запропонували використовувати для запису даних не тільки довжину пітів, але і їх глибину. Тепер піт одиничної довжини може приймати значення не тільки 1, але також 2, 3, 4, 5, 6 і 7 (рис. 8.33,*б*).



а б

Рис. 8.33. Розріз стандартного компакт-диска (*а*) та багаторівневого (восьми) ML-диска (*б*)

Відбитий промінь лазера, що зчитує, залежно від глибини піта створює свій особливий сигнал. Розпізнає ці сигнали спеціальний чіпсет, вбудований в програвач компакт-дисків. В результаті використання глибини вдалося записати більше інформації на одиницю площі, що крім усього іншого дозволяє значно збільшити швидкість зчитування-запису даних. І дійсно, швидкість запису на ML-диски становить 36х, а зчитування до 90х і більше. Також, як і у випадку з Double Density CD, перехід на диски ML не вимагає створення додаткової виробничої інфраструктури.

Справжнім проривом в технології запису інформації слід вважати розробку американською фірмою C3D тривимірного флуоресцентного дискового носія - багатошарового оптичного диска FMD. При цьому запис здійснюють не тільки за площею диска (двовимірний запис), а й за його глибиною на кількох шарах. Обмежуючим фактором звичайного двовимірного запису є те, що його неможливо реалізовувати за наявності більш ніж двох інформаційних шарів. Починають позначатися інтерференція, розсіювання, шуми, перехресні завади, які виникають через те, що падаючий і відбитий пучки мають одну і ту ж довжину хвилі і є когерентними. У разі збільшенні числа шарів корисний сигнал вже неможливо буде відокремити від шумів [19].

Тривимірний диск фірми C3D використовує принципово іншу технологію запису інформації, засновану на властивостях випромінювання флуоресцентних матеріалів і допускає наявність дуже великого числа шарів (рис. 8.34). Такий FM-диск фірми C3D, який має 10 шарів з розмірами, що дорівнюють розмірам звичайного CD (діаметр 120 мм, товщина 1,2 мм), має ємність в 140 Гбайт [19].

FM-диск є абсолютно прозорим і не має відбивного шару. В основі роботи флуоресцентних дисків лежить явище фотохромізму, яке полягає у зміні фізичних властивостей (зокрема поява флуоресцентного світіння) деяких хімічних речовин під впливом лазера. Найбільшою мірою подібну властивість мають речовини з групи фульгідів, зокрема, фотохром.

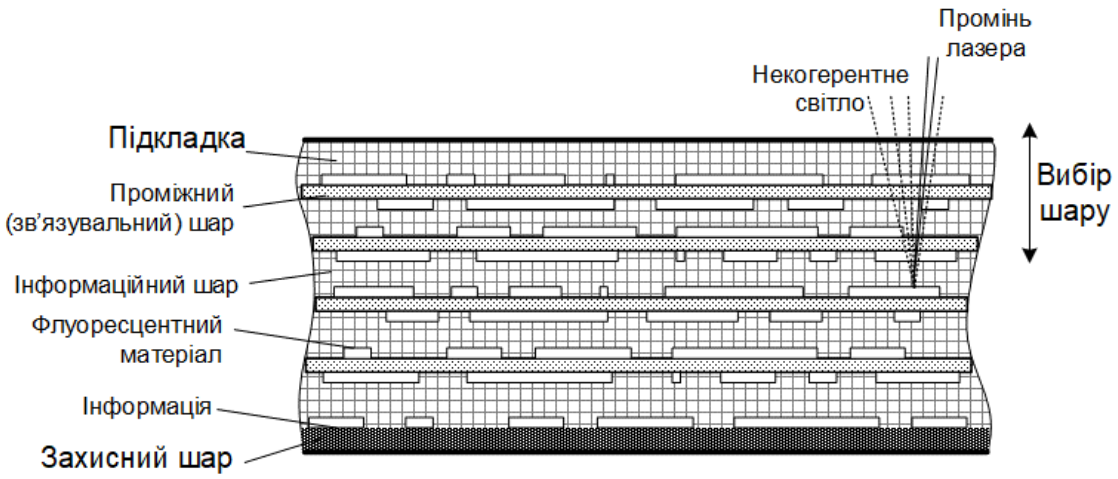


Рис. 8.34. Переріз FM-диска, виготовленого гарячим пресуванням

Сам FM-диск являє собою листковий пиріг, кожен шар якого є прозорим і має спіральні канавки (за аналогією зі звичайним компакт-диском їх можна назвати пітами), заповнені флуоресцентним матеріалом. У разі збудження такого матеріалу лазерним променем він починає випромінювати як когерентне, так і некогерентне світло. Інформацію записують тільки некогерентним світлом. У разі зчитування збуджений фотохром випромінює світло, зсовуючи спектр падаючого на нього випромінювання у бік червоного кольору на певну величину (у межах 30...50 нм), що дозволяє легко розрізнити сигнал лазера і світло, що випромінює матеріал диска. В результаті вдається уникнути погіршення характеристик сигналу через явища, пов'язані з когерентністю, і його якість у разі збільшення числа шарів знижується незначно. Розробники стверджують, що навіть для кількості шарів понад сто не відбуватиметься сильного спотворення сигналу,

У разі зчитування лазер фокусують на певному шарі, що збуджує його флуоресцентні елементи, після чого це світіння сприймає фотодетектор. Згідно з теоретичними викладками, у разі використання синього лазера (480 нм) стає можливим збільшення щільності запису інформації до декількох терабайт на один FM-диск.

Важлива особливість формату FMD полягає у можливості паралельного зчитування відразу з декількох шарів багатошарового диска. При цьому, якщо записувати послідовність біт не вздовж доріжки, а вглиб по шарах, то можна значно підвищити швидкість вибірки даних. Саме за цю особливість FM-диски і називають «тривимірними».

Що стосується технології виробництва FMD, то тут дуже багато схожості з виробництвом звичайних компакт-дисків. З прозорого полікарбоната окремо виготовляють інформаційні шари, які потім зв'язують між собою. Для виробництва FMD використовують дві стандартні технології: метод гарячого тиснення і метод фотополімеризації. Єдине, що дуже важливо в разі виробництва FM-диска, так це отримання точної форми піта, оскільки в подальшому його заповнюють флуоресцентною речовиною. Для цих цілей використовують нікелеву матрицю (штамп).

Вже зараз ведуть активні розробки записуваних FM-дисків. Абсолютно

реальною стає можливість створення FM-дисків, частину шарів яких призначено для читання, а частину шарів - для запису. В рамках технології FMD можливе створення і перезаписуваних дисків. Для цього передбачено використання матеріалу, здатного переходити з стабільного стану у стан, підвладний флуоресценції, і навпаки [19].

Незважаючи на бурхливий прогрес в удосконаленні дискових носіїв запису, майбутнє все ж таки не за ними, а, скоріше за все, за твердотільними об'ємними носіями. Зараз до цієї категорії носіїв можна віднести пристрої постійної і оперативної пам'яті (ПЗП і ОЗП), хоча і не тільки їх. Ємність подібних пристроїв вже досягла таких розмірів, коли цілком реально записати годинну музичну програму з якістю DVD у блок постійної пам'яті, який має дуже невеликі габарити. Широке застосування отримали так звані SSD-накопичувачі, (solid-state drive – з англійської — комп'ютерний запам'ятовувальний пристрій на основі мікросхем пам'яті та контролера керування ними, що не містить рухомих механічних частин. Обсяг даних (у тому числі цифрової музики та мови будь-якого формату, дозволяє зберігати вже не хвилини, а багато годин записів найвищої якості, наприклад, SATA III SSD від TEAMGROUP QX обсягом 15,3 Тбайт.

Переваги твердотільних накопичувачів пов’язані, у першу чергу, з відсутністю механічних вузлів, вони не бояться ні трясіння, ні ударів, ні вібрацій, їх розміри, в принципі, можуть бути як завгодно малими. Кристал, наприклад, ніоботу літію ($LiNbO_3$) високої чистоти з впровадженими у кристалічну решітку атомами заліза (0,015%) об'ємом всього 1 $см^3$ може містити до 1 терабайта інформації, записаної голографічним способом об'ємного запису інформації [25].

Разом з твердотільними накопичувачами застосовують й магнітні накопичувачі, наприклад, LTO (Linear Tape-Open) картриджі. Такі накопичувачі застосовують для архівування будь-якої інформації, причому в великих обсягах. Так сучасний магнітний LTO картридж може мати ємність 18 і більше терабайт. У перспективі розробники планують довести обсяг записаної інформації на один картридж формату LTO до 192 терабайт. І це за вартості і габаритів у десятки разів менших, ніж вартість і габарити інших носіїв цифрової інформації зібраних в RAID масиви з таким же об’ємом пам’яті.

Додаткові можливості звукотехнічним пристроям надають сучасні технології безпроводового передавання інформації, зокрема звукової. Найбільш поширеними у наш час для цієї мети є мережеві технології Bluetooth за стандартом IEEE 802.15.1, що надає можливість передавання даних до 100 м на швидкості до 24 Мбіт/с (специфікація v3) та Wi-Fi за стандартом IEEE 802.11 хоча і з меншою дальністю, але з більшою швидкістю до 72 Мбіт/с (специфікація *n*). Широко представлено на ринку смарт-колонки різних фірм-виробників з достатньо якісним відтворенням звуку, а прослуховування музичного і мовного контенту на смартфонах наразі найпоширеніше явище.

Додаткові можливості як для оброблення так і зберігання звукового контенту у цифровій формі надають сучасні хмарні технології та інтернет. Технологія передавання мови за інтернет-протоколом (VoIP – voise over internet protocol) є альтернативою звичайній телефонії, а сервіси надання доступу до програмного забезпечення та баз даних, застосування штучного інтелекту не лише для пошуку

аудіоконтенту за обмеженою кількістю ознак, але і для генерування нового – все це є також ознакою сьогодення і визначатиме розвиток звукотехнічних засобів у майбутньому.

Контрольні запитання.

1. Відобразіть графічно форму (сигналограму) аналогового звукового сигналу та цифрового сигналу з імпульсно-кодовою модуляцією.
2. Зазначте принцип аналого-цифрового перетворення звукових сигналів.
3. Зазначте принцип цифро-аналогового перетворення звукових сигналів.
4. Зазначте визначення дискретизації і квантування сигналів.
5. Наведіть приклад ІКМ сигналу та зазначте основні параметри АЦП.
6. Наведіть графічно приклад аналого-цифрового перетворення фрагмента звукового сигналу з трирозрядним квантуванням.
7. Наведіть вираз визначення динамічного діапазону сигналу з урахуванням розрядності квантування.
8. За яким принципом обирається частота дискретизації та розрядність квантування і як впливають ці параметри на вихідний сигнал.
9. Наведіть визначення миттєве значення сигналу, двійковий, відлік, вибірка, семпл, біт, символ, байт.
10. Наведіть графічно структуру та опишіть призначення й принцип роботи вузлів аналого-цифрового перетворювача.
11. Наведіть графічно структуру та опишіть призначення й принцип роботи вузлів цифро-аналогового перетворювача.
12. Надайте визначення шуму квантування та як він впливає на аналого-цифрового перетворення.
13. В чому різниця між лінійним та нелінійним квантуванням.
14. Зазначте необхідність та принцип передискретизації при аналого-цифровому перетворенні.
15. Зазначте порівняльні особливості цифрового запису та аналогового запису звукових сигналів.
16. Наведіть принцип та послідовність формування цифрового сигналу запису.
17. Наведіть вираз розрахунку необхідної швидкості передавання даних в цифровому звукозапису.
18. Наведіть графічно загальну структуру формування сигналу запису на цифровий носій.
19. Опишіть необхідність застосування генератора синхросигналів в структурі формування цифрового сигналу запису.
20. Наведіть графічно та опишіть принцип формування кадру інформації в системі CD-Audio.
21. Зазначте необхідність та принципи завадостійкого кодування в цифровому звукозаписі.
22. Зазначте необхідність та принципи канального кодування в цифровому звукозаписі.
23. Опишіть принцип оптичного запису та параметри цифрового запису звукового сигналу у форматі CD-Audio.
24. Наведіть графічно структурну схему запису цифрової інформації на компакт-диск.
25. Опишіть процес виробництва та тиражування компакт-дисків.
26. Назвіть різновиди та відмінності компакт-дисків формату CD.
27. Наведіть графічно структурну схему та опишіть призначення вузлів програвача компакт-дисків.
28. Зазначте принцип маскування помилок інтерполяцією, утриманням, приглушенням.
29. Зазначте особливості системи DVD та відмінності параметрів з системою CD.
30. Наведіть порівняльний аналіз параметрів DVD-Audio та CD-Audio.
31. Поясніть та графічно надайте конструктивні особливості DVD-дисків.

32. Зазначте особливості системи Super Audio CD та відмінності параметрів з системами DVD й CD.
33. Наведіть графічно структурну схему та опишіть призначення вузлів програвача DVD-дисків.
34. Наведіть основні принципи цифрового магнітного запису.
35. Зазначте необхідність та принципи завадостійкого та канального кодування даних в системах цифрового магнітного запису.
36. Зазначте особливості запису цифрових даних в цифрових магнітофонах з стаціонарними головками.
37. Зазначте особливості запису цифрових даних в цифрових магнітофонах з обертовними головками.
38. Наведіть функціональну схему та принцип роботи цифрового R-DAT магнітофона.
39. Наведіть основні технічні параметри запису цифрових даних в R-DAT магнітофоні.
40. Опишіть принцип магнітооптичного запису та параметри цифрового запису звукового сигналу на мінідиск.
41. Наведіть основні технічні параметри запису цифрових даних в системі магнітооптичного запису на мінідиск.
42. Зазначте фізичні властивості та особливості магнітооптичного та термомагнітного ефектів, використовуваних в системі запису на мінідиск.
43. Наведіть функціональну схему та принцип роботи програвача мінідисків.
44. Назвіть сучасні носії інформації.
45. Наведіть перспективні носії цифрового звукозапису та принципи формування інформації на носіях.
46. Наведіть порівняльний аналіз конструктивних особливостей компакт-дисків різних систем звукозапису.
47. Наведіть визначення форматів звукозапису за носієм цифрового запису.
48. Зазначте структуру доріжок запису в системах CD, S-DAT та R-DAT.
49. Зазначте узагальнено апаратуру цифрового звукозапису та переваги й недоліки цифрових методів звукозапису.
50. Зазначте тенденції розвитку носіїв та технологій звукозапису, а також технологій збереження звукових архівів.
51. Назвіть сучасні тенденції розвитку звукотехнічного обладнання.

Перелік посилань

1. History of sound recording. https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_sound_recording.
2. Rossing T. D., R Moore., Wheeler P. The Science of Sound. Pearson; 3rd edition, 2001 – 680 p. ISBN 805385657.
3. Encyclopedia of Acoustics. By ed. Malcolm J., Crocker V.1 4. John Wiley & Sons. 1997, - 2096 p. ISBN 0471180074.
4. Акустична техніка. Т.4. Основи архітектурної та фізіологічної акустики: Навчальний посібник / Дідковський В.С., Луньова С.А. – Київ, 2001. – 424 с.
5. Self, Douglas. Audio engineering explained : professional audio recording. Focal Press. 2010, - 639 p. ISBN: 978-0-240-81273-1.
6. Donald E. Hall Musical Acoustics. Brooks/Cole; 3rd edition, 2001 - 480 p. ISBN 0534377289.
7. Brice R. Music Engineering: The Electronics of Playing and Recording. Newnes. 1998 – 368 p. ISBN 0750639032.
8. Avendaño, C., Deng, L., Hermansky, H., Gold, B. The Analysis and Representation of Speech. In: Speech Processing in the Auditory System. Springer Handbook of Auditory Research, vol 18. Springer, New York, NY. 2004.
9. Brice R. Music Engineering. Elsevier Ltd. 2-nd edition. 2001, - 481 p. ISBN 0 7506 5040 3.
10. Beauchamp, James W. Analysis, Synthesis, and Perception of Musical Sounds. The Sound of Music / James W. Beauchamp. University of Illinois at Urbana, USA. Springer. 2007, - 326 p. ISBN-10: 0-387-32496-8.
11. Audio Engineering. The Newnes Know It All Series. Douglas Self, Richard Brice, Ben Duncan, John Linsley Hood, Ian Sinclair, Andrew Singmin, Don Davis, Eugene Patronis, John Watkinson. Elsevier. 2009, - 907 p. ISBN 978-1-85617-526-5.
12. Ahnert W., Steffen F. Sound Reinforcement Engineering, Fundamentals and Practice. CRC Press. 2000, – 420 p ISBN 0415238706.
13. The Technology of Binaural Understanding (Modern Acoustics and Signal Processing). By ed. Blauert J., Braasch J. Springer - ASA-press; 2020, - 826 p. ISBN 978-3030003852.
14. Гребінь О.П. Засоби підвищення ефективності процесу реставрації та відновлення фонограм. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.08 - прикладна акустика та звукотехніка. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, Київ, 2021.
15. Réveillac, Jean-Michel. Musical Sound Effects. Analog and Digital Sound Processing. John Wiley & Sons, Inc. 2018, - 346 p. ISBN 978-1-78630-131-4.
16. Read, O., Welch L. From Tin Foil to Stereo: Evolution of The Phonograph. Literary Licensing. 2012 - 578 p. ISBN 1258436310.
17. Ballou, Glen M. Handbook for Sound Engineers. Elsevier, Fourth Edition. 2008, - 1778 p. ISBN: 978-0-240-80969-4.
18. Eargle, John. Handbook of recording engineering / by John Eargle. 4th ed. Springer. 2003, - 436 p. ISBN 1-4020-7230-9.
19. Huber, David Miles, Runstein, Robert E. Modern Recording Techniques. Seventh Edition. Elsevier. 2010, - 654 p. ISBN: 978-0-240-81069-0.
20. Cadis, Jay. The Science of Sound Recording. Elsevier. 2012, - 237 p.
21. Kimizuka, Masanori. Historical Development of Magnetic Recording and Tape Recorder. National Museum of Nature and Science Systematic Examination of Technology Report, Volume 17. WIP Japan Corp. 2012. – 275 p.
22. Травніков, Є. М. Системи та пристрої реєстрації інформації / Є. М. Травніков, Г. Г. Власюк, В. В. Пілінський, В. М. Співак, В. Б. Швайченко – Київ : Кафедра. 2013. – 216 с.
23. Романюк, М. І. Технічне забезпечення кінотеатрів та інформаційно-розважальних заходів: конспект лекцій [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів спеціальності 6.050803 «Акустотехніка» / М. І. Романюк, П. В. Попович ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові данні (1 файл: 5,23 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського,

2018. – 155 с.

24. Pohlmann, Ken C.. Principles of Digital Audio. Sixth Edition. McGraw -Hill/Tab Electronics. 2011, - 816 p. ISBN 978-0-07-166346-5.

25. Watkinson, John. An Introduction to Digital Audio / John Watkinson. Focal Press. 1994, - 392 p. ISBN 0 240 51378 9.