

С. П. Кононов, В. І. Макогон

**Основи радіомовлення
та звукотехніки**

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

С. П. Кононов, В. І. Макогон

Основи радіомовлення та звукотехніки

Навчальний посібник

Вінниця
ВНТУ
2018

УДК 534.86(075)

К64

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 13 від 25 червня 2015 р.)

Рецензенти:

І. В. Троцишин, доктор технічних наук, професор

О. М. Шинкарук, доктор технічних наук, професор

С. М. Злепко, доктор технічних наук, професор

Кононов, С. П.

К64 Основи радіомовлення та звукотехніки : навчальний посібник /
С. П. Кононов, В. І. Макогон. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 122 с.

Навчальний посібник містить матеріал, який рекомендується для використання студентами спеціальності 172 – «Телекомунікації та радіотехніка» спеціалізації «Апаратура радіозв'язку, радіомовлення та телебачення» та буде корисним студентам спеціалізації «Радіотехніка», «Телекомунікаційні системи та мережі», а також фахівцям у області звукотехніки, електроакустики та радіомовлення.

УДК 534.86(075)

© ВНТУ, 2018

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1. ОБ'ЄКТИВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВУКУ.....	6
1.1 Основні поняття	6
1.2 Коливальна швидкість звуку	7
1.3 Звуковий тиск, швидкість поширення звуку	8
1.4 Інтенсивність звуку.....	8
1.5 Питомий акустичний опір	9
1.6 Закон Ома в акустичній формі.....	10
1.7 Густина енергії звукового поля	10
1.8 Акустичні явища при поширенні звуку.....	11
1.9 Дифракція.....	11
1.10 Рефракція	11
1.11 Інтерференція	12
1.12 Реверберація	14
Контрольні питання	15
2. СУБ'ЄКТИВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВУКУ	16
2.1 Сприйняття звуку за амплітудою	16
2.2 Сприйняття звуку за частотою	19
Контрольні питання	20
3 МОНОФОНІЧНЕ ТА СТЕРЕОФОНІЧНЕ ВІДТВОРЕННЯ ЗВУКУ	21
Контрольні питання	25
4 ЗВУКОТЕХНІЧНА АПАРАТУРА, ЇЇ ПОКАЗНИК ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ.....	26
4.1 Спотворення	27
4.2 Лінійні спотворення.....	28
4.3 Нелінійні спотворення.....	32
Контрольні питання	37
5 ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ	38
5.1 Мікрофони	41
5.2 Гучномовці.....	45
Контрольні питання	55
6 ЗАПИС ЗВУКУ.....	57
6.1 Механічний запис звуку	57
6.2 Магнітний запис звуку	60
Контрольні питання	63
7 ОБРОБКА ЗВУКУ В РАДІОМОВЛЕННІ ТА ЗВУКОТЕХНІЦІ.....	64
7.1 Загальні положення.....	64
7.2 Регулювання рівня мовного сигналу	67
7.3 Шумопослаблювачі.....	70
7.4 Підсилювачі	73
7.5 Мікшери	75

7.6	Регулятори ширини бази та напрямку	76
7.7	Регулятори АЧХ	79
7.8	Обробка звукового сигналу в часі	82
7.9	Пристрої динамічної обробки сигналів (ПДОС)	86
	Контрольні питання	97
8	ЦИФРОВА ЗВУКОТЕХНІКА	98
8.1	Загальні положення	98
8.2	Дискретизація	98
8.3	Квантування	100
8.4	Спектри дискретизованого та квантованого аудіосигналу	102
8.5	Динамічний діапазон цифрового аудіосигналу	105
8.6	Нерівномірне квантування	107
8.7	Завадостійке кодування	110
	Контрольні питання	111
9	КОМП'ЮТЕРНА ОБРОБКА ЗВУКУ	112
9.1	Формати звукових файлів	112
9.2	Програмна обробка звуку на персональному комп'ютері	114
	Контрольні питання	120
	ЛІТЕРАТУРА	121

ВСТУП

Акустиккою називається наука, яка досліджує властивості механічних коливань, які поширюються в пружних середовищах. В ній вивчаються основні властивості акустичних хвиль та явищ (виникнення акустичних хвиль, їх поширення, взаємодія з об'єктами і т. д.).

Фахівці з електроакустики вивчають, як виникає та поширюється акустична хвиля, як вона взаємодіє з об'єктами; розробляють пристрої перетворення акустичних хвиль в електричні сигнали, підсилення, обробки, передачі, запису цього сигналу; розробляють пристрої перетворення електричних сигналів в акустичні хвилі.

Звукотехніка – це електроакустика звукового діапазону частот. Цей вид техніки виник та існує на новітніх досягненнях таких галузей, як електротехніка, радіотехніка, електроакустика, оптика, акустика та ін.

Першим ідею механічного запису звуку з метою наступного його відтворення висловив більше ніж 100 років тому французький аматор – натураліст Шарль Кро. 30 квітня 1877 р. він відіслав до Французької академії наук свій винахід під назвою «фонограф». Відтворення звуку здійснювалося за допомогою мембрани, що з'єднана з голкою, яка відслідковує звукову канавку на металевій пластині, що обертається.

В середині грудня цього ж 1877 р. відомий американський винахідник Томас Альва Едісон продемонстрував свій фонограф. В фонографі Едісона запис звуку проводився на циліндр, що обертається, обгорнений олов'яною фольгою.

Наступний значний крок в звукозаписі зробив німець Еміль Берлінер, який запатентував в 1887 р. свій грамофон. Він удосконалив ідею Кро: запис проводився на тонкому восковому шарі, який покривав цинковий диск, а фотоспосіб при тиражуванні він замінив хімічним травленням.

В 1900 р. датський фізик та інженер Вольдемар Паульсен запатентував ідею телеграфону та продемонстрував діючий апарат, який працював за принципом магнітного запису звуку. В побутовій радіоелектроніці магнітофон стійко зайняв провідне місце як основне джерело звукових програм.

Значному зростанню розвитку звукотехніки сприяло створення напівпровідникового підсилювального приладу – транзистора. Він був винайдений в 1948 р. американськими фізиками, співробітниками лабораторії фірми Bell У. Шоклі, У. Браттейном та Дж. Бардіном.

На початку 80-х років ХХ століття бурхливого розвитку набула цифрова звукотехніка, що значно підвищила якість звуковідтворення. На сьогоднішній день вона поступово витісняє традиційну аналогову апаратуру.

1 ОБ'ЄКТИВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВУКУ

1.1 Основні поняття

Якщо в будь-якій точці пружного середовища створити підвищений або понижений тиск, то реакція цієї зміни з певною швидкістю передається сусіднім ділянкам простору. В результаті, в середовищі з'явиться акустична хвиля. При періодичному збудженні стиснень та розріджень в середовищі встановлюється акустичне поле у вигляді хвиль, які розходяться від точки, в якій збуджуються коливання. Акустичні хвилі викликають періодичну зміну тиску в тих точках, через які вони проходять. Ця зміна може відбуватися в широкому діапазоні частот. Залежно від частоти коливань, акустичні хвилі умовно можна поділити на інфразвук (менше 16 Гц), звук (16 Гц–20 кГц), ультразвук (20 кГц–1 ГГц) та гіперзвук (більше 1 ГГц).

Найпростішими хвилями є такі, в яких змінна складова тиску p змінюється за синусоїдальним законом:

$$p = P_0 + p_m \sin \omega t ,$$

де P_0 – статичний тиск середовища (наприклад, атмосферний тиск);

p_m – амплітуда змінної складової тиску.

Звук народжується коливальним рухом частинок повітря, що приводить до появи звукових хвиль, які впливають на людину через її органи слуху.

Джерелом звуку може бути будь-яке матеріальне тіло, яке коливається в пружному середовищі. Існуючі джерела звуку можна поділити на природні та штучні, первинні та вторинні, дійсні та уявні (позірні – не можуть бути локалізовані слухачем як матеріальні об'єкти).

Поверхня, на якій розташовані частинки, що здійснюють синфазні коливання, називається фронтом хвилі. Залежно від форми цієї поверхні розрізняють плоскі, циліндричні та сферичні хвилі. Напрямок поширення звуку перпендикулярний до фронту хвилі, тому поширення звуку можна описати за допомогою звукових променів, які в усіх точках перпендикулярні до фронту звукових хвиль. Звуковий тиск уздовж променя періодично змінюється, наприклад за синусоїдальним законом. Відстань між двома найближчими фронтами хвилі з однаковою фазою називається довжиною хвилі λ . Довжина хвилі обернено пропорційна частоті звуку f

$$\lambda = \frac{V_{зв}}{f} ,$$

де $V_{зв}$ – швидкість поширення фронту звукової хвилі або швидкість звуку.

Для ефективного випромінювання джерелом звукової хвилі його розміри мають бути набагато більші або хоча б сумірні з довжиною звукової хвилі.

У випадку, коли розміри джерела звуку невеликі, випромінюються сферичні хвилі. При цьому фронт хвилі, тобто поверхня з однаковою фазою звукового тиску, має вигляд сфери, в центрі якої розташоване джерело звуку. В силу закону зберігання енергії інтенсивність звуку спадає в такій хвилі обернено пропорційно квадрату відстані, а тиск – обернено пропорційно відстані. Якщо розміри джерела звуку великі в порівнянні з довжиною випроміненої хвилі та джерело звуку має вигляд площини, всі точки якої коливаються синфазно, то таке джерело випромінює плоску хвилю. Фронт такої хвилі – це площина, перпендикулярна до напрямку поширення. В ідеально плоскій хвилі звуковий тиск та інтенсивність звуку постійні. Проміжним типом звукових хвиль є циліндричні. Вони виникають в тому випадку, коли розміри випромінювача в одному напрямку набагато більші довжини хвилі, а в іншому (перпендикулярному) напрямку, набагато менші. Фронт звукової хвилі при цьому має вигляд циліндра, вісь якого збігається з випромінювачем.

Поширення звукової хвилі супроводжується втратами звукової енергії внаслідок теплообміну із середовищем та розсіювання. Особливо великі ці втрати на високих звукових частотах та в умовах відкритого простору. Додатково рівень звуку зменшується пропорційно довжині шляху, який пройшла звукова хвиля. При несприятливих метеорологічних умовах помітне затухання звуку отримується вже на відстані 50–100 м.

1.2 Коливальна швидкість звуку

При проходженні звукової хвилі елементарні об'єми (частинки) середовища здійснюють коливання навколо свого стану рівноваги. Швидкість цих коливань залежить від звукового тиску. На відміну від швидкості поширення звуку вона називається коливальною швидкістю та позначається V_k . Якщо уявити, що елементарні об'єми або частинки середовища рухаються в часі за синусоїдальним законом, тобто

$$s(t) = S_m \sin \Omega t,$$

то коливальна швидкість

$$V_k(t) = s'(t) = \Omega S_m \cos \Omega t,$$

а її максимальне значення

$$V_{km} = \Omega S_m.$$

Можна зробити висновок, що чим вищий тон (частота) та гучніший звук (більший тиск), тим більша V_k . Для найбільш гучних звуків коливальна швидкість значно менша швидкості поширення звуку.

Звукові коливання частинок в рідкому, газоподібному середовищах повздовжні, тобто напрямком коливань перпендикулярний до фронту хвилі, а в твердих тілах існують ще й поперечні хвилі – частинки коливаються паралельно фронту хвилі.

1.3 Звуковий тиск, швидкість поширення звуку

Змінна складова повного тиску в середовищі називається звуковим тиском. Ефективне значення звукового тиску у випадку синусоїдальних коливань менше амплітудного в $\sqrt{2}$ разів. Як всякий тиск, звуковий тиск вимірюється в Паскалях $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$.

Звукові хвилі поширюються в повітрі зі швидкістю $V_{зв}$, яка дорівнює:

$$V_{зв} = \sqrt{\frac{\gamma P_0}{\rho}},$$

де $\gamma = 1,41$ – адіабатична стала;

$\rho = 1,2 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ – густина повітря.

При нормальних атмосферних умовах та температурі $+20^\circ\text{C}$ швидкість звуку дорівнює $343,2 \text{ м/с}$. Зростання температури повітря приводить до зростання швидкості звуку, яка може бути визначена з виразу:

$$V_{зв}(t^\circ) = 331,3 \sqrt{1 + \frac{t^\circ}{273}} \left[\frac{\text{м}}{\text{с}} \right],$$

де t° – температура повітря за Цельсієм.

1.4 Інтенсивність звуку

Знаючи звуковий тиск та коливальну швидкість, можна визначити інтенсивність або силу звуку W_I :

$$W_I = p_{зв} \cdot V_k.$$

Іншими словами, інтенсивність звуку – це кількість енергії звукової хвилі, яка проходить за одну секунду через одиницю площі S , перпендикулярної до напрямку поширення хвилі

$$W_I = \frac{W}{S} \left[\frac{Bm}{m^2} = \frac{H}{c \cdot m} \right],$$

де W – потужність звукової хвилі.

Інтенсивність W_I визначається не тільки потужністю джерела звуку, але й напрямком, тобто діаграмою спрямованості джерела звуку.

Якщо два джерела однакової потужності утворюють відповідно сферичну та плоску хвилю, то інтенсивність звуку на однакових відстанях від них різна. Для джерела сферичної хвилі вона значно менша та змінюється обернено пропорційно квадрату відстані. У джерела плоскої хвилі інтенсивність звуку з відстанню змінюється несуттєво.

Інтенсивність звуків може змінюватись в дуже широких межах. Так, наприклад, поблизу літака з діючими двигунами звуковий тиск шуму досягає 20 Па та більше. В той же час вухо спроможне розрізнити шепотіння на відстані 0,5 м, при якому звуковий тиск складає всього $2 \cdot 10^{-4}$ Па. Для оцінювання інтенсивності звуку широке застосування набуло поняття рівня. Під рівнем інтенсивності звуку розуміють величину

$$L = 10 \lg \frac{W_I}{W_0} = 20 \lg \frac{P_{зв}}{P_0},$$

де W_0 та P_0 приблизно відповідають порогу слухового сприйняття. Прийнято, що $W_0 = 10^{-12} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$; $P_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$.

Одиницею рівня L є децибел. Приріст рівня на 1 дБ відповідає збільшенню звукового тиску на 12 %, а інтенсивності звуку на 26 %. Цей приріст рівня знаходиться на межі розрізнення слухом.

1.5 Питомий акустичний опір

У плоскій звуковій хвилі тиск та коливальна швидкість пов'язані співвідношенням:

$$p_m \cos \Omega t = Z_A V_{km} \cos \Omega t,$$

де Z_A – питомий акустичний опір – протидія середовища, яка приходить на одиницю площі поверхні джерела звуку, що перпендикулярна до напрямку поширення звуку. Із термодинаміки відомо, що

$$Z_A = \rho V_k \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}} = \frac{\text{Па} \cdot \text{с}}{\text{м}} \right],$$

де ρ – густина середовища.

1.6 Закон Ома в акустичній формі

Розглядаючи звуковий процес як аналог електричного, можна помітити, що в акустиці закону Ома відповідає така формула

$$Z_A = \frac{p_{зв}}{V_K}.$$

Можна говорити, що питомий акустичний опір Z_A є аналогом опору Z , звуковий тиск $p_{зв}$ – напруги U , коливальна швидкість V_K – струму I . Продовжуючи аналогію, електричній потужності W поставимо у відповідність інтенсивність звуку W_I .

Отже, в цьому випадку інтенсивність звуку

$$W_I = p_{зв} V_K = \frac{p_{зв}^2}{Z_A} = Z_A \cdot V_K^2,$$

де $Z_A = 413$ акустичних Ом – питомий акустичний опір повітря при нормальних умовах;

$p_{зв}$ та V_K – відповідні значення звукового тиску та коливальної швидкості.

Характеристики звукового процесу $p_{зв}$, V_K , W_I змінюються за випадковим законом, оскільки звук – це випадковий процес. Можна говорити, наприклад, про діюче значення звукового тиску

$$p_{зв.д} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p_{зв}^2(t) dt},$$

або про спектр інтенсивності звуку і т. ін.

1.7 Густина енергії звукового поля

Густина енергії звукового поля ε [Дж · м⁻³] можна пов'язати з інтенсивністю звуку таким чином. За означенням, густина енергії – це відношення

$$\varepsilon = \frac{E}{V},$$

де E – повна енергія;

V – об'єм середовища.

Якщо фронт плоскої хвилі має площу S , то

$$\varepsilon = \frac{W_I \cdot S \cdot t}{V} = \frac{W_I \cdot t}{V/S} = \frac{W_I}{l} \cdot t = \frac{W_I}{V_{зв}} \left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \right],$$

де l – відстань фронту хвилі до поверхні джерела. Не потрібно плутати густину ε зі звуковим тиском. Для останнього в знаменнику знаходилась би коливальна швидкість.

1.8 Акустичні явища при поширенні звуку

Структура звукового поля в просторі значно залежить від таких явищ:

- дифракції або огинання перешкод із розмірами $l < \lambda$;
- рефракції або скривлення напрямку поширення хвилі через неоднорідності простору;
- інтерференції або багатократного накладання когерентних хвиль через відбиття від перешкод.

1.9 Дифракція

При вільному поширенні звукових хвиль передача енергії здійснюється за прямолінійними траєкторіями. Їх називають звуковими променями. Якщо на шляху хвилі зустрічається перешкода, то залежно від її розмірів будуть спостерігатись такі явища. Якщо розміри перешкоди малі в порівнянні з довжиною хвилі, то хвиля буде огинати перешкоду, її фронт не зміниться. Якщо ж розміри перешкоди великі в порівнянні з довжиною хвилі, то утворюється геометрична тінь. На відміну від звичайної оптичної тіні в акустиці не спостерігається різкого переходу від вільної хвилі до повної тіні. За рахунок часткового огинання звуком завади утворюється плавний перехід. На межі геометричної тіні рівень звукового тиску падає на 6 дБ.

1.10 Рефракція

Прямолінійне поширення звуку можливе тільки в середовищі, де швидкість звуку постійна. На відкритому повітрі швидкість звуку можна вважати постійною лише наближено. По-перше, температура повітря змінюється з висотою. Оскільки швидкість звуку зростає з підвищенням температури, то поблизу землі вдень швидкість звуку більша від швидкості на висоті. До кінця ночі земля охолоджується й швидкість звуку стає меншою, ніж швидкість на висоті. По-друге, швидкість звуку дорівнює сумі швидкості вітру та швидкості звуку в нерухомому повітряному середовищі.

В силу цього, звукові промені викривляються. Радіус кривизни R_k визначається за формулою

$$R_k = \frac{V_{зв}}{dV_{зв}/dh},$$

де в знаменнику стоїть градієнт швидкості звуку по висоті.

На рис. 1.1 зліва показаний випадок з додатним градієнтом, який спостерігається, зокрема, при попутному вітрі. За рахунок вигинання звукових променів можливе огинання наземних перешкод, що покращує чутливість на великих відстанях.

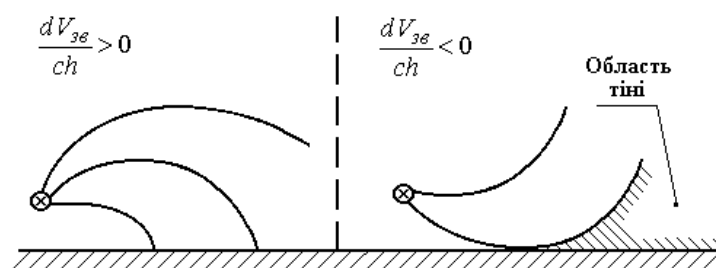


Рисунок 1.1 – Шляхи поширення звуку в атмосфері

Справа наведений випадок з від'ємним градієнтом, що спостерігається, наприклад, при зустрічному вітрі. Як видно з рисунка, на деякій відстані від джерела звуку утворюється акустична тінь, яка обмежує дальність передачі звуку.

1.11 Інтерференція

При порівняно невеликих звукових тисках повітря веде себе як лінійне середовище. Тому в акустиці може застосовуватись принцип суперпозиції. Відповідно до цього принципу, звукове поле, яке створюється декількома джерелами звуку, є сумою окремих звукових полів, що створюються кожним джерелом окремо. Якщо випромінювачі некогерентні, то додаються інтенсивності звуку (енергетичне додавання). Якщо джерела звуків когерентні, то додаються звукові тиски. В тих точках звукового поля, фази звукових тисків яких збігаються, амплітуди окремих складових додаються. В тих точках звукового поля, в яких фази протилежні, амплітуди віднімаються. Це явище називається інтерференцією. Області з максимальним тиском називаються пучностями, а з мінімальним тиском – вузлами. Найпростішим випадком інтерференції є стоячі хвилі, які утворюються при додаванні падаючої та відбитої хвиль. Якщо гармонічна хвиля перпендикулярно падає на площину відбиття, то створюється стояча хвиля, в якій відстань між сусідніми вузлами або пучностями дорівнює $\lambda/2$.

Крайнім проявом інтерференції є також поява для будь-якого приміщення критичної частоти

$$f_{кр} = \frac{V_{зв}}{\lambda_{кр}} = \frac{V_{зв}}{2l},$$

де l – довжина приміщення. Звуки з частотою $f < f_{кр}$ поширюються в такому приміщенні погано. Так, для приміщення з $l = 3\text{ м}$ це низькочастотні звуки із частотою $f < 37\text{ Гц}$, тому навіть якісні акустичні системи будуть погано відтворювати НЧ складові музикальної програми в невеликих приміщеннях.

Через багатократне відбиття звукової хвилі в реальних приміщеннях утворюється однорідне поле з нерівномірним розподілом звукового тиску. Цей розподіл такий, що максимальні або мінімальні його значення в різних місцях однакові. Тут відбиття звуку від великої за розмірами в порівнянні з довжиною хвилі площини, яка розділяє середовища з різними акустичними опорами, дорівнює куту падіння (рис. 1.2).

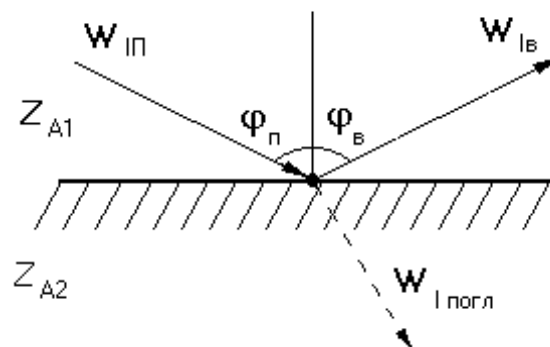


Рисунок 1.2 – Падіння звукової хвилі на поверхню відбиття

Коефіцієнт відбиття звукової хвилі визначається за формулою

$$\beta = \frac{W_{Iв}}{W_{Iп}},$$

а коефіцієнт поглинання

$$\alpha = \frac{W_{I погл}}{W_{Iп}} = \frac{W_{Iп} - W_{Iв}}{W_{Iп}} = 1 - \beta.$$

Для прикладу, цегляна стіна має коефіцієнт $\alpha < 0,1$, килим – $0,3 \div 0,6$, поглинальні матеріали $0,5 \div 0,9$.

Якщо стіни, підлогу, стелю покрити ефективними звукопоглинальними матеріалами, в приміщенні можна утворити умови, наближені до вільного поля. В цьому випадку немає відбиття звукової хвилі, тиск розподіляється в просторі рівномірно. В спеціальних акустичних камерах з умовами вільного поля визначаються характеристики гучномовців та мікрофонів.

Реальні звуки мають складну, далеку від синусоїдальної, форму, тому картина розподілу звукового тиску в приміщеннях значно ускладнюється. Інтерференція суттєво впливає на суб'єктивне сприйняття звуку людиною. Воно погіршується як з наближенням до умов вільного поля, так й до поширення хвиль зі значною інтерференцією. В першому випадку звучання приглушене, невиразне, в другому – нерозбірливе, погіршується стерео-ефект, локалізація джерела звуку.

1.12 Реверберація

Кількісно інтерференція оцінюється часом реверберації. Реверберація – це процес загасання звуку в приміщенні після припинення дії джерела звуку. Відразу після початку його дії в просторі присутні тільки безпосередні хвилі з густиною енергії ϵ_{δ} (рис. 1.3, а). Але звуковий тиск продовжує збільшуватися за рахунок відбитих хвиль (рис 1.3, б). Утворюється дифузійне поле з густиною енергії ϵ_{Δ} . Після припинення дії джерела безпосередні хвилі зникають, а дифузійний звук поступово послаблюється.

В приміщенні з інтерференцією $\epsilon_{\Delta} > \epsilon_{\delta}$, тому можна говорити про енергетичний вигравш

$$R = \frac{\epsilon_{\Delta}}{\epsilon_{\delta}} > 1.$$

Час, протягом якого густина звукової енергії ϵ_{Δ} зменшується на 60 дБ, має назву стандартного часу реверберації $T_{p.cm}$. Його приблизно можна визначити за формулою

$$T_{p.cm} \approx 0,161 \frac{V}{A},$$

де V – об'єм приміщення в m^3 ;

A – площа поверхні в m^2 з коефіцієнтом поглинання $\alpha = 1$, яка поглинає стільки ж енергії, скільки й поверхня реального приміщення.

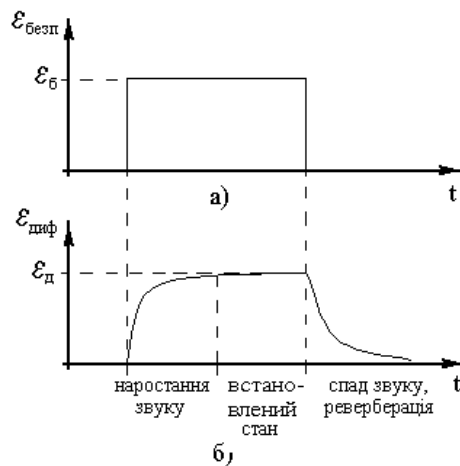


Рисунок 1.3 – Часова залежність густини звукової енергії в приміщенні з інтерференцією

З формули випливає, що час реверберації прямо пропорційний об'єму приміщення та обернено пропорційний площі поглинальних матеріалів. Оптимальний час реверберації для мови становить 0,2–0,4 с, для музики 1–2 с.

Розрізняють природну та штучну реверберацію. Штучна реверберація здійснюється за допомогою системи з луна-камерою або сучасних магнітних та цифрових ревербераторів [1].

В великих за розмірами приміщеннях затримка в часі проходження фронту звукових хвиль перевищує 0,05–0,1 с. В цих умовах людина чує спочатку безпосередньо фрагмент або все повідомлення, а потім неодноразово його повторення. Це явище має назву «луна» і його треба відрізнити від інтерференції.

Контрольні питання

1. Які матеріальні тіла можуть бути джерелами звуку?
2. Що таке фронт акустичної хвилі, як визначити її довжину?
3. Назвіть умову ефективного випромінювання звуку.
4. Перелічіть основні параметри та характеристики звуку.
5. Що таке коливальна швидкість звуку, як її визначити?
6. Дайте означення звукового тиску, в яких межах він змінюється?
7. Від чого залежить швидкість поширення звуку в повітрі?
8. Що таке інтенсивність звуку?
9. У чому користь методу електроакустичних аналогій? Запишіть закон Ома в акустичній формі.
10. Як визначити густину акустичної енергії плоскої хвилі?
11. Які акустичні явища суттєво впливають на сприйняття людиною звуку?
12. Чим вільне поле відрізняється від однорідного?
13. Як обчислити критичну частоту реального приміщення?
14. Що таке стандартний час реверберації, назвіть оптимальні значення часу реверберації для мови та музики?
15. Яку побудову мають магнітні та цифрові ревербератори?

2 СУБ'ЄКТИВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВУКУ

Суб'єктивне оцінювання звуку здійснюється за допомогою слуху людини. В порівнянні з об'єктивною оцінкою, отримання суб'єктивної оцінки більш складна задача, оскільки сама по собі вона залежить від слухача, його віку, стану здоров'я, музикальної освіти, слуху, в кінці кінців – просто настрою. Щоб отримати суб'єктивну оцінку звуку, використовується метод порівняння, числове значення оцінки – це деякий усереднений результат, який отримано на основі великої кількості прослуховувань різноманітних програм різними за віком, професією людьми [2].

Людина сприймає звук за амплітудою (гучність, слухове враження, нелінійні властивості слуху) та частотою (висота, тембр, зміщення по частоті звуку, ефект маскування).

2.1 Сприйняття звуку за амплітудою

Тиск $p_{зв}(t)$ декількох джерел звуку може бути однаковим в часі, але різним за інтенсивністю. Для людини в цьому випадку змінюється гучність звуку.

Дослідження властивостей слуху людини виявили, що відчуття гучності залежить як від частоти, так й від інтенсивності звуку. Найменший за силою звук, який ще чує людина, називається порогом чутності. Якщо збільшувати інтенсивність звуку, то при деякому значенні настає відчуття болю у вухах. Відповідне йому значення сили звуку називається больовим порогом.

Якщо позначити гучність через N , можна записати:

$$N = p_{зв} \cdot B(p_{зв}, f),$$

де B – коефіцієнт, яким враховуються суб'єктивні характеристики слуху. Він складно залежить від тиску та частоти звуку.

Людина спроможна порівнювати за гучністю звуку різної частоти. Це дозволяє побудувати так звані криві рівної гучності (ізофони), наведені на рис. 2.1.

З кривих видно, що залежно від частоти, звуки рівної гучності мають різні рівні звукового тиску, тому для оцінювання суб'єктивного відчуття введено поняття рівня гучності L_N . Під рівнем гучності розуміють рівень звукового тиску рівногучного звуку частотою 1000 Гц. Для того, щоб відрізнити рівень гучності від рівня звукового тиску, ввели нове найменування одиниці рівня гучності – фон.

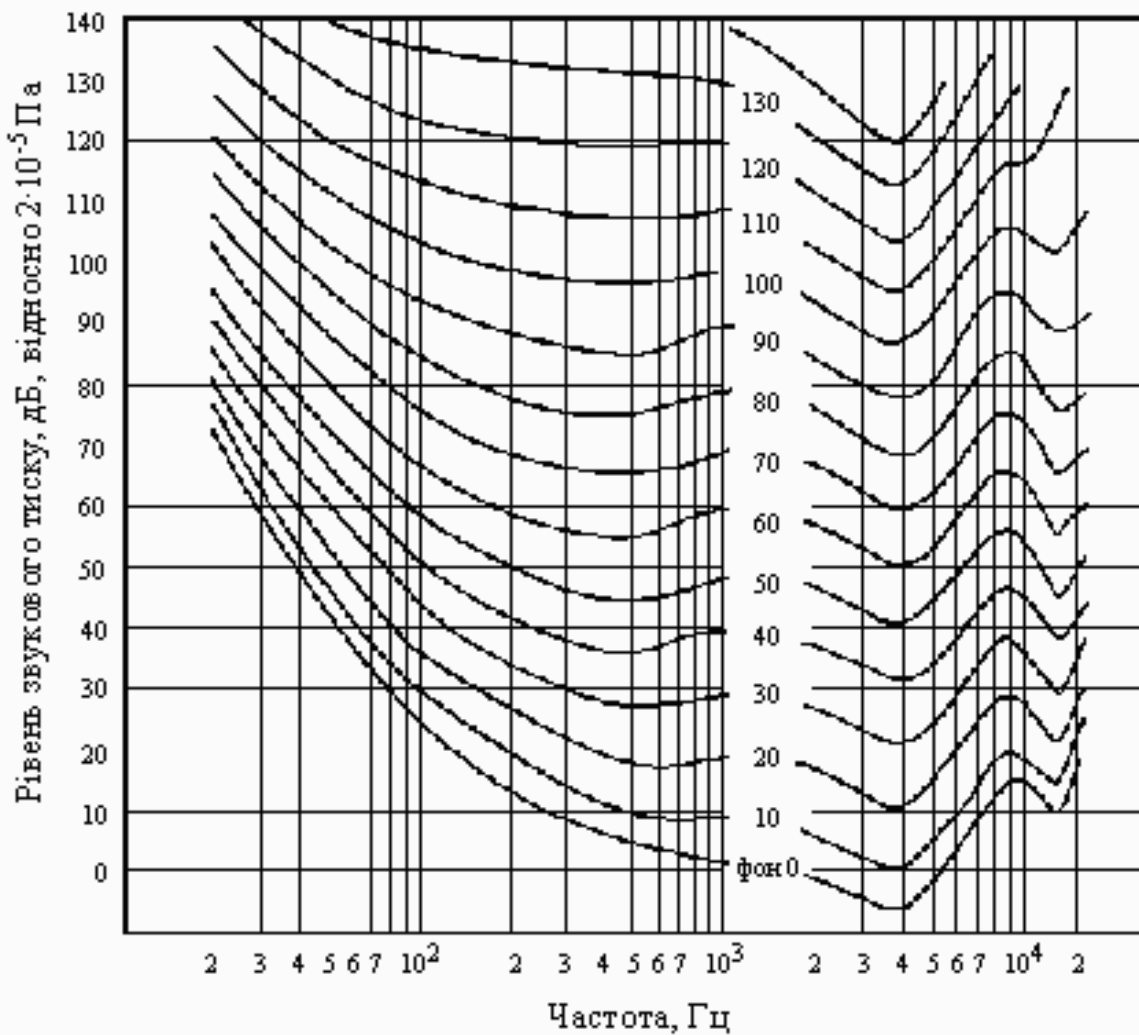


Рисунок 2.1 – Криві рівня гучності

Вираз для обчислення рівня гучності такий:

$$L_N(f) = 20 \lg \frac{p_{зв}(1000 \text{ Гц})}{p_0},$$

де $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$ – поріг чутності.

Таким чином, рівень гучності чисельно збігається з рівнем звукового тиску на частоті 1000 Гц. Розглядаючи криві рівня гучності (рис. 2.1), можна зробити такі висновки:

- між кривими $L_N = 130 \text{ дБ}$ (больовий поріг) та $L_N = 0 \text{ дБ}$ (поріг чутності) знаходиться зона можливих значень рівнів тиску звуку, які чує людина; динамічний діапазон рівнів звукового тиску з частотою змінюється від 70 дБ до 130 дБ;

- робити електроакустичні установки з динамічним діапазоном більше 110–130 дБ в багатьох випадках не потрібно;

- на частотах від 2 до 6 кГц спостерігається найвища чутливість вуха до звуків;
- на нижніх частотах рівень гучності набагато нижчий рівня звукового тиску; це потрібно враховувати при регулюванні рівня під час звуковідтворення; подібне спостерігається й на верхніх частотах, тільки різниця становить $10 \div 20$ дБ проти $20 \div 70$ дБ на нижніх частотах;
- зі зростанням гучності зміна кожної кривої сімейства відбувається в менших межах, тому можна говорити про «ввімкнення» людиною при значних потужностях звуку «захисного механізму».

Криві рівня гучності стандартизовані та використовуються у звуко-техніці. Як приклад їх застосування можна навести схему регулятора гучності з тонкомпенсацією (рис. 2.2, а). На рис. 2.2, б) показано сімейство кривих частотної залежності коефіцієнта передачі такого регулятора. Необхідне підвищення коефіцієнта передачі регулятора на нижніх частотах в положеннях повзунка, близьких до нижнього, забезпечується введенням в подільник частотозалежних кіл R1, C1 та R2, C2.

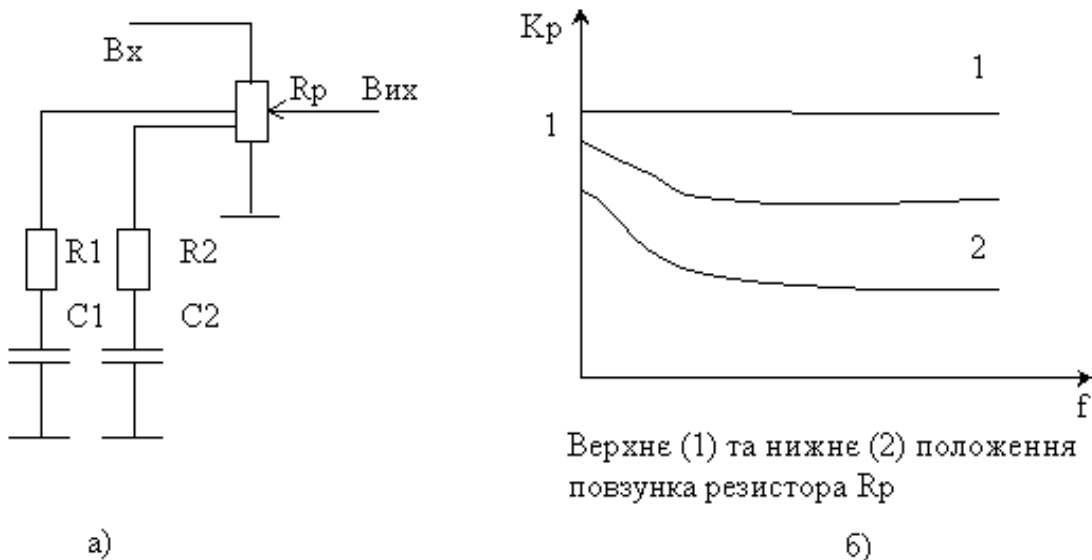


Рисунок 2.2 – Регулятор гучності з тонкомпенсацією

Слухове сприйняття залежить від тривалості дії звуку. Для правильного сприйняття висоти тонального сигналу потрібно, щоб його довжина була не менше 20–30 мс. При збільшенні тривалості дії такого сигналу зростає відчуття гучності. При тривалості 150–200 мс це відчуття стає максимальним. Подальше збільшення тривалості звуку призводить до адаптації слухача, тобто поступового зменшення відчуття гучності.

При зникненні тиску звукової хвилі слухове відчуття зникає не відразу, а поступово зменшується до нуля. Підраховано, що «гучність» спадає на 10 фон протягом 150–200 мс.

При значних гучностях звуку у вигляді чистого тону людині здається, що вона чує не тон, а звук з обертонами. Якщо випромінювати два тони з частотами f_1 , f_2 , то людина чує звук з комбінаційними складовими $\pm mf_1 \pm nf_2$, де $m(n) = 0, 1, 2, \dots$. Відбувається спотворене звукосприйняття. Це треба врахувати при встановленні оптимального рівня гучності звуко-технічної апаратури.

Звуки, які створюються різними музичними інструментами та іншими природними джерелами, значно відрізняються за рівнем звукового тиску. Максимальний рівень, який створюється великим симфонічним оркестром, може досягати 100–120 дБ. Мінімальний рівень, який спостерігається на піанісімо симфонічного оркестру лежить в межах 40–50 дБ. Тому динамічний діапазон рівнів звучання симфонічного оркестру може досягати 80 дБ. Окремі інструменти дуже відрізняються як за акустичною потужністю, так й за динамічним діапазоном звучання. Найбільш потужним джерелом є орган, максимальний рівень звукового тиску якого перевищує 100 дБ. Динамічний діапазон органа перевищує 50 дБ. Ще більший динамічний діапазон рояля – 70 дБ. Порівняно невеликий динамічний діапазон має флейта та кларнет.

2.2 Сприйняття звуку за частотою

Вухо людини сприймає на слух коливання складної форми, що мають певну висоту. Чим більша основна частота звуку, тим більша висота звуку, що відчувається. Вважається, що звуки з частотою до 300 Гц – це низькі тони, з частотами 300–3000 Гц – середні тони, з частотою більше 3 кГц – високі тони [3].

Чутливість вуха до невеликих змін частоти дуже велика. Вона максимальна в діапазоні від 500 до 4000 Гц, де вухо спроможне відрізнити різницю за частотою усього на 0,35 %. В той же час при визначенні висоти тону звуків, що звучать окремо, можливі більші похибки. На частотах вище 3000 Гц відчуття приросту висоти тону набагато менше фактичної зміни частоти звуку.

Ізофони (рис. 2.1) визначаються для чистих тонів в умовах практично повної тиші. Наявність звуків, що заважають, призводить до збільшення межі чутності. Це явище називається маскуванням. Різниця між порогом чутності в тиші та рівнем звуку, що маскується в присутності завади, є мірою маскування. Найбільш маскувальну дію надають звуки, які близькі за частотою до тих, що маскуються. При маскуванні чистим тоном суттєво, яка його частота: нижча або вища частоти тону, що маскується. В останньому випадку маскувальна дія значно вища. При маскуванні тонального сигналу шумами маскувальну дію дають тільки ті складові шумів, частоти яких лежать в межах відповідної критичної смуги слуху. Під критичними смугами слуху розуміють інтервали частот, в межах яких мають знаходитись складові складного звуку для того, щоб їх інтенсивності додавались.

Музичні звуки створюються різними музичними інструментами. Всі джерела музичних звуків, за винятком деяких ударних інструментів (бубен, трикутник, барабан або тарілки), випромінюють звуки певної висоти. При одночасному звучанні декількох музичних тонів утворюється співзвучність. Співвідношення висот двох музичних тонів називають інтервалом. Розрізняють консонанси та дисонанси, але необхідно пам'ятати умовність такого поділу. Основними консонансами є пріма та октава. Прімою називають комбінацію з двох звуків однакової висоти, октавою – з двох звуків, основні частоти яких відрізняються в два рази.

В сучасній музиці застосовують так званий темперований стрій: октава розбивається на шість тонів та дванадцять півтонів. Співвідношення основних частот двох звуків, висота яких відрізняється на один тон, дорівнює $\sqrt[12]{2} = 1,12$. Такий інтервал називається великою секундою. До консонансів, крім пріми та октави, відносяться також кварта (п'ять півтонів) та квінта (сім півтонів).

Звуки однакової висоти, які випромінюються різними джерелами, відрізняються своїм тембром. Тембр залежить, насамперед, від додаткових звуків, які випромінюються одночасно з основним тоном. До їх числа відносять звуки, частоти яких кратні частотам основного тону. Такі звуки називаються гармоніками або обертонами. Крім того, у деяких інструментів звуки супроводжуються характерними шумами. Тембр залежить також від особливості процесу встановлення та затухання звуку у конкретного інструмента.

Контрольні питання

1. За якою методикою отримується суб'єктивна оцінка якості звуковідтворення?
2. Що таке гучність звуку, як її визначити?
3. Які висновки можна зробити за кривими рівня гучності?
4. Як впливають нелінійні властивості слуху на звукове враження?
5. Що таке висота звуку, як змінювати забарвлення складного звуку?

3 МОНОФОНІЧНЕ ТА СТЕРЕОФОНІЧНЕ ВІДТВОРЕННЯ ЗВУКУ

В звуковому мовленні та у звукозапису сигнал проходить через складну систему звукової передачі. Для того, щоб збереглось враження природного звучання, необхідно відтворити звукове поле з усіма подробицями. Одноканальні (монофонічні) системи дозволяють відтворити необхідний звуковий тиск, але вони не можуть відтворити різницю в напрямку приходу звукових хвиль. Багатоканальні (стереофонічні) системи можуть відтворити тією чи іншою мірою просторове розташування джерел звуку.

Монофонічне відтворення – це відтворення звукового образу за допомогою одного точкового випромінювача, що забезпечується дійсним або уявним вторинним джерелом звуку. Монофонічне відтворення не несе інформації про просторове розміщення первинних джерел звуку (рис. 3.1).

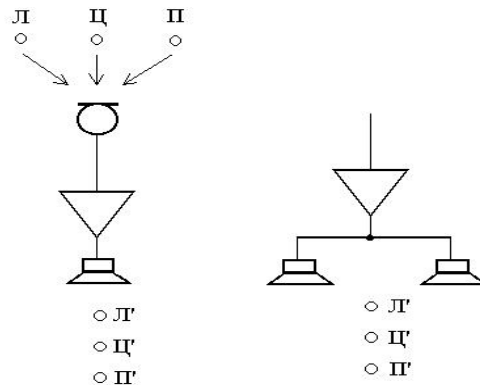


Рисунок 3.1 – Монофонічне відтворення звуку

Стереофонічне відтворення – це відтворення звукового образу за допомогою двох або більше точкових випромінювачів, що забезпечується дійсними або уявними вторинними джерелами звуку. Стереофонічне відтворення несе інформацію про розміщення в просторі первинних джерел звуку (рис. 3.2).

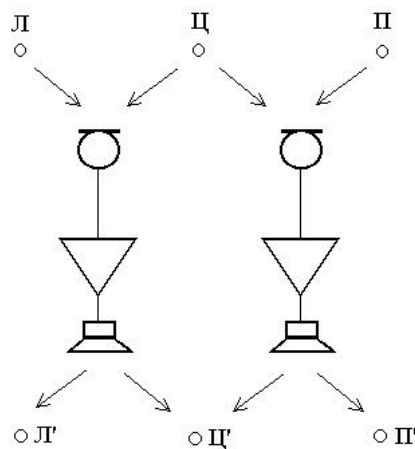


Рисунок 3.2 – Стереофонічне відтворення звуку

Ідеальне стереофонічне відтворення отримати неможливо. Зі зростанням кількості каналів можна наблизитись до ідеального відтворення звуку, однак апаратура стає складною та дорогою. Це не компенсується відповідним зростанням якості звучання, тому в побуті не дуже приживається навіть чотирьоканальна стереофонія – квадрофонія. У великих залах (кінотеатри, концертні зали і т. ін.) використовують системи стереофонічного відтворення звуку з кількістю каналів більше ніж чотири.

Важливою властивістю слуху є бінауральний ефект. Залежно від кута прибування звукової хвилі, звуки, які діють на праве та ліве вухо, можуть більшою або меншою мірою відрізнятися як за фазою, так й за амплітудою. Слуховий аналізатор дозволяє людині визначити напрямок на джерело звуку. Якщо джерело знаходиться попереду слухачів, то точність його локалізації в горизонтальній площині досягає 2–4°. При зміні напрямку на 180° точність локалізації різко падає. В області вищих звукових частот локалізації допомагає зміна спектра, яка викликається екранованою дією голови. Тому властивість локалізації зберігається не дивлячись на те, що порівняння за фазою стає неможливим.

Залежно від частоти звуку, що випромінюється, переважає часовий або інтенсивнісний фактори стереофонії. В діапазоні 200–5000 Гц стереоефект пояснюється затримкою у часі Δt приходу до вух слухача звукової хвилі однакової фази. Затримка Δt змінюється від нуля, якщо слухач напроти джерела звуку, приблизно до 0,6 мс, якщо джерело точно ліворуч або праворуч від слухача. На частотах вище 5000 Гц переважає інтенсивнісний фактор стереофонії через екранування головою слухача звукової хвилі. На частотах, нижчих 200 Гц, стереоефект практично відсутній. На практиці той факт, що НЧ складові звуку не впливають на стереофонічне враження, дозволяє застосовувати спільний НЧ канал з єдиним гучномовцем (рис. 3.3). Це в деяких випадках спрощує конструкцію, покращує дизайн.

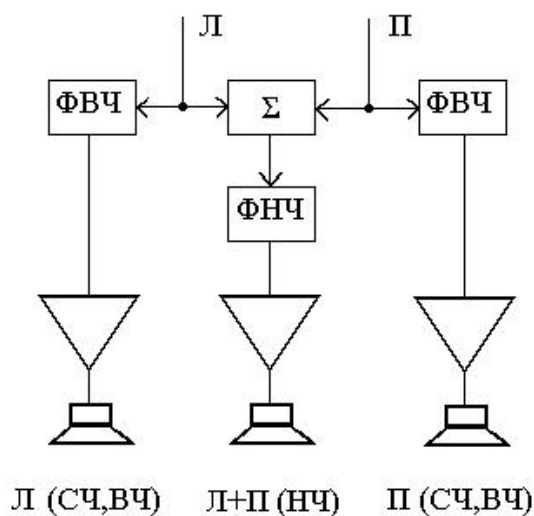


Рисунок 3.3 – Стереопідсилювач зі спільним НЧ каналом

Звуковідтворення переважно з часовою стереофонією можна здійснити, розташувавши перед джерелом звуку два мікрофони так, як показано на рис. 3.4. Звуковідтворення, в якому переважає інтенсивнісна стереофонія, реалізується за схемою XY (рис. 3.5) або MS (рис. 3.6). В схемі XY, як й в схемі з часовою стереофонією, діаграмою спрямованості мікрофонів є кардіоїда. В схемі MS мікрофон M має діаграму спрямованості кардіоїди, на його виході напруга пропорційна моноскладовій звукового поля. На виході мікрофона S з діаграмою спрямованості у вигляді вісімки напруга зростає зі збільшенням різниці між звуками, які випромінюються від джерел Л та П. Схеми (рис. 3.5, 3.6) за сигналами сумісні. Перетворювач, одна із можливих схем якого наведена на рис. 3.7, за вхідними сигналами M та S формує сигнали

$$X = \frac{M + S}{2}, \quad Y = \frac{M - S}{2}.$$

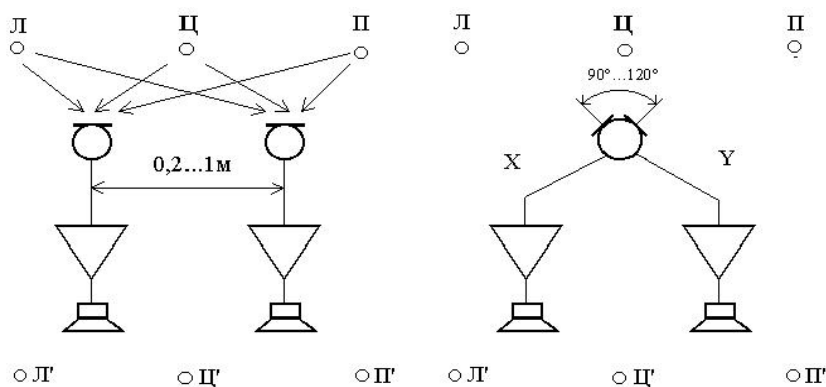


Рисунок 3.4 – Звуковідтворення із часовою стереофонією

Рисунок 3.5 – Звуковідтворення із інтенсивнісною стереофонією за схемою XY

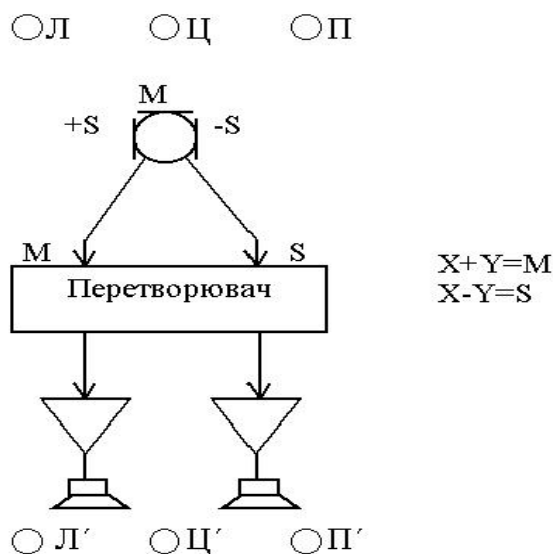


Рисунок 3.6 – Звуковідтворення із інтенсивнісною стереофонією за схемою MS

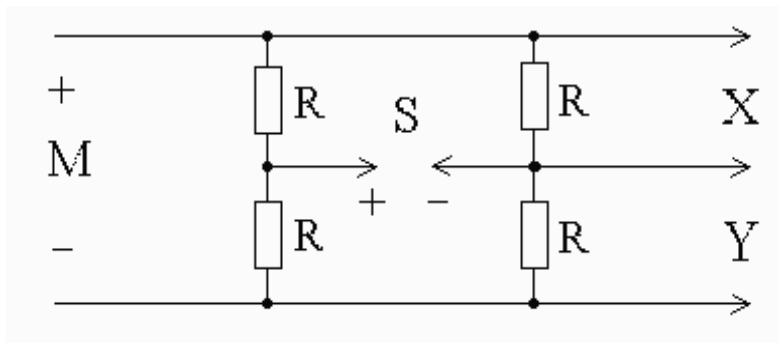


Рисунок 3.7 – Перетворювач сигналів

На практиці не обмежуються тільки відтворенням звуку за однією із розглянутих схем, а, встановлюючи більшу кількість мікрофонів, утворюють умови для змішаного інтенсивнісно-часового стереовідтворення.

Зона оптимального прослуховування двоканальних стереопрограм заштрихована на рис. 3.8. Слухачу краще розташуватися по лінії симетрії на відстані $(0,5 - 1,5) b$ від гучномовців, де b – ширина стереобазиса.

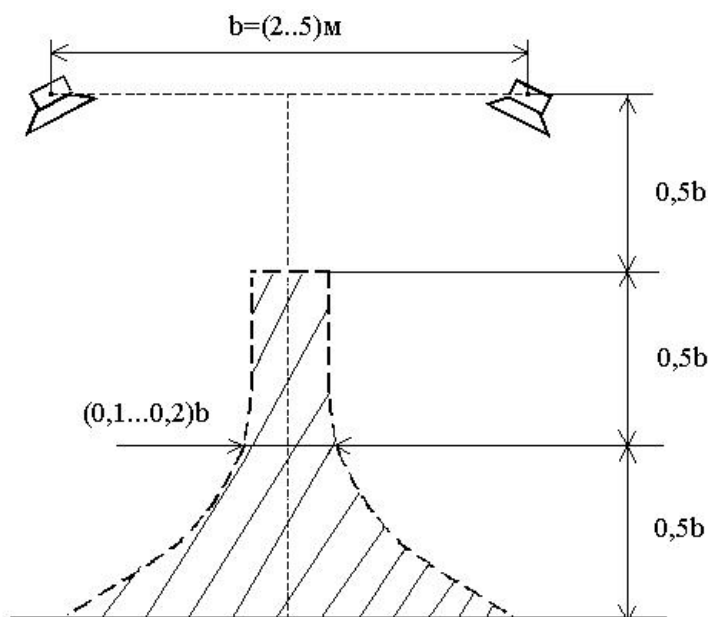


Рисунок 3.8 – Зона оптимального прослуховування стереопрограм

Площа закресленої зони залежить від ширини стереобазиса, яка насамперед залежить від площі та конфігурації приміщення. Для житлових приміщень $b = (2 - 5)м$. При меншій ширині стереобазиса погіршується локалізація окремих інструментів, голосів музикальної програми. Якщо приміщення має маленький час реверберації, зона оптимального прослуховування стає вузькою й розмістити групу слухачів в ній стає важко. Слухачі, які розташуються до гучномовців ближче ніж $0,5b$, будуть відчувати провал звуку, звукова картина для них розірветься.

У невеликій за розмірами апаратурі, наприклад, у переносних магнітолах, штучно збільшують ширину стереобазис введенням перехресних зв'язків в підсилювачі потужності (рис. 3.9), при цьому погіршується коефіцієнт розділення між каналами. Зрозуміло, що такий прийом не наближує до ідеального стереовідтворення, але робить стереоефект яскравішим.

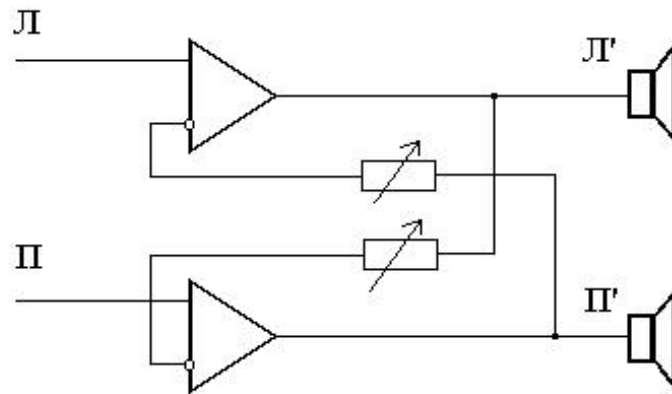


Рисунок 3.9 – Вузол розширення стереобазис

Контрольні питання

1. Чим стереофонічне відтворення звуку відрізняється від монофонічного?
2. За якою структурною схемою побудована n-канальна стереофонічна установка?
3. Що таке бінауральний ефект?
4. На яких частотах переважає інтенсивнісний, а на яких часовий фактор стереофонії?
5. Зобразіть структурну схему змішаного часово-інтенсивнісного звукозапису стереофонічних сигналів.
6. Як визначити зону оптимального прослуховування двоканальної стереопроеграми?
7. Для чого в звукотехнічній апаратурі використовують вузол розширення стереобазис?

4 ЗВУКОТЕХНІЧНА АПАРАТУРА, ЇЇ ПОКАЗНИКИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ

Звукотехнічна апаратура – це сукупність електронних, електромеханічних вузлів, які призначені для перетворення звуку в електричний сигнал, подальшого посилення, обробки, запису та зворотного перетворення в звук. Якість звучання апаратури залежить від частотного діапазону, нерівномірності амплітудно-частотної характеристики, значення коефіцієнта гармонік, характеру та рівня завад та ін. Зменшення частотного діапазону та збільшення в його межах нерівномірності амплітудно-частотної характеристики призводить до появи додаткових призвуків. При великих нелінійних спотвореннях звучання стає хрипливим та неприродним, розбірливість мови падає. Шуми практично не впливають на якість відтворення, доки їх рівень гучності на 10–15 дБ нижчий рівня гучності найбільш слабого звукового сигналу. При підвищенні рівня шумів спочатку маскуються найбільш тихі звукові сигнали. При більш високих шумах якість звуковідтворення значно погіршується; передача мови залишається розбірливою до тих пір, поки рівень шумів не стане вищим середнього рівня мови.

Чинними стандартами передбачається поділ професійної звукотехнічної апаратури на три класи якості: вищий, перший та другий. Вони відрізняються частотним діапазоном, величиною спотворень та завад. Відповідно до цих показників встановлюються норми для окремих пристроїв.

Побутова звукотехнічна апаратура поділяється на групи складності – 0, 1, 2, 3. Нульова група за своїми властивостями наближається до професійної апаратури вищого класу.

Критерієм для поділу звукотехнічної апаратури на класи або групи складності є помітність спотворень [1], тобто невідповідність за спектром вхідного та вихідного сигналу звукотехнічної апаратури.

У звукотехніці вважається, що спотворення повністю не помітні, якщо менше 15 % слухачів їх помітили, практично не помітні у випадку, коли спотворення відчували від 15 до 30 % слухачів, невпевнено помітні, якщо їх помітили від 31 до 50 % слухачів. Те, що спотворення помічають більше половини слухачів, означає, що спотворення впевнено помітні.

Звукотехнічна апаратура відноситься:

- до вищого класу, якщо спотворення повністю непомітні звичайними слухачами та практично непомітні експертами;
- до першого класу, якщо спотворення практично непомітні слухачами та невпевнено помітні експертами;
- до другого класу, якщо спотворення невпевнено помітні слухачами та впевнено помітні експертами.

Спотворення залежать від багатьох показників та характеристик звуко-технічної апаратури. Це, насамперед, амплітудно-частотні, фазочастотні, амплітудні характеристики, динамічний діапазон, рівень шумів. Таким чином, технічні показники та характеристики, які наводяться у відповідних стандартах до апаратури того чи іншого класу, визначались шляхом багатократних прослуховувань звукових програм звичайними слухачами, експертами, подальшої статистичної обробки результатів прослуховувань, визначення відповідних технічних показників та характеристик апаратури, що діяла при прослуховуванні, й, нарешті, формувалися відповідні технічні вимоги у вигляді нормативних документів.

Основні показники та характеристики звукотехнічної апаратури, які наводяться в стандартах та технічній документації, можна поділити на три групи.

1. Електроакустичні – спотворення, частотні характеристики, рівень власних шумів, динамічний діапазон, вихідна потужність, опір навантаження, коефіцієнти регулювання, звуковий тиск, чутливість, характеристична чутливість, коефіцієнт корисної дії, стабільність, завадостійкість, споживана потужність і т. д.

2. Експлуатаційні – живлення, надійність, зовнішні умови (температура, вологість), набір сервісних функцій, вартість.

3. Конструктивні – об'єм, маса, габаритні розміри, вид конструкції, її дизайн.

4.1 Спотворення

Основним показником звукотехнічної апаратури, який визначає її якість, є спотворення – будь-яка зміна у того чи іншого пристрою форми сигналу на виході $U_{вих}(t)$ у порівнянні з формою сигналу на вході $U_{вх}(t)$. В ідеальному випадку умова неспотвореної роботи апаратури має такий вигляд

$$U_{вих}(t) = K \cdot U_{вх}(t - \Delta t),$$

де Δt – затримка в часі проходження сигналу від входу до виходу;

K – константа. Для виконання цієї умови необхідно, щоб в апаратурі були відсутні лінійні, нелінійні та шумові спотворення.

Потрібно відмітити, що спотворення по-різному проявляють себе в статичному та в динамічному режимах. Справа в тому, що в звукотехнічних пристроях широко використовують різні види негативного зворотного зв'язку. Завдяки цьому вдається отримати високу якість відтворення звуку в статичному режимі, в якому спотворення зведені майже до нуля.

З іншого боку, наявність від'ємного зв'язку є причиною зростання спотворень, які обумовлені затримкою відносно вхідного сигналу зворотного зв'язку. Внаслідок, на цей час різко зростають як лінійні (через звуження смуги пропускання АЧХ та зростання нелінійності ФЧХ), так й нелінійні спотворення (викликані перевантаженням вхідних каскадів через відсутність негативного зворотного зв'язку). Кількісні показники динамічних спотворень досить складні, однак за часом встановлення перехідної характеристики можна судити про зростання спотворень у динамічному режимі.

4.2 Лінійні спотворення

Лінійні спотворення обумовлені впливом реактивних елементів – конденсаторів та котушок індуктивності, опір яких залежить від частоти. Ці спотворення існують навіть при підсиленні дуже слабких сигналів, коли нелінійність активних елементів можна не враховувати. До лінійних спотворень відносяться частотні, фазові та перехідні спотворення. Завдяки лінійним спотворенням обмежується частотний діапазон, неоднаково затримуються в часі різні спектральні складові сигналів, спотворюється форма імпульсних сигналів.

Частотні спотворення виникають через відхилення модуля коефіцієнта передачі пристрою в робочому діапазоні частот від його значення на середніх частотах (частіше на частоті 1 кГц). Вони кількісно визначаються за амплітудно-частотною характеристикою (АЧХ) пристрою (рис. 15) через коефіцієнт частотних спотворень

$$M_f = \frac{K_f}{K_0}, \text{ або в децибелах } G_f = 20 \lg M_f,$$

де f – поточна частота;

K_0 – коефіцієнт передачі на середніх частотах, на яких G_f практично не залежить від частоти. Нижня частота f_n та верхня частота f_b – це граничні частоти, на яких G_f зменшується до заданого рівня.

Різниця частот $f_b - f_n$ визначає робочий діапазон частот або смугу пропускання пристрою.

В багатокаскадних пристроях загальний коефіцієнт частотних спотворень

$$G = G_1 + G_2 + \dots + G_N.$$

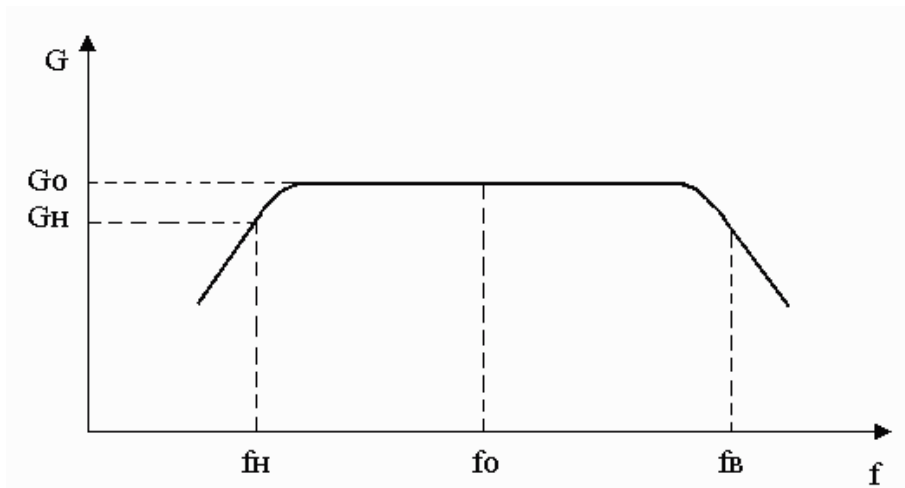


Рисунок 4.1 – Типова амплітудно-частотна характеристика звукового пристрою

Взаємною корекцією коефіцієнтів G_i окремих каскадів можна встановити потрібний загальний коефіцієнт G частотних спотворень.

Суб'єктивні оцінки прослуховувань показують, що помітність широких (з шириною 50 % або більше від центральної частоти) піків та провалів АЧХ набагато більша, ніж вузькосмугових, причому вузькосмугові піки помітніші вузькосмугових провалів. На границях звукового діапазону вузькосмугові піки з шириною менше 15 % від центральної частоти спотворення АЧХ до 10 дБ практично непомітні.

Діапазон частот сигналів, що підсилюються звукотехнічною апаратурою, може досягати 100 кГц або більше, при цьому лінійні спотворення в звуковому діапазоні майже відсутні. Однак ця обставина приводить до таких небажаних явищ, як підсилення завад, генерація на високих частотах, підсилення паразитних напруг з проміжною частотою піднесучої з виходу детектора радіоприймача.

Для боротьби з цими явищами на входах звукових підсилювачів встановлюють спеціальні фільтри, які послаблюють складові фону, шуму та паразитних напруг у тій частині діапазону, де відсутні складові корисного сигналу. Оптимальна крутість спаду коефіцієнта передачі таких фільтрів 12 дБ/окт. Часто фільтри роблять змінними, щоб вибрати смугу частот відповідно до якості програми, що відтворюється. Штучно обмежувати частотну смугу інших вузлів апаратури недоцільно, це призводить до зростання спотворень.

Фазові спотворення є результатом внесених підсилювачем фазових зсувів між різними частотними компонентами складного звукового сигналу. Фазові спотворення будуть відсутні, якщо підсилювач на усіх частотах смуги пропускання не вносить фазових зсувів або цей зсув прямо пропорційний частоті сигналу.

Фазові спотворення оцінюють за фазочастотною характеристикою (ФЧХ). Типова ФЧХ підсилювача зображена на рис. 4.2. При зсуві фази $\Delta\varphi \geq 0$ вихідна напруга випереджає вхідну, при $\Delta\varphi \leq 0$ – відстає. Не утворює спотворень ФЧХ з такою залежністю між зсувом фази та частотою:

$$\Delta\varphi(f) = -2\pi t_3(f - f_0),$$

де t_3 – груповий час запізнення.

Така характеристика наведена пунктиром на рис. 4.2. Груповий час запізнення – це похідна за частотою ФЧХ. При лінійній ФЧХ усі спектральні складові вхідного сигналу запізнюються на однаковий час й це не викликає спотворень форми сигналу. Якщо ФЧХ нелінійна, то різні спектральні складові вхідного сигналу будуть запізнюватися на різний час, форма вихідного сигналу спотвориться.

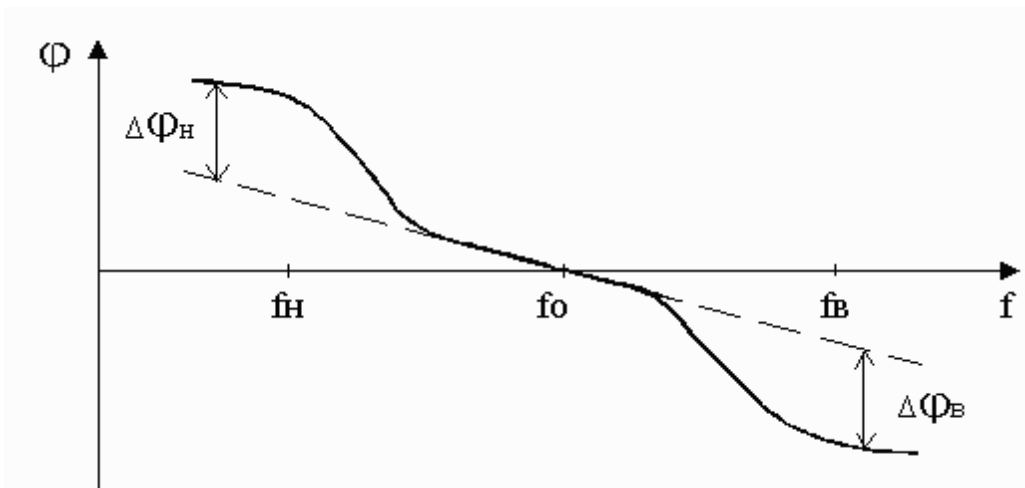


Рисунок 4.2 – Типова фазочастотна характеристика звукового пристрою

Кількісною оцінкою фазових спотворень є різниця між реальною та ідеальною ФЧХ в робочому діапазоні частот. Вважається, що людське вухо не реагує на зміни зсуву фази між окремими гармонічними складовими спектра сигналу. Це правильно при монофонічному відтворенні, однак у стереофонічній апаратурі фазові спотворення суттєво впливають на правильність відтворення звуку. Фазові спотворення високоякісної звукотехнічної апаратури в звуковому діапазоні частот не мають перевищувати $4 - 5^\circ$. Розрахунки показують, що фазові спотворення менші 2° можуть бути реалізовані частотним діапазоном на рівні -3 дБ не менше $8 - 50000$ Гц.

Для кількісної оцінки перехідних спотворень звукотехнічної апаратури аналізують перехідну характеристику (рис. 4.3) – реакцію на виході, на вплив стрибка напруги на її вході. Перехідні спотворення оцінюють за спотвореннями фронту та плоскої вершини імпульсу. Спотворення плоскої вершини пов'язані зі спотвореннями в низькочастотній області сигналу, які легко аналізуються за АЧХ підсилювача.

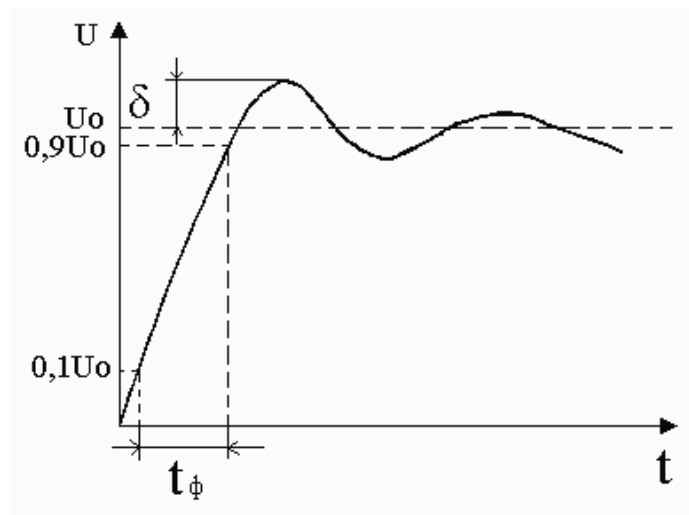


Рисунок 4.3 – Типова перехідна характеристика звукового пристрою

Спотворення фронту імпульсу оцінюють за його тривалістю t_ϕ та викидом δ (рис. 4.3). Тривалість фронту пов'язана з верхньою граничною частотою на рівні 3 дБ співвідношенням

$$t_\phi = \frac{0,35}{f_e}.$$

Спотворення імпульсу приводять до завалу різких перепадів реальних музикальних сигналів, а також до короткочасного зростання нелінійних спотворень через затримки в часі сигналу в петлі зворотного зв'язку. Для зменшення динамічних спотворень підвищують швидкодію підсилювача та зменшують глибину зворотного зв'язку.

Швидкодію підсилювача можна оцінити також за максимальною швидкістю зміни вихідного сигналу V_m . Для лінійних вузлів вона пов'язана з верхньою границею смуги пропускання співвідношенням

$$V_m = 2\pi f_m U_{0m},$$

де f_m – максимальна частота синусоїдального сигналу з амплітудою U_{0m} , який практично не спотворюється.

Кінцеві каскади потужної звукотехнічної апаратури часто працюють у режимі, який достатньо віддалений від лінійного. В цьому випадку швидкість V_m краще оцінювати за перехідною характеристикою як максимальну похідну $h(t)$:

$$V_m = \left. \frac{dh(t)}{dt} \right|_{max} .$$

Чим більша швидкість зміни вихідної напруги, тим менший час її зростання t_ϕ , тим якісніше відтворюється звукова панорама. Типові значення швидкості V_m знаходяться в межах 8–80 В/мкс. Саме з такою швидкістю підсилювачі отримують високу оцінку експертів при визначенні якості звуковідтворення.

Викид фронту δ є різницею між максимальною миттєвою напругою U_m та її встановленим значенням U_0 . Викид фронту можна визначити за формулою

$$\delta = \frac{U_m - U_0}{U_0} .$$

Значний викид у перехідній характеристиці приводить до «дзвону», «металевого» звуку. В високоякісних підсилювачах викид δ не має перевищувати 4–6 %.

Між АЧХ, ФЧХ та перехідною характеристикою існує взаємозв'язок, однак існуючі графоаналітичні методи визначення перехідної характеристики за відомими АЧХ, ФЧХ достатньо складні та не наочні. На практиці простіше отримати перехідну характеристику на екрані осцилографа, при необхідності відкоригувати її та оцінити параметри.

4.3 Нелінійні спотворення

Нелінійні спотворення викликані проходженням сигналу через елементи, які мають нелінійні характеристики, наприклад, через транзистори, внаслідок чого спотворюється форма напруги, змінюється її спектральний склад. На виході підсилювача з'являються нові частотні компоненти, які змінюють тембр звуку, його розбірливість, у цілому погіршують якість звуку.

Нелінійні спотворення бувають гармонічними та інтермодуляційними.

Завдяки гармонічним спотворенням у вихідному сигналі присутні вищі гармоніки, яких немає у вхідному сигналі. Вплив на правильність звуковідтворення гармонік невисокого порядку не такий відчутний, як гармонік четвертого та більш високого порядку. Навіть маленький відсоток цих гармонік у вихідному сигналі на слух сприймається людиною як неприємні призвуки, спотворений звук швидко втомлює слухачів.

Гармонічні спотворення кількісно оцінюються за коефіцієнтом гармонік K_{Γ} , який вимірюється у відсотках та визначається за формулою

$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_N^2}}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_N^2}} \cdot 100,$$

де U_N – амплітуда напруги N-ої гармоніки;

1, 2, ..., N – номер гармоніки.

При малому значенні коефіцієнта гармонік ($K_{\Gamma} \leq 1\%$) його можна обчислювати за формулою

$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} U_i^2}}{U_1} \cdot 100.$$

У багатьох випадках з усіх гармонік найбільш інтенсивні друга та третя. Інші мають набагато меншу потужність й незначною мірою впливають на форму вихідного сигналу.

Коефіцієнт гармонік багатокаскадного підсилювача близький до суми коефіцієнтів гармонік окремих каскадів [4].

Нелінійні спотворення вузлів звукотехнічної апаратури збільшуються неправильним вибором режимів роботи каскадів, неоптимальною глибиною зворотного зв'язку, паразитними зв'язками між каскадами, їх самозбудженням, а також надмірним підйомом АЧХ каскадів в області верхніх частот [6].

Для високоякісних підсилювачів часто вводять ще один показник, який характеризує їх нелінійність, – коефіцієнт інтермодуляційних спотворень K_I . Його вимірюють в процентах та визначають за формулами

$$K_I = 100 \sqrt{K_{I2}^2 + K_{I3}^2},$$

$$K_{I2} = \frac{(U_{f_2-f_1} + U_{f_2+f_1})}{U_{f_2}},$$

$$K_{I3} = \frac{(U_{f_2-2f_1} + U_{f_2+2f_1})}{U_{f_2}},$$

де K_{I2} , K_{I3} – коефіцієнти інтермодуляційних спотворень відповідно другого та третього порядків;

U_{f_i} – амплітуда вихідної напруги різницевої (сумарної) частоти при подачі на вхід підсилювача суми напруг з частотами f_1, f_2 , причому відношення $\frac{U_{f_1}}{U_{f_2}} > 4$. Допустиме значення коефіцієнта K_1 менше (0,1–1) %.

Нелінійні спотворення суттєво залежать від амплітуди сигналу, що подається на вхід. На рис. 4.4 наведено залежність коефіцієнта гармонік від потужності сигналу на виході підсилювача.

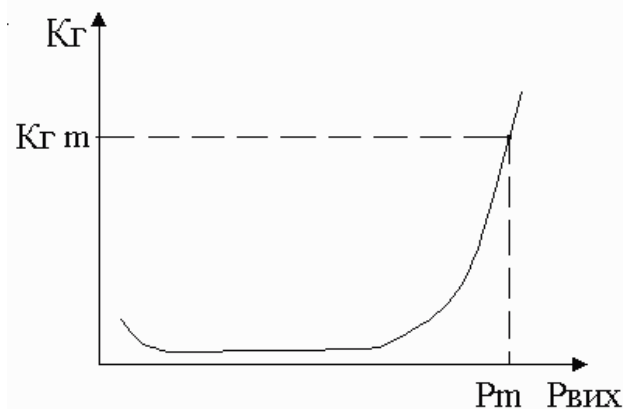


Рисунок 4.4 – Типова залежність коефіцієнта гармонік звукового пристрою від вихідної потужності

Ця крива є основною характеристикою для оцінювання нелінійних спотворень. Вона призначена також для визначення максимальної корисної потужності підсилювача за заданим K_G .

Висока лінійність підсилювального каскаду досягається такими способами: збільшенням напруги живлення; введенням глибокого негативного зворотного зв'язку, усуненням шунтування виходу входом наступного каскаду. Бажано, щоб глибина зворотного зв'язку була постійною у всьому робочому діапазоні частот, при цьому підвищуються стійкість та лінійність каскаду.

Динамічні нелінійні спотворення, такі як перехідні гармонічні, інтермодуляційні, виникають, коли частота зрізу високих частот попередніх каскадів підсилювача лежить вище частоти зрізу підсилювача потужності із розімкненою петлею зворотного зв'язку.

Оскільки загальний зворотний зв'язок визначає коефіцієнт підсилення вхідного каскаду та протягом часу наростання t_n вихідного сигналу не діє, то вхідні каскади підсилювача переходять у стан насичення, який ще збільшується запізненням сигналу по петлі зворотного зв'язку. У результаті, перевантаження вхідних каскадів зберігаються довше часу наростання сигналу підсилювача при розімкненій петлі зворотного зв'язку. При цьому нелінійні динамічні спотворення максимально зростають.

Щоб зменшити динамічні спотворення, необхідно:

- добитися, щоб швидкість зміни вихідної напруги апаратури V_m була вища максимальної швидкості наростання сигналу (наприклад, при максимальній вихідній потужності підсилювача $P_{max} = 100 \text{ Вт}$ на навантаженні $R_n = 8 \text{ Ом}$, швидкість V_m для неспотвореного підсилення сигналу з частотою 20 кГц повинна бути вища 5 В/мкс);
- зменшити глибину міжкаскадного зворотного зв'язку до мінімуму;
- використовувати в тракту підсилення лінійні каскади з великою перевантажувальною здатністю;
- вилучити зі спектра вхідного сигналу складові, що перевищують допустиме значення f_m , яке визначається за формулою

$$f_m = \frac{V_m}{2\pi U_{0m}},$$

де U_{0m} – максимальна амплітуда вихідного сигналу на навантаженні опором R_n ($U_{0m} = 1,4\sqrt{P_{max} \cdot R_n}$).

Шумові спотворення. При відсутності сигналу на вході звукотехнічної апаратури, на її виході діє деяка, зазвичай невелика, напруга. Ця напруга обумовлена в основному внутрішніми завадами, серед яких розрізняють фон, наводки, завади від мікрофонного ефекту, теплові шуми резисторів та пасивних елементів з активними втратами, шуми підсилювальних елементів.

Фон з'являється в результаті недостатньої фільтрації пульсуючої напруги джерела живлення, яке працює від мережі змінного струму. Гармонічні складові фону кратні частоті мережі живлення.

Наводки утворюються через паразитні електричні, магнітні, гальванічні або електромагнітні зв'язки кіл підсилювача із джерелами завад.

Мікрофонний ефект – це результат перетворення механічних коливань елементів підсилювача в електричні, які проходять на вхід підсилювача. Спектр цих коливань займає діапазон $0,1-10000 \text{ Гц}$. Мікрофонний ефект помітно проявляється в інтегральних підсилювачах з великим коефіцієнтом підсилення, які виконані на одній підкладці. Щоб його усунути, використовують раціональну конструкцію елементів підсилювача, більш надійне їх кріплення, демпфірування, застосовують амортизаційні вузли.

Теплові шуми обумовлені тепловим хаотичним рухом вільних носіїв зарядів, наприклад, електронів, в об'ємі провідника або напівпровідника. У результаті на кінцях провідника, який має деякий опір, діє випадкова, флуктуаційна е.р.с., яка називається е.р.с. шуму. Оскільки вона періодична функція часу, то її спектр є суцільним та практично рівномірним в діапазоні частот від нуля до сотень мегагерц. Шум з подібним спектром називають білим.

Фон, наводки та завади від мікрофонного ефекту в підсилювачі можна в принципі зменшити до будь-яких заданих значень. Теплові ж шуми та шуми підсилювальних елементів принципово не усуваються. Звичайно вдається лише мінімізувати частку шумів, які створюються підсилювальними елементами. Практичні способи подавлення завад та зниження шумів в підсилювачах описані в [4].

Шумові властивості звукотехнічної апаратури оцінюють відношенням сигнал/шум. Під цією величиною розуміють відношення вихідної напруги сигналу при номінальній вихідній потужності підсилювача до сумарної напруги шумів на виході. У високоякісній апаратурі відношення сигнал/шум досягає 60–110 дБ.

Відношення максимальної напруги вхідного сигналу до мінімальної при заданих: рівні коефіцієнта гармонік для максимального сигналу та відношенні сигнал/шум, для мінімального сигналу є динамічним діапазоном звукового пристрою:

$$D = \frac{U_{vx\ max}}{U_{vx\ min}}.$$

Для високоякісного підсилювача максимальне значення вхідного сигналу обмежується нелінійністю амплітудної характеристики та приймається рівним номінальній вхідній напрузі $U_{vx\ ном}$, яка забезпечує номінальну вихідну потужність при заданому коефіцієнті гармонік, тобто $U_{vx\ max} = U_{vx\ ном}$. Мінімальну вхідну напругу $U_{vx\ min}$ вибирають такою, щоб власні завади та шуми підсилювача не маскували вхідний сигнал. В крайньому випадку основними завадами в підсилювачі є шуми, при цьому

$$U_{vx\ min} = K_3 \cdot U_{ш. vx},$$

$$K_3 = \frac{U_{vx\ min}}{U_{ш. vx}},$$

де K_3 – коефіцієнт завадозахищеності ($K_3 \geq 1$).

Динамічний діапазон є важливим технічним показником, для кращих зразків звукової апаратури $D \geq 100$ дБ.

Джерела звукових сигналів мають власний динамічний діапазон D_c , рівний відношенню максимальної E_{max} до мінімальної E_{min} е.р.с. джерела сигналу:

$$D_c = \frac{E_{max}}{E_{min}}.$$

Для підсилення сигналу з допустимими нелінійними спотвореннями та завадозахищеністю необхідно, щоб $D \geq D_c$.

Щоб збільшити динамічний діапазон підсилювача, необхідно зменшувати рівень власних завад, використовувати підсилювальні елементи з більш лінійною характеристикою – високовольтні потужні вихідні транзистори, застосовувати ручне або автоматичне регулювання підсилення.

Контрольні питання

1. Що є критерієм для поділу звукотехнічної апаратури на класи або групи складності?
2. Як кількісно визначити лінійні спотворення?
3. Дайте означення перехідної характеристики підсилювача.
4. Назвіть способи підвищення лінійності підсилювальних каскадів.
5. У чому причина появи динамічних нелінійних спотворень, як їх послабити?
6. Що таке динамічний діапазон підсилювача, як він співвідноситься з динамічним діапазоном сигналу?

5 ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

Усі електромеханічні перетворювачі можна поділити на дві групи: активні та пасивні. Активні перетворювачі не тільки перетворюють, але й підсилюють сигнали. Тому потужність сигналу на виході таких перетворювачів може бути на декілька порядків вища потужності сигналу на вході (вугільний мікрофон, іонофон, пневматичний гучномовець і т. ін.). Усі активні перетворювачі отримують додаткову енергію від зовнішніх джерел. Пасивні перетворювачі не мають додаткових джерел енергії й не можуть підсилювати сигнали, що перетворюють. Ефективність таких перетворювачів визначається їх к.к.д. У більшості перетворювачів, що використовуються, к.к.д. малий.

В електроакустичних приладах, які застосовуються в звуковому мовленні, можливе використання тільки лінійних перетворювачів, оскільки вони мають передавати сигнали без спотворень. Будь-який лінійний пасивний перетворювач зворотний, тобто його можна використовувати як для перетворення електричної енергії в механічну (перетворювач-двигун), так й для перетворення механічної енергії в електричну (перетворювач-генератор). Між електромеханічним перетворювачем та електричним чотирьохполюсником може бути проведена аналогія. Сигнали на обох входах визначаються двома величинами: на електричному – напругою та струмом, на механічному – силою та швидкістю. В силу аналогії для лінійних перетворювачів зв'язок між цими величинами може бути записаний у вигляді:

$$\begin{cases} u = Z_0 i + K_1 v \\ F = K_2 i + z_0 v \end{cases}$$

де Z_0 – власний електричний опір;

z_0 – власний механічний опір;

K_1, K_2 – коефіцієнти електромеханічного зв'язку.

З наведених виразів видно, що коефіцієнти K_1 та K_2 є відповідно коефіцієнтами чутливості перетворювача-генератора в режимі холостого ходу та перетворювача-двигуна із загальмованим механічним виходом:

$$K_1 = \left. \frac{U}{v} \right|_{i=0},$$

$$K_2 = \left. \frac{F}{i} \right|_{v=0}.$$

Для лінійних зворотних перетворювачів справедлива теорема взаємності. Якщо в рівняннях усі величини дані в міжнародній системі одиниць, то виконується рівність:

$$|K_1| = |K_2|.$$

Будь-який перетворювач-двигун навантажений на механічний опір z_H акустичної частини приладу, а перетворювач-генератор – на електричний опір Z_H . Очевидно, що від навантаження залежить й вхідний опір перетворювача. Аналіз рівнянь показує, що вхідний опір перетворювача-двигуна дорівнює:

$$Z_{вх} = \frac{u}{i} = Z_0 + Z_{вн},$$

де $Z_{вн}$ – додатковий електричний опір, який вноситься внаслідок наявності електромеханічного зв'язку:

$$Z_{вн} = -\frac{K_1 K_2}{z_0 + z_H}.$$

Аналогічно для вхідного механічного опору перетворювача-генератора отримаємо співвідношення:

$$z_{вх} = \frac{F}{v} = z_0 + z_{вн},$$

де

$$z_{вн} = -\frac{K_1 K_2}{Z_0 + Z_H}.$$

Відповідно до виразу еквівалентні схеми вхідних опорів перетворювача-двигуна $Z_{вн}$ та перетворювача-генератора $z_{вн}$ мають вигляд, зображений на рис. 5.1.

Механічна частина перетворювача складається з деталей, коливання яких описуються диференціальними рівняннями механіки. Між цими рівняннями та рівняннями, які описують струми й напруги в електричних колах, багато спільного. Це дозволяє для більшості механічних систем побудувати їх електричні аналоги.

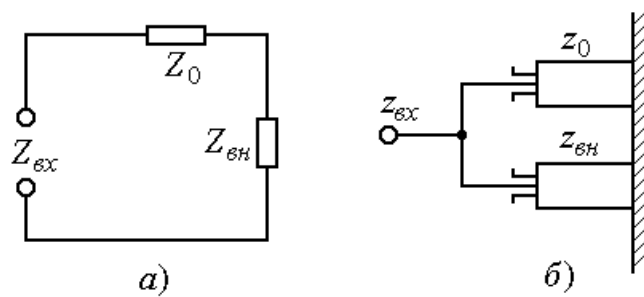


Рисунок 5.1 – Схеми еквівалентного вхідного електричного (а) та механічного (б) опору перетворювача

На рис. 5.2 наведені електричні аналоги найпростіших елементів.

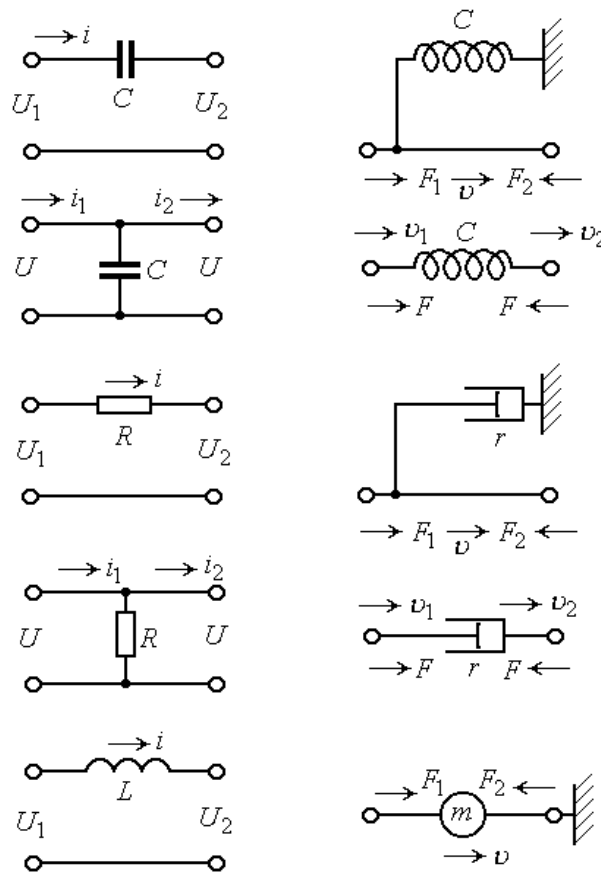


Рисунок 5.2 – Схеми електричних та механічних аналогів

Як видно електричним аналогом сили є напруга, а електричним аналогом швидкості – струм.

Необхідно підкреслити, що аналогія не є тотожністю. Так, наприклад, з'єднанню послідовно-механічних елементів відповідають паралельно ввімкнені електричні елементи. Послідовно ввімкненій індуктивності відповідає маса, жорстко пов'язана з точкою прикладення сили. Тому механічний опір маси можна вважати ввімкненим вузлом. Механічний аналог індуктивності, ввімкненої в коло паралельно, відсутній.

5.1 Мікрофони

Мікрофонами називаються електроакустичні прилади, які перетворюють акустичні сигнали в електричні. Для цього перетворення використовують різні фізичні явища. Для електромеханічного перетворення може бути використано будь-який ефект, який призводить до появи різниці потенціалів або струму при пересуванні чи деформації тіла під дією прикладених сил. При пересуванні провідника в постійному магнітному полі в ньому виникає е.р.с. Цей ефект називається електродинамічним. При зміні повітряного зазору в магнітному колі постійного магніту змінюється величина магнітного потоку. Якщо на магнітне коло надіта котушка, то в ній збуджується е.р.с. Такий ефект називається електромагнітним. Взаємне пересування двох заряджених тіл викликає зміну різниці потенціалу між ними. Такий ефект можна назвати електростатичним. В деяких матеріалах при деформації виникає електрична або магнітна поляризація. Перший ефект називається п'єзоелектричним, а другий – магніострикційним. Для перетворення можуть бути використані й інші ефекти, наприклад контактний, тобто зміна опору контакту залежно від тиску.

Відповідно до ефектів, що використовуються, розрізняють основні типи мікрофонів: електродинамічні, електромагнітні, конденсаторні або електростатичні, п'єзоелектричні, вугільні або контактні.

До основних характеристик мікрофонів відносяться:

- номінальний діапазон частот – діапазон частот, в якому визначені параметри мікрофона;
- чутливість – відношення е.р.с. (напруги холостого ходу) на виході мікрофона до звукового тиску, який діє на мікрофон;
- стандартний рівень чутливості – двадцять десяткових логарифмів відношення напруги, яка розвивається на номінальному опорі навантаження при звуковому тиску 1 Па, до напруги, що відповідає потужності 1 мВт;
- нерівномірність частотної характеристики – відношення, виражене в децибелах, максимальної чутливості мікрофона до мінімальної, в номінальному діапазоні частот;
- робоча вісь мікрофона – пряма, яка проходить через робочий (акустичний) центр мікрофона;
- характеристика спрямованості – залежність чутливості мікрофона в вільному полі плоскої звукової хвилі від кута між робочою віссю мікрофона та напрямком на джерело звуку;
- перепад чутливості (фронт – тил) – відношення чутливості мікрофона в напрямку робочої осі до чутливості під кутом 180°;
- рівень еквівалентного звукового тиску завад – рівень звукового тиску, який викликає на виході мікрофона напругу, рівну напрузі, яка виникла б під дією зовнішніх та внутрішніх завад при відсутності звукового поля;
- номінальний опір навантаження – опір навантаження, яке треба підімкнути до виходу мікрофона, його значення вказується в технічній документації.

Характеристики мікрофонів є результатом взаємодії двох перетворювачів: акустомеханічного та механоелектричного. В акустомеханічному перетворювачі здійснюється спочатку перетворення звукового тиску в силу, що діє на перетворювач, а потім перетворення сили в швидкість або зсув рухомої частини акустомеханічного перетворювача. В механоелектричному перетворювачі здійснюється перетворення швидкості (або зсуву) рухомої частини в е.р.с. Відношення сили на виході першого перетворювача до прикладеного звукового тиску має назву акустичної характеристики мікрофона.

Якщо акустична характеристика не залежить від кута між напрямком падіння звукової хвилі та робочою віссю, то прилад називають приймачем тиску. Ідеальний приймач тиску має мати розміри, малі в порівнянні з довжиною хвилі. У такого приймача акустична характеристика не залежить від частоти. Реальні мікрофони – приймачі звукового тиску мають розміри, сумірні з довжиною звукової хвилі в області високих частот. В результаті дифракції, що виникає, змінюється акустична характеристика. Якщо конструкція приймача не сферична, то з'являється залежність акустичної характеристики від напрямку надходження звукової хвилі (рис. 5.3). В області нижніх частот усі мікрофони – приймачі тиску, мають кругову характеристику спрямованості (рис. 5.3, а).

Мікрофон може мати таку конструкцію, при якій на рухому частину перетворювача діє сила, пропорційна градієнту звукового тиску. Градієнт звукового тиску, рівний відношенню різниці тиску в двох сусідніх точках до відстані між ними, є векторною величиною.

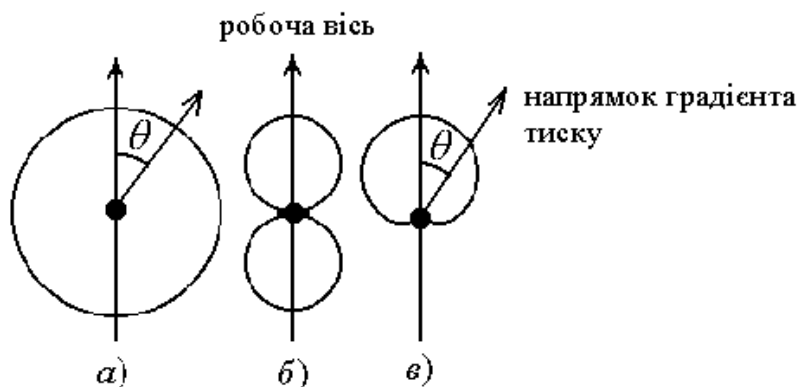


Рисунок 5.3 – Типові характеристики спрямованості мікрофонів
 а – кругова; б – косинусоїдальна; в – кардіоїдна

Він орієнтований в бік найшвидшого зростання тиску. Приймач градієнта тиску має рухому частину, на яку звук потрапляє з двох сторін. Результуюча сила визначається різницею шляху, який пройшов звук. Ця різниця пропорційна косинусу кута θ між робочою віссю та напрямком градієнта тиску.

Чим більший градієнт тиску, тим більша різниця тиску при тому ж запізненні. За наявності запізнення виникає зсув за фазою між хвилями. Величина цього зсуву пропорційна відношенню різниці шляху та довжини звукової хвилі. Тому акустична характеристика приймача градієнта тиску пропорційна частоті та косинусу кута θ . Мікрофон – приймач градієнта тиску, має косинусоїдальну або як її ще називають вісімкоподібну характеристику спрямованості (рис. 5.3, б).

Широке застосування набули однобічно спрямовані мікрофони. Однобічної спрямованості досягають або поєднанням в одному мікрофоні двох приймачів (електрично комбіновані мікрофони), або використанням такої конструкції, при якій сила, що діє на рухому частину, залежить як від тиску, так й від градієнта тиску (акустично комбіновані мікрофони). Найбільш поширені кардіоїдні мікрофони, в яких поєднуються приймачі тиску та градієнта тиску з однаковою осью чутливістю. В цьому випадку характеристика спрямованості мікрофона:

$$D(\theta) = \frac{1}{2}(1 + \cos \theta).$$

Характеристика спрямованості кардіоїдного мікрофона наведена на рис. 5.3, в). З нього видно, що при малих кутах θ чутливість мікрофона майже не змінюється. В той же час вона швидко зменшується до нуля при кутах θ не більше 90° .

В деяких випадках потрібні мікрофони з підвищеною спрямованістю. Для цієї мети розроблені спеціальні конструкції. Поєднуючи в одному корпусі два приймачі градієнта тиску, здобувають біградієнтний мікрофон. Його характеристика спрямованості ($D(\theta) \approx \cos^2 \theta$) гостріша, ніж у приймача градієнта тиску. Так само більш гостру характеристику спрямованості здобувають, поєднуючи два кардіоїдних мікрофони. Більш гострі характеристики мають так звані надспрямовані мікрофони. Висока спрямованість забезпечується установленням перед мікрофоном пучка трубок – хвилеводів різної довжини. При появі звуку вздовж робочої осі всі шляхи проходження звуку однакові, й тому тиск на мембрану мікрофона максимальний. Якщо ж звук приходить під деяким кутом θ , то з'являється значна різниця ходу й за рахунок інтерференції тиск на мембрану зменшується.

Електродинамічні мікрофони бувають двох типів: котушкові та стрічкові. В котушкових мікрофонах електромеханічне перетворення здійснюється при русі в радіальному магнітному полі провідника, який намотаний в формі котушки. Ця котушка з'єднана з мембраною, яка є основним елементом акустико-механічного перетворювача. В стрічковому мікрофоні перетворення здійснюється при русі в плоскому магнітному полі стрічки з алюмінієвої фольги, яка є одночасно й мембраною перетворювача.

Е.р.с., що виникає на кінцях котушки, пропорційна її коливальній швидкості. Тому конструкція мембрани повинна бути такою, щоб при постійному звуковому тиску коливальна швидкість котушки не залежала б від частоти. На рис. 5.4 схематично зображена конструкція котушкового мікрофона приймача тиску, що забезпечує виконання цієї вимоги. Мембрана 1 штампується із жорсткої полімерної плівки. Середня куполоподібна частина є основним елементом рухомої системи, на яку діє тиск звукової хвилі. По краях мембрани зроблено гофр, завдяки якому досягається велика пружність пересування мембрани у напрямку осі мікрофона. В той самий час мембрана має достатню жорсткість в поперечному напрямку, щоб утримати з'єднану з нею звукову котушку 2 в зазорі магнітного кола. Магнітне коло складається з верхнього фланця 3, кільцеподібного магніту 4, нижнього фланця 5 та керна 6. Зазор між керном та верхнім фланцем не більший 1 мм. Магніт виконується з матеріалу, який має велику коерцитивну силу, решта елементів магнітопроводу – з чистого заліза або інших матеріалів зі значною великою магнітною проникністю.

У звукотехніці поширені однобічно спрямовані котушкові мікрофони.

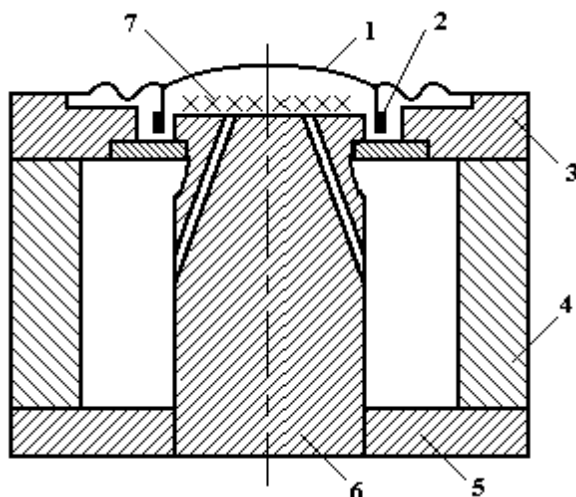


Рисунок 5.4 – Конструкція електродинамічного котушкового мікрофона

Для набуття кардіоїдної характеристики спрямованості конструкція таких мікрофонів забезпечує надходження звукових хвиль на обидві поверхні мембрани. Для цього роблять або kern порожнім, або передбачають широкі канали, які з'єднують об'єм усередині магніту із зовнішнім середовищем. Результуюча сила має два компоненти. Один з них визначається різницею тиску, другий – пропорційний тиску, що прикладений до зовнішньої поверхні. Відповідним підбором елементів конструкції вдається забезпечити постійність чутливості та характеристики спрямованості в широкому діапазоні частот.

Котушкові мікрофони мають високу кліматичну та механічну стійкість. Вони порівняно нескладні у виготовленні. Низька ціна та висока надійність забезпечили широке застосування катушкових мікрофонів у різних галузях народного господарства, в радіомовленні та звукозапису, а також в побутовій апаратурі звукозапису.

Стрічкові мікрофони виконуються у вигляді приймача градієнта тиску, приймача тиску й в комбінованому варіанті. У приймачах тиску зворотну сторону стрічки закривають спеціальним пристроєм, який створює активний акустичний опір. Разом зі стрічкою вони утворюють складний фільтр, який забезпечує в широкому діапазоні потрібну діаграму спрямованості. Стрічкові мікрофони набули широкого застосування в студіях звукового та телевізійного мовлення, але їх недоліком є недостатня кліматична стійкість та чутливість до електромагнітних завад.

Принцип дії конденсаторного електростатичного мікрофона полягає у зміні ємності капсуля під час коливань мембрани під дією звукового тиску. В результаті виникає змінний струм заряджання та розряджання конденсатора, який призводить до появи змінної напруги на опорі навантаження, пропорційної звуковому тиску.

Залежно від конструкції, конденсаторні мікрофони можуть мати різні характеристики спрямованості: кругову, косинусоїдальну, кардіоїдну. Великі можливості при звуковідтворенні дають мікрофони з дистанційно-керованою характеристикою спрямованості.

Сучасні конденсаторні мікрофони забезпечують високу якість перетворення звуку. Тому вони широко застосовуються в звукозапису, звуковому та телевізійному мовленні. Їх основним недоліком є необхідність застосування порівняно великої поляризаційної напруги. Джерела такої напруги ускладнюють й збільшують ціну обладнання. Тому багато уваги приділяється розробці конденсаторних мікрофонів без поляризаційної напруги, в тому числі електретним мікрофонам, капсуль яких має внутрішнє джерело постійного електричного поля у вигляді плівки або пластини з постійно поляризованого діелектрика, який називається електретом.

Мікрофони електретного типу з вбудованим джерелом живлення за зручністю експлуатації та коштовністю не відрізняються від динамічних й тому перспективні в побутовій звуковій апаратурі.

5.2 Гучномовці

Гучномовцями називаються пристрої, які перетворюють електричні сигнали в звукові хвилі. Гучномовець може мати один або декілька електроакустичних перетворювачів, які зазвичай називають головками.

Для перетворення електричної енергії в акустичну можуть застосовуватись різні фізичні явища [5]. Найбільш поширені електродинамічні гучномовці, в яких використовується електродинамічний ефект, тобто взаємодія

електричного струму з постійним магнітним полем. В деяких випадках використовуються електромагнітні, електростатичні й інші перетворювачі. Залежно від призначення, гучномовці можуть відрізнятися потужністю, показниками якості, електричними, кліматичними та іншими характеристиками.

Основними характеристиками гучномовців є ті з них, які визначають його властивості як електроакустичного перетворювача. До них відносять:

- номінальний електричний опір – активний опір, яким замінюють гучномовець при вимірюванні електричної потужності, спожитої від джерела;

- номінальна електрична потужність – потужність, що розсіюється на електричному опорі гучномовця при підведенні до нього максимально допустимої напруги, обмеженої допустимими нелінійними спотвореннями;

- максимальна потужність – найбільша потужність, при якій гучномовець може довгий час працювати на реальному звуковому сигналі без пошкоджень;

- номінальний діапазон частот – обумовлений в технічній документації діапазон частот, в якому визначаються параметри гучномовця;

- частотна характеристика звукового тиску – залежність від частоти звукового тиску, якого досягає гучномовець в точці вільного поля, що знаходиться на певній відстані від гучномовця, при постійній напрузі на затискачах гучномовця;

- нерівномірність частотної характеристики у децибелах – відношення максимального звукового тиску до мінімального в номінальному діапазоні частот (піки та провали частотної характеристики вужчі 1/8 октави не враховуються);

- середній звуковий тиск – середньоквадратичне значення звукового тиску, утвореного гучномовцем в заданій точці вільного поля (усереднення здійснюється за значеннями звукового тиску на частотах, розподілених рівномірно в логарифмічному масштабі);

- характеристична чутливість – відношення середнього звукового тиску, утвореного гучномовцем на осі, на відстані 1 м до квадратичного кореня електричної потужності (потужність визначається як відношення квадрата підведеної ефективної напруги до номінального електричного опору);

- середній стандартний звуковий тиск – це тиск, утворений гучномовцем на його осі, на відстані 1 м при підведенні до нього напруги, що відповідає електричній потужності 0,1 Вт, на номінальному електричному опорі;

- характеристика спрямованості – залежність звукового тиску, утвореного гучномовцем на даній частоті, або в даній смузі частот, від кута між віссю гучномовця та напрямком на точку, в якій проводиться вимірювання (відстань між вказаною точкою й гучномовцем повинна бути постійною);

- акустична потужність – це потужність звуку, який випромінюється гучномовцем на даній частоті або в смузі частот;

– коефіцієнт осьової концентрації – відношення акустичної потужності неспрямованого випромінювача до акустичної потужності даного випромінювача, при умові, що обидва випромінювачі утворюють однаковий тиск на рівній відстані, на осі;

– індекс спрямованості – коефіцієнт осьової концентрації, виражений в децибелах;

– приведений к.к.д. – відношення випромінюваної гучномовцем акустичної потужності на даній частоті або в смузі частот до електричної потужності, яка розсіюється на номінальному опорі гучномовця;

– коефіцієнт гармонік – відношення середньоквадратичного звукового тиску усіх гармонік, починаючи з 2-ї, до значення звукового тиску неспотвореного звукового сигналу.

Як правило, в електроакустичних перетворювачах, в тому числі й в гучномовцях, мають місце два послідовних перетворення сигналу. Електричний сигнал перетворюється в коливання механічної системи. Коливання механічної системи поверхні збуджують звукові хвилі. Очевидно, що коливальна швидкість середовища на поверхні випромінювача дорівнює швидкості його коливань. В той же час випромінювач при русі долає силу, утворену середовищем. Ця сила визначається звуковим тиском на поверхні випромінювача площею S . Випромінювальна акустична потужність дорівнює:

$$P_a = S p V_k \cos \psi,$$

де ψ – кут фазового зсуву між тиском та коливальною швидкістю.

Якщо випромінюється плоска звукова хвиля, то звуковий тиск та коливальна швидкість збігаються за фазою. Якщо ж фронт хвилі має радіус кривизни, який порівнюється з довжиною хвилі або менший за неї, то фазовий зсув може бути значним.

Механічний опір, на який навантажений випромінювач, називається опором випромінювання. Відношення цього опору до площі випромінювача називається питомим опором випромінювання. В загальному випадку питомий опір випромінювання:

$$z_R = r_R + jx_R.$$

Якщо випромінювач має розміри, більші в порівнянні з довжиною випромінюваної хвилі, то фазовий зсув близький до нуля й питомий опір випромінювання можна записати у вигляді:

$$z_R = \frac{P}{V_k} = Z_A.$$

В радіоприймачах, телевизорах та іншій аналогічній апаратурі застосовують конусні головки гучномовців. Конструкція головки такого гучномовця показана на рис. 5.5. Основними частинами головки є магнітний вузол, рухомий вузол та вузол для кріплення. Магнітний вузол складається з постійного магніту 1, що створює магнітне поле, й магнітопровода з кільцевим зазором. Найбільш поширена конструкція з кільцевим магнітом.

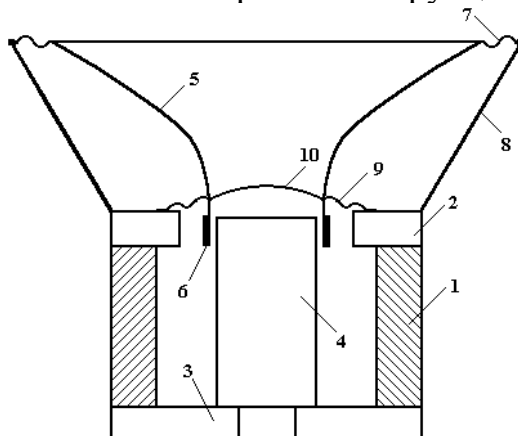


Рисунок 5.5 – Конструкція конусної головки гучномовця

Магніт виконується зі спеціальних магнітних матеріалів, наприклад алюмінієво-нікелевого сплаву (альні), сплаву з кобальтом (альніко), а також металокераміки з фериту-барію. Магнітопровід в цьому випадку складається з верхнього 2 та нижнього 3 фланців й центрального керна 4. Між керном та фланцем є кільцевий зазор шириною біля 1 мм. Існують також магнітні вузли з центральним (керновим) магнітом та відкритим магнітопроводом у вигляді скоби.

Рухомий вузол складається з конічної діафрагми та звукової котушки. Діафрагма звичайно виконується з паперової маси. Діафрагма потужних гучномовців має криволінійну твірну (рис. 5.5), що сприяє зменшенню нелінійних спотворень. До вершини конуса 5 прикріплена звукова котушка 6, яка розташована в кільцевому зазорі магнітопроводу. В малопотужних гучномовцях каркас котушки виконаний у вигляді тонкого паперового циліндра. Поверх каркаса намотана ізольована мідна провідка. В потужних гучномовцях каркас котушки виконується з тонкого алюмінію. При цьому каркас роблять з повздовжнім розрізом, оскільки в протилежному випадку він би діяв як гальмівний короткозамкнутий виток.

Рухомий вузол закріплюється за допомогою гнучкого коміра 7, приклеєного до каркаса 8, та гофрированої центральної шайби 9. Він закріплюється таким чином, щоб звукова котушка не торкалась керна та фланця. Зазор між звуковою котушкою й керном має бути захищений від потрапляння пилу. Особливо небезпечно потрапляння залізних ошурок, які утримуються сильним магнітним полем та швидко виводять гучномовець з ладу. Тому до вершини конуса приклеюють пилозахисний ковпачок 10.

Рухомий вузол головки гучномовця можна розглядати як коливальну систему з одним ступенем вільності. Маса цієї системи m дорівнює сумі мас діафрагми та звукової котушки, а гнучкість c дорівнює результуючій гнучкості коміра та центральної шайби. Ця система здійснює коливання в осьовому напрямку під дією сили, прикладеної до звукової котушки:

$$F = Bli,$$

де B – індукція в зазорі магнітної системи, Тл;

l – довжина проводу звукової котушки, м;

i – струм через котушку, А.

Швидкість коливань рухомої системи максимальна на резонансній частоті ω_0 :

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{mc}}.$$

Вхідний опір головки гучномовця на цій частоті максимальний. На частотах, нижчих резонансної, вхідний опір наближається до активного опору звукової котушки.

У потужних високоякісних головках гучномовців резонансна частота рухомої системи лежить в діапазоні від 40 до 80 Гц. У головках, спеціально призначених для відтворення низьких частот, частоту резонансу зменшують до 30 Гц та навіть нижче. У малопотужних головках, що використовуються в абонентських гучномовцях та переносних приймачах, резонансна частота лежить вище 100 Гц.

На високих частотах звуковий опір головки гучномовця збільшується внаслідок збільшення опору звукової котушки, який має індуктивний характер.

Конічну діафрагму можна розглядати як жорсткий поршень, усі точки якого здійснюють синфазні гармонічні коливання тільки до певної критичної частоти. Вище цієї частоти в діафрагмі збуджуються згинальні коливання. Амплітуда та фаза цих коливань в різних точках діафрагми різні. Це приводить до зменшення ефективної поверхні випромінювача, а отже, й потужності, що випромінюється.

Для підвищення ефективності випромінювання на низьких частотах потрібно застосувати особливе акустичне оформлення головок [6]. Основними з них є відкриті та закриті ящики.

Відкриті ящики еквівалентні плоским екранам, розміри яких забезпечують потрібну різницю ходу для прямого та зворотного випромінювання. Такі ящики ефективні тільки в області частот, для яких різниця ходу дорівнює або більша $\frac{\lambda}{2}$. Це обмежує можливість відкритих ящиків для високоякісних звуковідтворювальних пристроїв.

Закриті ящики повністю усувають взаємодію прямого та зворотного випромінювання. Але в цьому випадку виникає замкнутий повітряний об'єм, пружність якого, підсумовуючись з пружністю рухомої системи, підвищує частоту її резонансу.

Якщо не враховувати область частот, близьких до резонансної, то к.к.д. конусного гучномовця можна вважати постійним в діапазоні робочих частот. Значення к.к.д. порівняно невелике. Воно залежить від індукції магнітного поля та від електричних й механічних втрат. У сучасних конусних гучномовцях к.к.д. не перевищує 1–2 %.

Навіть у високоякісних конусних гучномовцях нерівномірність частотної характеристики звукового тиску досягає 8–10 дБ, а у гучномовцях, що використовуються для масової апаратури, 14–15 дБ. Для зменшення цієї нерівномірності застосовують демпфірування пружних коливань діафрагми, подавлення резонансу коміра за допомогою просочування, обробки стінок ящика звукопоглинальним матеріалом і т. ін.

Для покращення характеристик в області низьких частот також використовують фазоінвертори. Фазоінвертор (рис. 5.6, а) – це закритий ящик з двома отворами на передній панелі. У верхньому отворі закріплена головка гучномовця, рухома система якої має масу m_1 , гнучкість c_1 та активний опір втрат, включаючи опір випромінювання r_1 . До нижнього отвору прикріплена невелика труба, в якій коливається маса повітря m_2 . Ця маса пов'язана з рухомою системою через гнучкість c_0 , яка визначається гнучкістю повітря у середині ящика. Коливання повітря в трубі призводять до випромінювання звуку з отвору фазоінвертора. Опір випромінювання цього отвору дорівнює r_2 . Якщо площі обох отворів однакові, то схема електричного аналога механічної системи фазоінвертора приймає вигляд показаний на рис. 5.6, б).

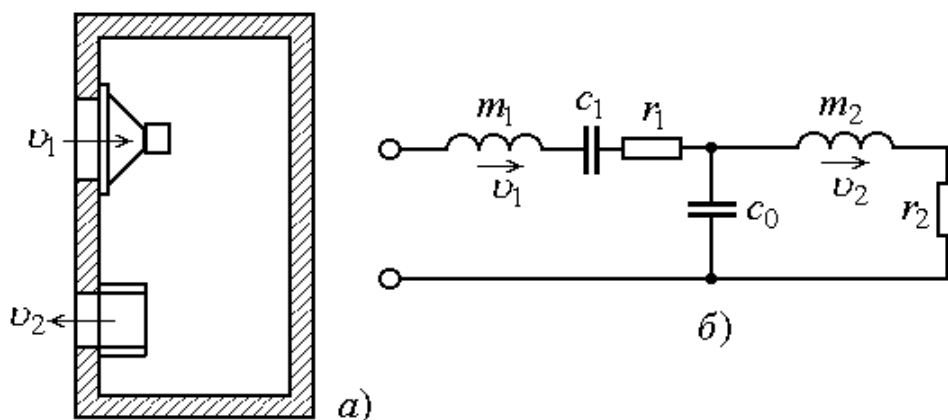


Рисунок 5.6 – Гучномовець з фазоінвертором

Напрямок швидкостей рухомої системи та маси m_2 показані відповідно стрілкою v_1 та v_2 . Маса m_2 та гнучкість c_0 утворюють коливальну систему, резонансна частота якої повинна бути рівною або трохи нижчою за ω_0 . На частотах вище резонансу провідність контуру $m_2 - c_0$ визначається гнучкістю. Тому струм через c_0 практично збігається за фазою з v_1 . Це означає, що на частотах вище резонансу фазоінвертора, v_1 та v_2 протилежні за фазою, завдяки чому випромінювання передньої поверхні діафрагми головки гучномовця та отвору фазоінвертора синфазні, й чутливість гучномовця збільшується.

Різко виражений резонанс на низьких частотах призводить до помітного погіршення якості звуку внаслідок спотворень перехідних процесів. Для боротьби з цим явищем використовують різні методи демпфірування – підімкнення гучномовця до підсилювача з малим вихідним опором, заповнення ящика звукопоглинальним матеріалом, демпфірування акустичної системи за допомогою панелі акустичного опору, що встановлюється в отворі ящика фазоінвертора і т. д.

Для покращення характеристик в області верхніх частот застосовуються різні методи. Так, наприклад, для зменшення впливу індуктивності звукової котушки в деяких конструкціях вітчизняних та імпортованих головок використовується короткозамкнутий виток у вигляді кільця або ковпачка, одягненого на kern. Частіше застосовується додатковий випромінювач високих частот у вигляді жорсткого конуса порівняно невеликих розмірів, прикріпленого до каркаса звукової котушки.

Для забезпечення високої якості звуку нелінійні спотворення гучномовця мають бути малими. Великі спотворення можуть виникати в основному на низьких частотах, де амплітуда коливань рухомої системи велика. Причин нелінійних спотворень декілька. По-перше, важко забезпечити однорідне магнітне поле по висоті зазору. Зміна індукції призводить до зміни коефіцієнта електромеханічного зв'язку при пересуванні котушки, і, отже, до нелінійності електромеханічного перетворення. По-друге, при великих амплітудах зсуву змінюється гнучкість підвіски. Вказані вище нелінійності призводять до появи додаткових гармонічних складових.

Сила, що діє на діафрагму, завжди має складову, спрямовану вздовж твірної. Це приводить до періодичної зміни параметрів діафрагми. Якщо сила, що діє, перевищує певне значення, то діафрагма втрачає стійкість, починає прогинатись, тобто в ній збуджуються коливання. Таке параметричне збудження коливань призводить до того, що частоти поперечних коливань діафрагми кратні половині частоти коливань звукової котушки. Поява такого типу нелінійних спотворень особливо помітна на слух. Для усунення таких спотворень конус виконують з криволінійною твірною.

Для озвучення відкритих просторів, а також у випадках, коли бажано мати випромінювачі з підвищеною ефективністю, широко застосовують рупорні гучномовці. На відміну від конусних гучномовців у рупорних зв'язок коливальної діафрагми з повітряним середовищем здійснюється за допомогою рупора. Частіше всього використовують експоненціальні рупори, в яких площа поперечного перерізу збільшується за експоненціальним законом. На досить високих частотах вхідний опір такого рупора постійний й дорівнює добутку площі його вхідного отвору (горла) на хвильовий опір повітря Z_A . При цьому в рупорі збуджуються плоскі звукові хвилі. Постійний активний опір навантаження забезпечує високу ефективність випромінювання. З пониженням частоти звука до критичної, закони коливання повітря в рупорі змінюються. Повітря в горлі рупора починає коливатись синфазно, як одне ціле, вхідний опір рупора стає реактивним. Очевидно, що при цьому різко спадає звукова енергія, яка випромінюється рупором.

В сучасних рупорних гучномовцях критична частота приблизно дорівнює 100 Гц. Конструкція такого гучномовця схематично показана на рис. 5.7. Гучномовець складається з двох основних частин: конусної головки 1 та рупора 2. Діаметр горла рупора приблизно дорівнює діаметру діафрагми. Тому рупорні гучномовці такого типу називаються широкогорлими.

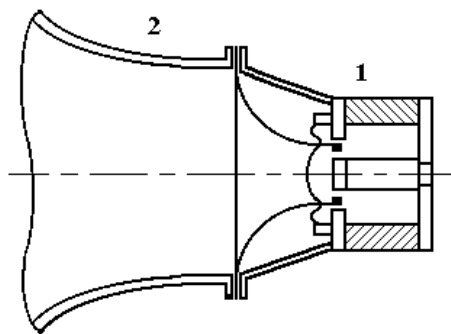


Рисунок 5.7 – Конструкція широкогорлого рупорного гучномовця

Діаметр вихідного отвору буває не менше однієї третини довжини хвилі на нижній робочій частоті, при цьому забезпечується достатня постійність діаграми спрямованості в робочому діапазоні частот. Очевидно, що чим нижча гранична частота, тим більші мають бути розміри рупора.

Верхня гранична частота визначається насамперед властивостями головки. Крім того, у рупорних гучномовцях на високих частотах різко підвищується спрямованість випромінювання. Тому у вуличних рупорних гучномовцях верхня гранична частота не перевищує 5–6 кГц. К.к.д. широкогорлих рупорних гучномовців більший ніж у конусних тієї ж потужності.

Суттєвим недоліком рупорних гучномовців значної потужності є порівняно великі нелінійні спотворення. Це пояснюється тим, що амплітуда звукового тиску в горлі рупора досягає 100 Па та більше. При таких тисках виявляються нелінійні властивості повітряного середовища.

Електростатичні гучномовці за своєю конструкцією нагадують конденсаторний мікрофон. Вони також складаються з двох основних частин – нерухомого механічного електрода та коливальної мембрани. Мембрану виготовляють з тонкої полімерної плівки, на зовнішню поверхню якої нанесений тонкий шар металу (золото, срібло і т. ін.). Між електродами прикладається напруга U_0 поляризації, яка становить декілька сотень вольт. Щоб викликати коливання рухомого електрода, необхідно додатково прикласти змінну напругу. Для вилучення можливого виникнення помітних нелінійних спотворень необхідно обмежити амплітуду змінної напруги величиною, в 5–10 разів меншою напруги U_0 . Додаткове зменшення нелінійних спотворень може бути досягнуто шляхом використання диференціальної конструкції, в якій металізована плівка закріплюється між двома акустично прозорими нерухомими електродами (сітками).

Електростатичні гучномовці застосовують в основному як випромінювачі високих частот. Застосування їх в області низьких частот пов'язано з великими труднощами, тому що чим нижча частота, тим більша, при незмінній амплітуді коливальної швидкості, повинна бути амплітуда мембрани, що коливається. Для зменшення нелінійних спотворень потрібно було б збільшити зазор між електродами, а отже, збільшити й без того велику напругу U_0 поляризації.

Однією з переваг електростатичних гучномовців є можливість реалізації поверхні випромінювання довільної форми зі стабільною характеристикою спрямованості на високих частотах. Відомі гучномовці з електродами у вигляді сегмента, циліндра і т. д.

Необхідність формування в джерелі живлення напруги поляризації ускладнює використання електростатичних гучномовців, тому вони не набули широкого використання.

Для високоякісних звуковідтворювальних установок широко застосовують акустичні системи. Вони являють собою поєднання двох або більше випромінювачів, кожен з яких відтворює певну частину спектра. Акустичні системи застосовуються в кінотеатральній апаратурі, для контрольного прослуховування в радіобудинках та телевізійних центрах. Менш складні системи застосовують у високоякісній побутовій апаратурі.

Як низькочастотні випромінювачі використовують конусні електродинамічні гучномовці великого діаметра. Для відтворення високих частот використовують гучномовці різних типів – невеликі конусні гучномовці, електростатичні гучномовці. У випадку трисмугових акустичних систем для середньочастотної ланки звичайно використовують конусні гучномовці.

Для попередження спотворень за рахунок взаємної модуляції низькочастотних та високочастотних компонентів, а також для захисту високо-частотних головок від перевантаження застосовують роздільні фільтри. Приклади таких фільтрів наведені на рис. 5.8. У випадку акустичних систем

високої потужності фільтри встановлюються на вході підсилювачів низько-частотного та високочастотного каналів. В решті систем фільтри вмикають між виходом підсилювача та відповідними головками. На частоті поділу фільтри мають вносити послаблення на 3 дБ. Частота поділу дволанкових систем лежить в області 500–2000 Гц. В триланкових акустичних системах частота поділу для високочастотної ланки лежить в діапазоні 5–9 кГц.

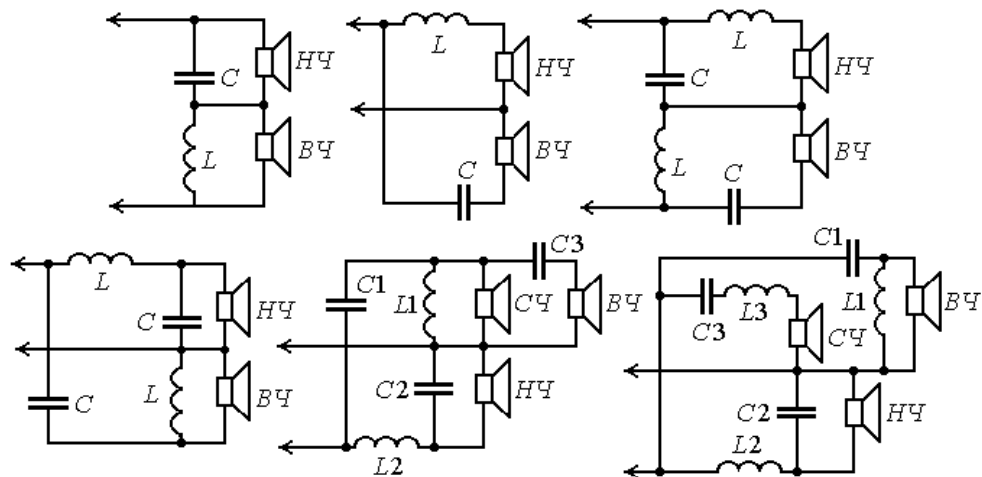


Рисунок 5.8 – Схеми роздільних фільтрів

Акустичне оформлення систем може бути різним. Низькочастотна ланка може бути виконана в закритому ящику, в ящику з фазоінвертором. Середньочастотна та високочастотна ланки мають незалежне акустичне оформлення для видалення взаємного впливу випромінювачів. Всі ланки системи об'єднують в одній конструкції таким чином, щоб різниця ходу звукових хвиль біля частот поділу у осьовому напрямку була мінімальна. Інакше можливі великі інтерференційні спотворення.

У випадку стереофонічних звуковідтворювальних систем до них мають ставитись більш жорсткі вимоги. По-перше, бажано щоб системи відтворювали весь діапазон частот, якого можна досягти при застосуванні сучасних методів стереофонічного звукозапису та радіомовлення. По-друге, системи мають мати можливо більш близькі амплітудно-частотні та фазочастотні характеристики. По-третє, характеристики спрямованості систем мають бути стабільні в досить широкому діапазоні частот.

Недоліком систем, що існують для стереофонічного звуковідтворення, є симетрична характеристика спрямованості. Якщо розташувати звичайним чином такі системи на відстані 2–3 м одна від одної можна досягти стереоефекту тільки в дуже обмеженій зоні, яка лежить посередині випромінювачів. Для розширення зони стереоефекту запропоновані системи з акустичними лінзами, завдяки яким створюється несиметрична характеристика спрямованості. Це дозволяє компенсувати запізнення звуку від віддаленого випромінювача збільшенням його рівня.

Для озвучення відкритих просторів та великих приміщень широке застосування знаходять випромінювачі зі спеціальними характеристиками спрямованості. Ці характеристики забезпечуються відповідним розташуванням групи випромінювачів. Найбільш широке застосування набули випромінювачі типу «звукова колонка». Такий випромінювач – це одна або декілька ланок однотипних конусних головок, змонтованих в загальному кожусі. Головки встановлені у безпосередній близькості одна від одної й працюють синфазно. Розміри колонки вздовж ланки (по висоті) набагато більші, ніж в поперечному напрямку (по ширині). Тому характеристики спрямованості звукової колонки у вертикальній площині набагато гостріші, ніж у горизонтальній. Якщо головки розташовані в один ряд, то характеристика спрямованості звукової колонки в горизонтальній площині збігається з характеристикою спрямованості окремої головки з відповідним оформленням.

Найбільш поширені звукові колонки з акустичним оформленням у вигляді закритого ящика. Зустрічаються колонки типу «відкритий ящик», фазоінвертор, з двобічними випромінювачами та косинусоїдальною характеристикою спрямованості, однобічними випромінювачами й кардіоїдною характеристикою спрямованості та ін. Потужність звукових колонок залежно від призначення складає 2–400 Вт. Колонки випускаються як для закритих приміщень, так й для роботи на відкритому просторі. Широке застосування звукових колонок пояснюється тим, що їх характеристики спрямованості дозволяють сконцентрувати випромінювання на поверхні, яку потрібно озвучити.

В деяких випадках для озвучення відкритих просторів та закритих приміщень застосовують радіальні гучномовці. В загальному кожусі по колу розміщені чотири конусних головки. Оскільки осі головок розвернуті в різні сторони, то в цілому гучномовець має кругову характеристику спрямованості в горизонтальній площині.

Контрольні питання

1. Дайте означення електромеханічного перетворювача.
2. Які аналогії існують між механічними системами та електричними системами?
3. На яких фізичних явищах основана робота мікрофонів? Які за принципом дії мікрофони вам відомі?
4. Назвіть основні параметри та характеристики мікрофонів.

5. Чим мікрофон-приймач тиску відрізняється від мікрофона-приймача градієнта тиску?
6. З якими діаграмами спрямованості виробляють мікрофони?
7. Поясніть конструкцію електродинамічного та стрічкового мікрофонів.
8. Поясніть конструкцію конденсаторного мікрофона.
9. Назвіть основні параметри та характеристики гучномовців.
10. Поясніть конструкцію конусної головки гучномовця.
11. Які способи акустичного оформлення головок гучномовців поширені у звукотехніці?
12. Чому зростає віддача системи з фазоінвертором на низьких частотах?
13. Яким чином зменшується спотворення звуку в гучномовцях?
14. Поясніть конструкцію рупорного гучномовця, які його переваги та недоліки?
15. Яка конструкція електростатичного гучномовця? На яких частотах він використовується й чому?
16. Для чого в акустичних системах використовують роздільні фільтри?
17. Як визначаються частоти поділу в роздільних фільтрах?
18. Що таке звукова колонка? В яких випадках її застосовують?
19. Що таке радіальні гучномовці? Яку вони мають діаграму спрямованості?

6 ЗАПИС ЗВУКУ

Історично першим був механічний запис звуку (фонограф Едісона 1876 р.). На сьогоднішній день введено та стандартизовано кілька типів механічного грамофонного запису широкого користування. Звичайний запис зі швидкістю обертання платівки 78 об/хв, з пониженою швидкістю обертання 45 об/хв, та довгограючий запис – 33 об/хв, і як її різновид стереофонічний довгограючий запис.

Трохи пізніше з'явився магнітний запис звуку на металевий дріт (Паульсен 1899 р.). Магнітний запис увійшов в практику не відразу. Перші апарати запису на магнітні носії (дріт, металеві диски та стрічки) мали дуже погані характеристики через нелінійний процес намагнічування.

Значний стрибок при запису було отримано завдяки використанню попереднього постійного зміщення початкової точки, від якої здійснюється намагнічування матеріалу при запису. Ще більш вдалим виявився прийом, при якому до сигналу, що записується, додається високочастотне магнітне поле. У сучасному вигляді магнітний запис з'явився лише у 30-х роках минулого століття. З тих пір він отримав широке поширення у найрізноманітніших областях техніки. [7].

Ще пізніше з'явився цифровий запис на оптичні та напівпровідникові носії. Оптичний цифровий запис став одним із перших способів відтворення звуку.

Загальним для всіх видів запису є те, що при запису біля записувального пристрою рівномірно рухається стрічка або диск на якому записувальний пристрій залишає слід – фонограму. Фонограма може бути або у вигляді прорізаної звивистої або змінної по глибині канавки (механічний запис), у вигляді залишкового намагнічування носія (магнітний запис), у вигляді послідовності засвічених точок (цифровий оптичний запис), або у послідовності переключених комірок пам'яті (запис на напівпровідникові носії).

6.1 Механічний запис звуку

Механічний запис полягає у тому, що різець, який йде по носію для запису, може коливатися в площині носія поперек напрямку його руху, залишаючи за собою звивисту борозну, це так званий поперечний запис, або коливатися перпендикулярно до площини носія, залишаючи борозну з впадинами та пагорбами – це так званий глибинний запис (рис. 6.1). Глибинний запис був використаний у фонографі, поперечний запропонований Бер-Лінеровим у 1887 р. й названий ним грамофонним записом. З часом грамофонний запис повністю витіснив глибинний. Глибинний запис використовувався на початку 20-го сторіччя фірмою Пате, апарати цієї фірми отримали назву «Патефон». Надалі вони повністю вийшли з ужитку. В останній час для отримання двоканальних стереофонічних записів знову стали використовувати глибинний запис в комбінації з поперечним, для запису на одній борозні двох незалежних сигналів.

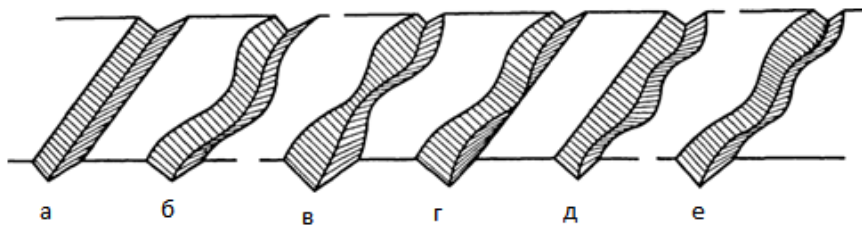


Рисунок 6.1 – Види модуляції борозни
 а – немодульована борозна (пауза), б – поперечний запис,
 в – глибинний запис, г – запис на лівій стороні борозни,
 д – запис на правій стороні борозни,
 е – стереофонічний двоканальний запис на обох сторонах борозни

З 1925 року у механічному запису почали використовувати електро-акустичні знімачі запису – адаптери. В адаптері голка, що йде по борозні, зв’язана з рухомою частиною електромеханічного перетворювача-генератора, й отримана напруга на електричному виході адаптера через підсилювач йде на гучномовець. Стандартизується глибина, ширина та профіль борозни, розміри диска платівки, кількість доріжок на 1 мм радіуса платівки та розміри кінчика голки, що йде по борозні. Крім стандартизації цих чисто геометричних характеристик, встановлюється також певна залежність між амплітудою відхилення борозни від середнього положення та частотою при подачі на рекордер синусоїдального сигналу з постійною амплітудою напруги. Ця залежність, що називається частотною характеристикою запису, повинна забезпечувати при програванні звуку, записаного при постійній амплітуді напруги на рекордері, таку ж постійну амплітуду напруги на виході адаптера.

На високих частотах характеристика запису має підйом, який дозволяє підняти рівень запису програми над рівнем шуму неідеального матеріалу носія. Для зменшення занадто великої амплітуди запису в області низьких частот характеристика спадає з пониженням частоти. Характеристика відтворення в адаптері й тон-корекція амплітудно-частотної характеристики підсилювача відтворення мають зворотній, спадний на високих частотах хід. На рис. 6.2 наведені характеристики запису та відтворення сучасного грамзапису.

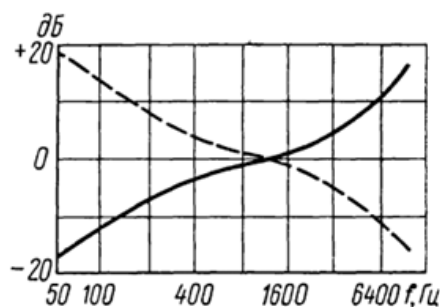


Рисунок 6.2 – Характеристики запису (суцільна лінія)
 та відтворення (пунктир)

Рекордери механічного запису можуть бути електромагнітні, електродинамічні та п'єзоелектричні. Вдалою конструкцією є електромагнітний рекордер (рис. 6.3).

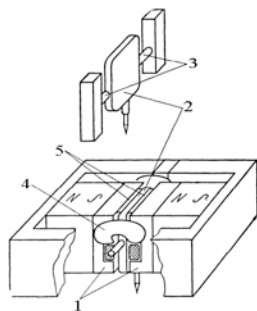


Рисунок 6.3 – Електромагнітний рекордер:

- 1 – П-подібні наконечники магніту; 2 – ярів з різцем;
3 – пружні торсіонні осі; 4 – обмотки; 5 – демпферні прокладки

Феромагнітний ярів з магнітом'якого матеріалу може повертатись навколо торсіонної осі із жорстко закріпленим з ним різцем. Ярів розміщують між парою П-подібних наконечників сильного постійного магніту охопленого обмоткою, через яку пропускають струм сигналу, що записується.

Звукознімачі або як їх називають адаптери, для відтворення грамофонного запису можуть бути електродинамічного, електромагнітного та п'єзоелектричного типу. Принцип дії будь-якого адаптера у тому, що його рухома частина системи приводиться в коливання прикріпленою до неї голкою, що йде по борозні. В результаті коливань рухомої системи виникає електрорушійна сила, яка далі підводиться до входу підсилювача.

Адаптер встановлюється на коромислі, яке майже повністю врівноважене, так що голка адаптера лише злегка дотикається до країв борозни (що зменшує зношення платівки). Коромисло може обертатись в горизонтальній площині над платівкою, що встановлюється на обертовий диск. Рівномірне обертання диска здійснюється електродвигуном. Вся система добре захищена від вібрацій. Для запобігання нестабільності частот відтворюваних звуків (детонації) та появи паразитної частотної модуляції швидкість обертання підтримується з великою точністю постійно. Двигун, диск, коромисло, адаптер складають програвач грамплатівок (рис. 6.4).

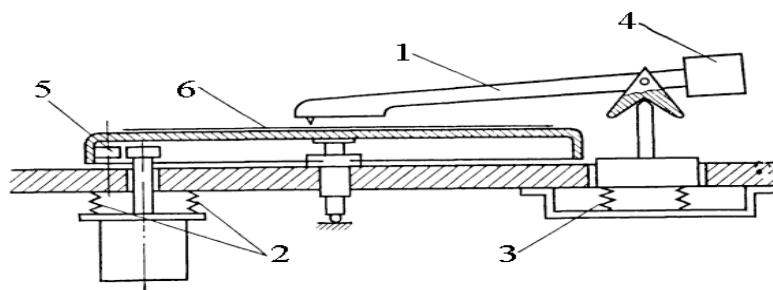


Рисунок 6.4 – Програвач грамплатівок

- 1 – коромисло з адаптером, 2 – амортизація двигуна, 3 – амортизація колонки адаптера, 4 – противага, 5 – резиновий сателіт, 6 – масивний диск

Сучасні програвачі використовують переважно п'єзоелектричні адаптери. Такі адаптери мають мінімальну масу при великій чутливості та хороших амплітудно-частотних характеристиках [7].

6.2 Магнітний запис звука

Апарати магнітного запису та відтворення звукових сигналів по суті не мають в своїх колах специфічних електроакустичних перетворювачів. Тільки на початку й в кінці запису-відтворення ввімкнені мікрофон та гучномовець. Більше того, сучасна техніка магнітного запису та дослідження динамічних процесів намагнічування носія звуку та процесів індукування магнітним потоком сигналу в пристроях відтворення розвинулась у самостійну галузь техніки. Запис звукових сигналів складає тільки частину застосувань сучасного магнітного запису. Більш детальноше викладення цих аспектів магнітного запису недоцільне. Але коротке знайомство з ним для спеціаліста звукотехніка буде корисним.

Для магнітного запису звуку на сьогоднішній день застосовується стрічка з пластику на целюлозній або іншій полімерній основі, на яку у вигляді емульсії наноситься тонким шаром або замішується в матеріал стрічки феромагнітний порошок із однорідних та малих за розміром гострих зерен. Це, як правило, зерна окисла заліза γFe_2O_3 або магнетика Fe_3O_4 . Феромагнітний порошок має бути магнітно-твердим для стабільного утримання залишкового намагнічування.

Магнітна стрічка стандартизується за розміром. Найбільш поширена стандартна стрічка шириною 6 мм. Товщина шару емульсії або самої стрічки має важливе значення, оскільки визначає максимальну глибину, на якій може здійснюватися намагнічування при сигналах більшої амплітуди. Нерівномірність стрічки (або полива емульсії) за товщиною має бути малою. І нарешті, стрічка повинна витримувати значне навантаження без помітних деформацій.

При запису та відтворенні стрічка рівномірно протягається біля полюсів невеликого феромагнітного осердя із обмоткою, головки запису або відтворення. Застосовується, в основному, головка із тороїдальним осердем із обмоткою та вузькою щілиною, заповненою немагнітним матеріалом (рис. 6.5). Коли по обмотці головки пропускають електричний струм, біля полюсів осердя, утворених краями кола, утворюється вузька область магнітного поля розсіювання. Характер цього поля ілюструється на рис. 6.5.

Магнітний носій, ковзаючи по поверхні полюсів головки, проходить через поле розсіювання, в результаті чого зерна феромагнітного матеріалу намагнічуються. Для запису високих частот область, яка займає поле розсіювання, повинна бути дуже вузькою. Корисною компонентою поля розсіювання є H_x – напруженість поля, паралельна руху стрічки. В ідеалі всі зерна феромагнітної суміші мають бути орієнтовані своєю довжиною в

напрямку руху стрічки. Напрямок стрічки гострого зерна – це напрямок, в якому й діє компонента H_x .

Матеріал головки має бути магнітно-м'який та з можливо більшою індукцією насичення. При цьому й магнітна проникність повинна бути значною, з метою зменшити область корисного поля навколо зазору. В ярмі головки не мають також розвиватись значні вихрові струми впритул до ультразвукових частот, оскільки при запису на поле сигналу накладається ультразвукове поле зміщення. Ярмо головки складають із тонких пластин. Крім феромагнітних металевих сплавів, для головок використовуються також феритові матеріали. Але у феритів важко отримати гладку поліровану поверхню, необхідну в області навколо зазору, де по головці ковзає магнітний носій. Прокладка зазору має бути такої ж твердості, що й матеріал ярма, щоб зазор при довгій експлуатації не затирався та не забивався частинами матеріалу ярма чи плівки.

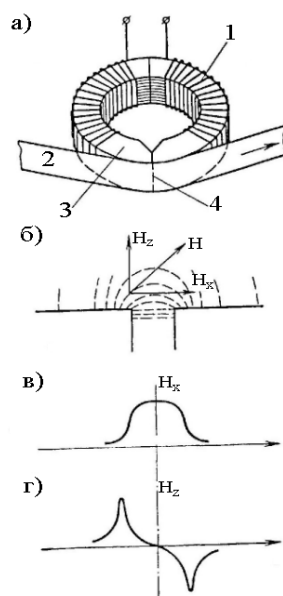


Рисунок 6.5. – Тороїдальна головка магнітного запису

a – загальний вигляд:

1 – обмотка, 2 – стрічка, 3 – сердечник, 4 – робочий зазор,

б – характер поля навколо робочого зазору,

в – повздовжня компонента поля, *г* – нормальна компонента поля

До головки відтворення висуваються особливо високі вимоги до магнітної проникності та ширини зазору. У високоякісних апаратах ширина зазору відтворювальної головки не більша 1 мкм.

Магнітофони бувають професійними та побутовими. Побутові магнітофони поділяються на кілька груп складності залежно від основних параметрів та виконуваних функцій. Проте усі магнітофони мають спільні функціональні вузли, що дозволяє сформувати їх узагальнену структурну

схему (рис. 6.6). Вхідні записувані сигнали надходять на підсилювач запису (ПЗ) або з мікрофона через мікрофонний підсилювач (МП), або з лінії через регульований підсилювач (РП). Підсилювач запису навантажений на головку запису (ГЗ) й є підсилювачем струму.

Підсилювач запису створює в обмотці ГЗ струм, пропорційний вхідному сигналу. Одночасно в ГЗ подається високочастотне коливання, яке називають високочастотним підмагнічуванням (ВЧП), це покращує характеристики процесу запису. Для створення ВЧП служить спеціальний генератор високої частоти (ГВЧ).

Струм, проходячи по обмотці ГЗ, збуджує в її осерді магнітний потік, який через розсіяння в районі робочого зазору (РЗ) виходить за межі його поверхні.

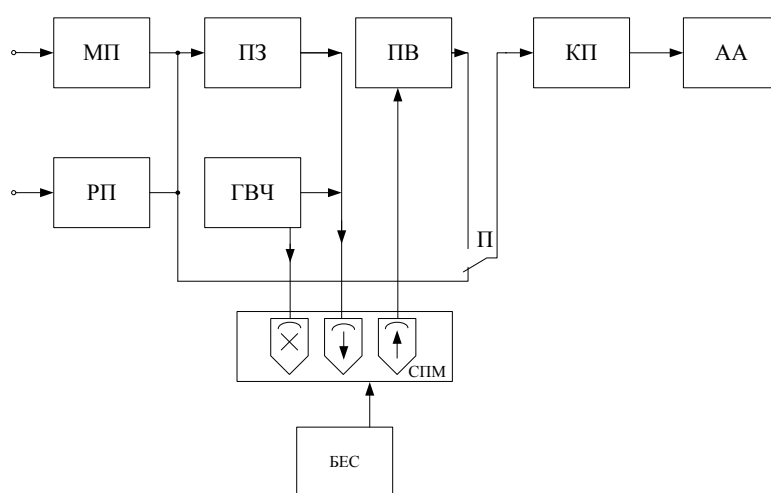


Рисунок 6.6 – Структурна схема магнітофона

Біля РЗ переміщається магнітна стрічка (МС), яка намагнічується полем розсіювання ГЗ. Таким чином, в процесі запису зміни вхідного сигналу в часі перетворюються в зміни намагніченості робочого шару МС по її довжині. У результаті створюється залишковий магнітний потік носія $\Phi_r(x)$. Координата x вздовж напрямку запису пов'язана з поточним часом t співвідношенням $x = v_3 t$, де v_3 – швидкість запису, а довжина хвилі записаного гармонічного коливання пов'язана з частотою сигналу f співвідношенням $\lambda = v_3 / f$. Кількісно корисний ефект запису оцінюється рівнем запису, визначеним магнітним потоком в осерді відтворювальної головки, що знаходиться в тісному контакті з поверхнею носія й має нульовий магнітний опір. Рівень запису виражається в одиницях залишкового магнітного потоку на 1 м ширини доріжки запису, що дозволяє задавати його незалежно від ширини доріжки. Для забезпечення обміну фонограмами рівень запису нормують.

При відтворенні МС транспортується з тією ж, що й при записі, швидкістю близько робочого зазору головки відтворення (ГВ). При цьому частина залишкового магнітного потоку носія проникає в осердя ГВ та наводить електричну напругу в її обмотці. Форма напруги однозначно відповідає записаному сигналу й після підсилення та корекції в підсилювачі відтворення (ПВ) та потужному кінцевому підсилювачі (КП) подається на акустичний агрегат (АА). Перемикач (П) для цього має знаходитися в верхньому положенні.

Носій має бути підготовлений для запису, тобто з нього необхідно видалити раніше записані сигнали. Процес видалення або стирання раніше зроблених записів здійснюється за допомогою головки стирання (ГС). Живиться ГС також від ГВЧ, який працює тільки в режимі запису та вмикається, й вимикається одночасно з ПЗ.

У професійних та високоякісних побутових магнітофонах канали запису та відтворення в процесі запису працюють спільно й утворюють наскрізний канал. При цьому якість запису можна контролювати безпосередньо в процесі його виконання й при необхідності змінювати режими. Перемикач дозволяє зіставляти сигнали на вході та виході магнітофона й визначати його спотворення в процесі запису.

У побутових магнітофонах функції ГЗ та ГВ часто виконує одна універсальна магнітна головка (УГ). У цьому випадку організація наскрізного каналу неможлива, оскільки УГ перемикається або тільки на запис, або тільки на відтворення.

Транспортування носія запису здійснює рушійний механізм, який називається стрічкопротягувальним (СПМ). До стабільності швидкості переміщення стрічки в СПМ висуваються високі вимоги. Тому в магнітофонах, особливо студійних, застосовують спеціальні вузли, що стабілізують швидкість. На рис. 6.6 це блок електронної стабілізації (БЕС). Крім режимів запису та відтворення, магнітофон має режими прискореного перемотування стрічки вперед та назад, які використовуються для відшукування необхідних ділянок фонограми та для намотування стрічки на котушку після закінчення запису або відтворення.

У сучасних магнітофонах на одній стрічці кілька доріжок запису, тобто практично всі магнітофони багатодоріжкові. Крім зазначених блоків, магнітофони оснащують вимірювачами рівня запису, пристроями зменшення шуму, блоками автоматики, живлення, дистанційного керування, лічильником стрічки та ін.

Контрольні питання

1. Які основні методи запису звуку?
2. У чому полягає принцип механічного звукозапису?
3. Будова програвача грамплатівок.
4. Процес магнітного запису звуку.
5. Структурна схема магнітофона.

7 ОБРОБКА ЗВУКУ В РАДІОМОВЛЕННІ ТА ЗВУКОТЕХНІЦІ

7.1 Загальні положення

При формуванні звукових програм сигнали від мікрофонів та інших джерел багаторазово перетворюються: їх підсилюють або послаблюють, тобто змінюють рівень, регулюють динамічний діапазон D , змінюють спектр та часову структуру, змішують з іншими сигналами, зміщують за частотою, перетворюють з аналогової форми в дискретну й назад, зменшують чи збільшують тривалість звучання [1,2]. Ці зміни роблять з метою:

- розв'язання художніх, творчих задач;
- узгодження параметрів сигналу з властивостями електричних каналів та трактів;
- узгодження параметрів сигналу з умовами відтворення звуку слухачами.

Перетворення сигналів здійснюють за допомогою пристроїв, керованих вручну й автоматично: регуляторів рівня й АЧХ (gain-frequency characteristic), ліній затримки, ревербераторів, пристроїв звукових ефектів.

Відомо, що в теорії зв'язку прийнято зображати сигнал у вигляді тривимірної об'ємної фігури (рис. 7.1). По одній осі відкладаються зміни рівня сигналу $N_{\min} \dots N_{\max}$ (звукового тиску, напруги), що визначає його динамічний діапазон D , по другій – ширину частотного спектра сигналу $\Delta F = F_{\max} - F_{\min}$, по третій – тривалість звучання $\Delta t = t_2 - t_1$.

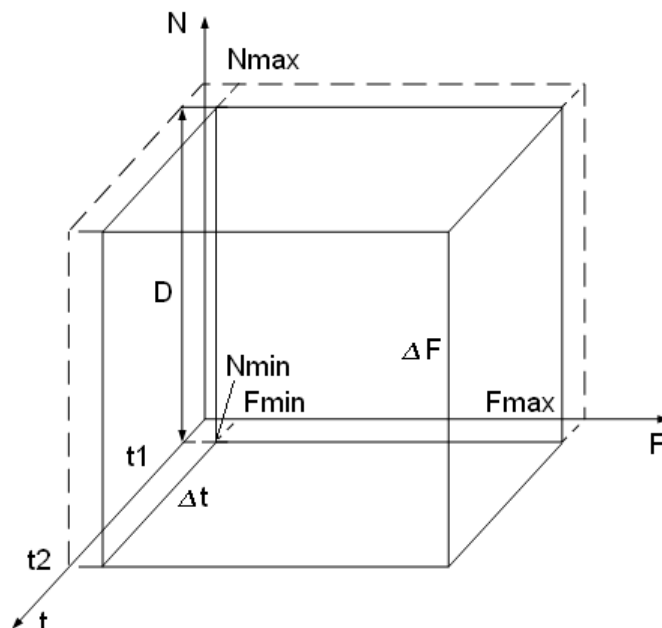


Рисунок 7.1 – Умовне зображення об'ємного сигналу

Тоді об'єм сигналу

$$V = D \cdot \Delta F \cdot \Delta t.$$

Таке зображення відноситься й до звукового сигналу, що використовується в радіомовленні та звукотехніці. Різниця в тому, що його об'єм, як мінімум, на три порядки перевищує об'єм мовного сигналу телефонного зв'язку. Така велика різниця пояснюється тим, що в телефоні передається лише смислова або семантична інформація, в радіомовленні та звукотехніці увага ще приділяється збереженню художньої, естетичної інформації. Кількісне розходження об'ємів інформації спричиняє інші якісні рішення в перетворенні мовних сигналів, інші вимоги до параметрів каналів передавання. Перетворення сигналу ведуть по усіх трьох осях об'ємного зображення (рис. 7.1): змінюють рівні та динамічний діапазон, спектр й часову структуру.

Рівні сигналів від різних джерел регулюють, щоб створити бажане співвідношення гучностей різних оркестрових груп, музичних інструментів, співаків, отримати в приміщенні слухача задумане розташування уявних джерел звуку. Одночасно вирішують й технічну задачу: весь діапазон рівнів має бути в межах, установлених нормами. Мінімальні рівні звукового сигналу мають бути на 10–20 дБ вищі рівня завад каналу. Максимальні не мають перевищувати значення, при якому неприпустимо зростають нелінійні спотворення, починається, наприклад, перемодуляція передавачів.

Зменшення рівня завад в каналах та трактах потребує застосовування спеціальних технічних заходів: поліпшувати фільтрацію напруг живлення; використовувати електронні активні елементи з малим рівнем власних шумів; збільшувати кількість рівнів квантування в цифрових перетворювачах; екранувати блоки та вузли апаратури і т. д.

Для зменшення нелінійних спотворень необхідно збільшувати приблизно на 6 дБ запас за потужністю підсилювальних та радіопередавальних пристроїв, вводити ланки, що компенсують нелінійні спотворення, застосовувати обмежувачі. В цифрових пристроях варто збільшувати кількість розрядів в кодовому слові відліку звукового сигналу, тобто вводити запас за рівнями квантування. Це дозволяє без спотворень передавати короткочасні піки сигналу, але може викликати перевантаження цифро-аналогових перетворювачів і, отже, створити помітні нелінійні спотворення. Усі перераховані заходи технічно здійсненні, але збільшують вартість апаратури.

Перераховані обставини приводять до необхідності зменшувати динамічний діапазон D мовних сигналів, хоча це погіршує художню якість сформованих програм. Через відносно високий рівень перехресних завад в трактах первинного розподілу програм (ТПРП) приходиться вживати заходів до подальшого зменшення D сигналу на вході міжміського каналу радіомовлення (МКРМ) ТПРП, а потім розширення на його виході.

Деякі обмеження на діапазон звукових сигналів накладають умови домашнього прослуховування. Мінімальні рівні сигналу $N_{c.min}$ мають перевищувати рівень акустичних шумів $N_{Ш}$, які проникають в житлові кімнати. Максимальні рівні сигналу $N_{c.max}$ не мають створювати відчутні завади у сусідніх квартирах. Якщо прийняти рівень акустичних шумів в житловому приміщенні $N_{Ш} = 40$ дБ, мінімальний рівень сигналу (signal strength) $N_{c.min} = 50$ дБ, а максимально припустимий $N_{c.max} = 90$ дБ, то динамічний діапазон звукового сигналу

$$D = N_{c.max} - N_{c.min} = 40 \text{ дБ.}$$

Перетворення динамічного діапазону D сигналу в тракті формування програм (ТФП), ТПРП, тракті вторинного розподілу програм (ТВРП), разом з приймачем програм (ПП) наведено на рис. 7.2. Введені такі позначення динамічних діапазонів: D_1 – початковий; D_2 – після ручного регулювання рівнів та на входах ТПРП, ТВРП; D_3 – в МКРМ.

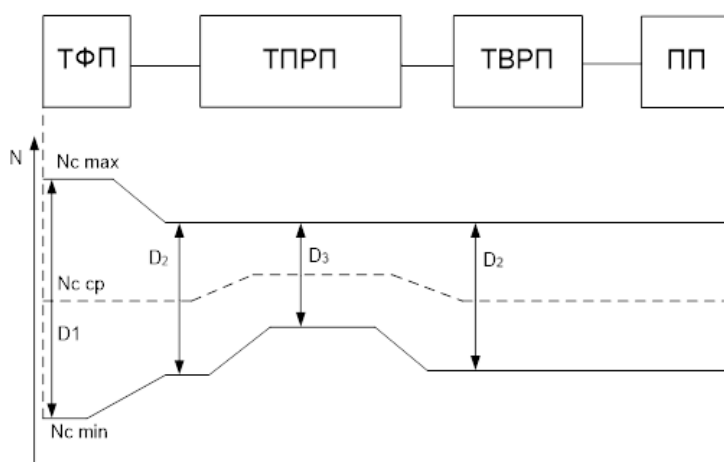


Рисунок 7.2 – Перетворення динамічного діапазону сигналу в електричному каналі радіомовлення

Зв'язок динамічного діапазону сигналу з відношенням сигнал/шум ($C/Ш$) та допусками Δ_1 та Δ_2 , встановленими з метою запобігання перемодуляції рідкими піками рівня сигналу та помітності завад при невеликих рівнях (рис. 7.3), знаходиться з формули

$$D = 201g(C/Ш) - (\Delta_1 + \Delta_2).$$

Потрібно доповнити, що при прослуховуванні програми в домашніх умовах середній рівень звукового тиску менший, ніж, наприклад, в концертному залі. Це призводить, завдяки властивостям нашого слуху, до відносної втрати гучності звуків нижніх та верхніх частот, тобто до звуження чутного спектра звуків.

Разом з перетвореннями динамічного діапазону обов'язково змінюють спектр та часову структуру мовного сигналу. За допомогою регуляторів АЧХ та фільтрів змінюють форму спектра сигналу, тим самим намагаючись підкреслити темброві особливості звучання голосів й музичних інструментів, усувають недоліки голосу виконавця або диктора, компенсують амплітудно-частотні спотворення, зменшують вплив шумів при реставрації старих фонограм.

В апаратурі та лініях зв'язку ТПРП й ТВРП обмежують частотну смугу звукового сигналу. Значення має правильний вибір співвідношення граничних частот. При неправильному виборі порушується баланс гучностей звуків нижніх та верхніх частот. В результаті може виявитися, що апаратура з більш широкою смугою частот, наприклад 100...10 000 Гц, буде гірше звучати, ніж апаратура з вузькою смугою частот, наприклад, 50...6000 Гц.

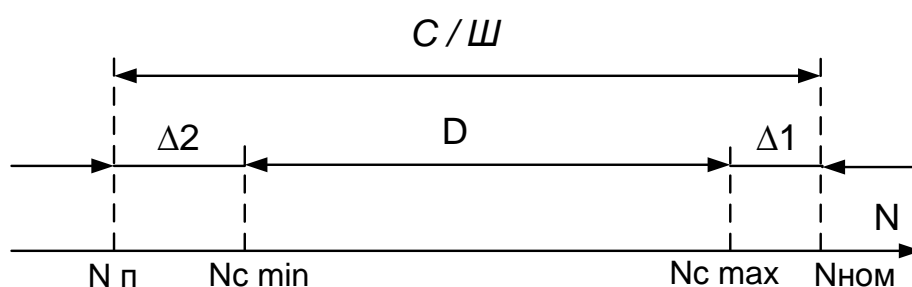


Рисунок 7.3 – Зв'язок відношення сигнал/шум та динамічного діапазону сигналу

Зміна часової послідовності сигналів створює ефекти реверберації, луни, імітує звучання в унісон, змінює тональність звучання, тривалість звучання. Часові перетворення сигналу найчастіше роблять за допомогою цифрових пристроїв.

Учені, інженери, творчі працівники продовжують пошук таких способів оброблення звукових сигналів мови та музики, при використанні яких досягається найкращий як творчий, так й технічний результати, при яких параметри сигналів найбільшою мірою відповідають властивостям електричних каналів та трактів.

7.2 Регулювання рівня мовного сигналу

Метою регулювання рівня мовного сигналу в радіомовленні та звукотехніці є:

- 1) усунути помітне зростання нелінійних спотворень;
- 2) не допустити режиму «Аварія» на радіомовних передавачах;
- 3) не допустити зростання перехідних завад в МКРМ ТПРП;
- 4) вирішення звукооператорами та звукорежисерами творчих задач під час формування мовних програм у радіомовленні, виготовлення фонограм у звукотехніці.

Регулювання рівня мовного сигналу буває ручне та автоматичне.

До способів ручного регулювання відноситься оперативне та установче. Оперативне регулювання застосовують в студійних та мовних апаратних, апаратних запису тракту ТФП в радіомовленні, студіях звукозапису. Установче регулювання проводять періодично за спеціальними випробувальними сигналами в каналі радіомовлення та в апаратурі звукових студій.

До способів автоматичного регулювання можна віднести стиснення та розширення динамічного діапазону мовного сигналу, при реалізації яких максимально зберігається форма звукового сигналу. Стиснення динамічного діапазону реалізується за допомогою компресора, а розширення – за допомогою експандера. Регулювання зазначеними способами є інерційним. Крім того, використовують регулювання миттєвої дії – це, в першу чергу, обмеження максимального рівня звукового сигналу. Обмеження мінімального рівня звукового сигналу або шумопослаблення – це, в основному, регулювання інерційної дії.

У радіомовленні та звукотехніці застосовують одночасно як ручне, так й автоматичне регулювання. Автоматичні регулятори забезпечують швидкодію в змінах амплітуди сигналу, але стають джерелом додаткових нелінійних спотворень. Оператори, які працюють з ручними регуляторами, мають невисоку швидкість реакції – частки секунди, для них характерним є поява психологічного та фізичного стомлення. В результаті, за статистикою біля 30 % часу відтворення звукових програм динамічний діапазон мовного сигналу неоптимальний, а нелінійні спотворення завищені.

Ручні регулятори рівня. Найпростішими схемами ручних регуляторів рівня є паралельна або потенціометрична та послідовна (рис. 7.4).

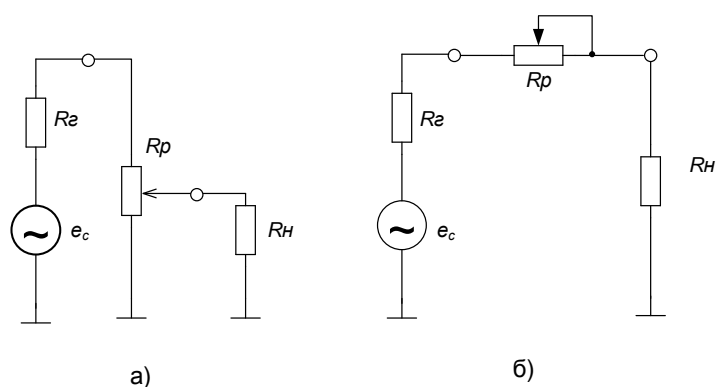


Рисунок 7.4 – Ручні регулятори (а – потенціометричний, б – послідовний); R_g – вихідний опір сигналу, R_n – опір навантаження

Недоліком таких регуляторів є те, що вхідний та вихідний опори $R_{вх}$, $R_{вих}$ для нижнього та верхнього положень движка резистора R_p змінюються.

В звукових пультах, в основному, повзункові за конструкцією регулятори. Гарні результати забезпечують безконтактні регулятори типу «світло – опір», «напруга(струм) – опір» та ін.

Автоматичні регулятори рівня. Автоматичні регулятори рівня під впливом мовного сигналу змінюють свій коефіцієнт передачі за заданим законом залежно від миттєвого значення або від випрямленого та усередненого значення вхідного сигналу. Перші – це автоматичні регулятори миттєвої дії, а другі відносяться до автоматичних регуляторів інерційної дії.

Компресор автоматично зменшує коефіцієнт передачі зі зростанням рівня вхідного сигналу, тобто, в порівнянні з вхідним, динамічний діапазон вихідного сигналу такого регулятора зменшується. В експандері регулювання має протилежний характер, тому динамічний діапазон вихідного сигналу у порівнянні з вхідним зростає.

Обмежувач максимального рівня нижче заданого порогового рівня має максимальний коефіцієнт передачі та працює як звичайний підсилювач. Після перевищення вхідним сигналом порогового рівня коефіцієнт передачі регулятора починає зменшуватися, при цьому підтримується майже незмінною амплітуда вихідного сигналу, а його форма майже не спотворюється. Обмежувач максимального рівня має ще назву підсилювач-обмежувач. Коефіцієнт передачі обмежувача мінімального рівня різко зменшується при рівнях вхідного сигналу нижче заданого порога. Такі регулятори ефективно послаблюють шуми та завади в паузах мовного сигналу.

Узагальнена структурна схема автоматичного регулятора інерційної дії (рис. 7.5) складається з керованого кола (К) зі змінним коефіцієнтом передачі та вузла керування (ВК). До ВК входять підсилювачі (П), детектори (Д), інтегратори (І). На вхід ВК сигнал надходить як із входу, так й з виходу регулятора. У першому випадку регулювання є прямим, у другому – зворотним. В керованому колі К використовують подільник напруги зі змінним коефіцієнтом передачі або підсилювач зі змінним коефіцієнтом підсилення.

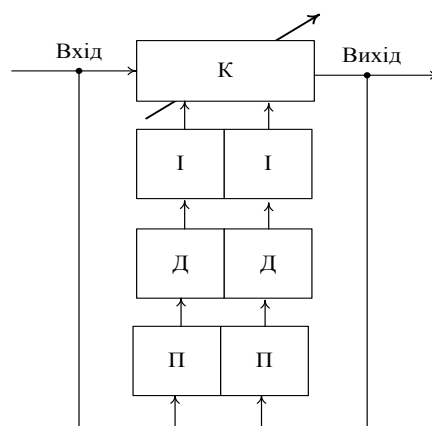


Рисунок 7.5 – Автоматичний регулятор інерційної дії

7.3 Шумопослаблювачі

На основі розглянутого пристрою (рис. 7.5) можна реалізувати компресор з пороговим шумопослаблювачем, який буде подавляти шумову складову вхідного мовного сигналу (рис. 7.6). Якщо вхідна напруга сигналу $U_{ВХ}$ нижча порогової мінімальної напруги $U_{ВХ_ПОР1}$ вузол керування ВК1 зменшує до мінімального коефіцієнт передачі керованого кола К1 й шуми не проходять на його вихід. Зі зростанням напруги $U_{ВХ}$ коефіцієнт передачі кола К1 зростає та стабілізується. Пристрій працює на лінійній ділянці амплітудної характеристики. Якщо вихідна напруга $U_{ВИХ}$ стає більшою за другу порогову напругу $U_{ВХ_ПОР2}$, спрацьовує канал зворотного регулювання ВК2 й пристрій як компресор звужує згори динамічний діапазон вихідного сигналу $U_{ВИХ}$.

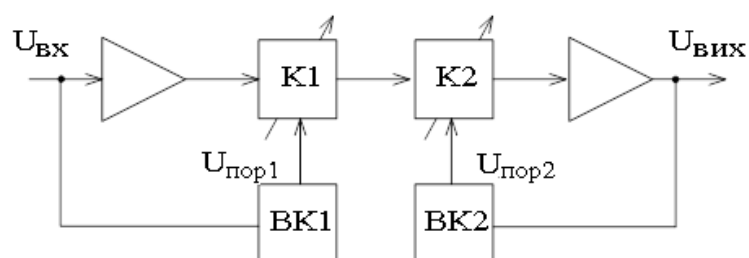


Рисунок 7.6 – Компресор з пороговим шумопослабленням

Для усунення придиху диктора або співака при формуванні радіомовної програми або створенні фонограми в пристрої (рис. 7.6) застосовують пороговий шумопослаблювач ВК, К1 з гістерезисом. Шумопослаблювач спрацьовує при менших на (8–10) дБ рівнях вхідного сигналу, ніж відновлюється.

Шумопослаблювачі, як пристрої динамічної обробки звукових сигналів, широко використовують в радіомовленні та звукотехніці. За їх допомогою:

- зменшують вплив шумів та завад підсилювачів, перетворювачів, каналів зв'язку;
- збільшують відношення сигнал/шум при відтворенні записаних фонограм;
- послаблюють шуми при відтворенні неякісних звукових сигналів.

Шумопослаблювачі бувають аналогові та цифрові. Шумопослаблювачі, в яких не аналізується частотний склад мовного сигналу, є пороговими. Приклад такого пристрою розглянуто вище. Відомі шумопослаблювачі з аналізом спектра як за частотою, так й за амплітудою. Основним з них є шумопослаблювачі зі змінною смугою пропускання, динамічним обмеженням шуму та компандерні.

Розглянемо роботу аналогового стереошумопослаблювача зі змінною смугою пропускання (рис. 7.7), який на (10–15) дБ збільшує відношення сигнал/шум аудіосигналу. Якщо через суматор С на фільтр ФВЧ з

частотою зрізу $F_{зр_вч} = 6 \text{ Гц}$ не надходять інтенсивні високочастотні складові вхідного сигналу на виході детектора Д напруга керування $U_{кер}$ регулює фільтри ФНЧ. При цьому частота зрізу ФНЧ $F_{зр_нч}$ мінімальна та близька до 6 Гц. Вхідний сигнал, насичений високочастотними складовими, розширює до 20 кГц смугу пропускання ФНЧ. Шуми маскуються інтенсивним мовним сигналом. Час спрацьовування та відновлення шумопослаблювача, який залежить від параметрів детектора Д, становить, відповідно, 0,5 мс та 50 мс.

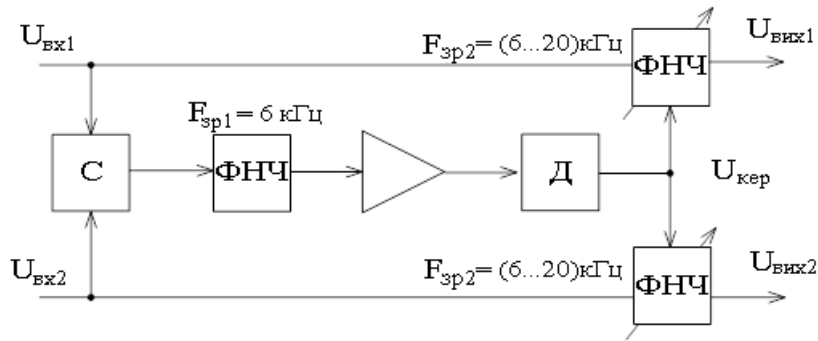


Рисунок 7.7 – Шумопослаблювач зі змінною смугою пропускання

Шумопослаблювач з динамічним обмеженням шуму (рис. 7.8) застосовується для зменшення адитивного шуму в паузах при відтворенні старих фонограм. Його робота базується на тому, що з пониженням гучності звукового сигналу відносний рівень високочастотних складових зменшується в спектрі, а майже вся енергія зосереджується в смузі до 5 кГц.

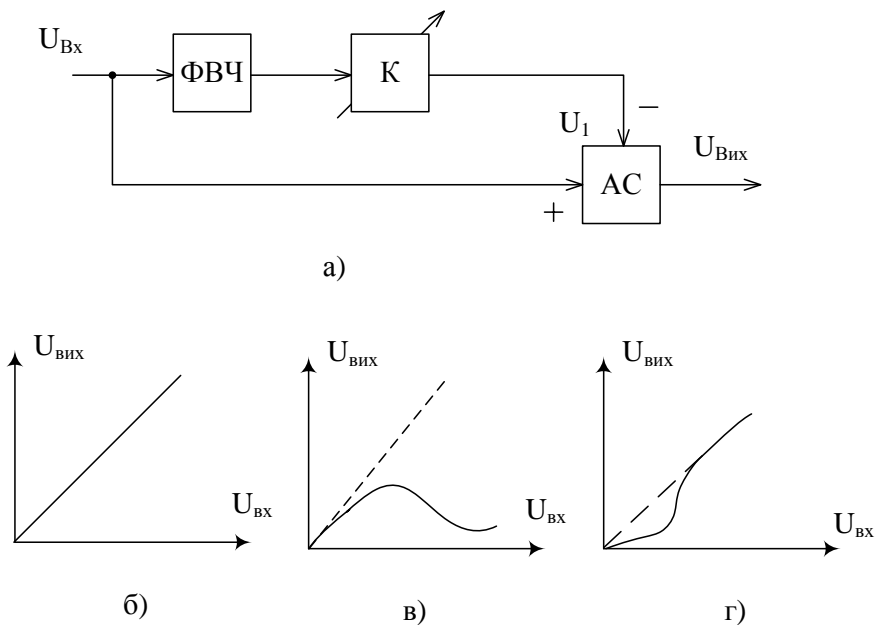


Рисунок 7.8 – Шумопослаблювач з динамічним обмеженням шуму

Сигнал частотою до 5 кГц не пропускається ФВЧ до керованого кола К, тому напруга U_1 дорівнює нулю, вихідна напруга алгебраїчного суматора АС $U_{\text{вих}} = U_{\text{вх}} - U_1 = U_{\text{вх}}$. Амплітудна характеристика шумопослаблывача при цьому відповідає (рис. 7.8, б). Високочастотні компоненти мовного сигналу низького рівня, найбільш помітні складові шуму через ФВЧ діють на коло К, яке побудовано за схемою підсилывача з АРП прямого регулювання (див. рис. 7.5). Його вихідна напруга (рис. 7.8, в) віднімається АС від $U_{\text{вх}}$ (рис. 7.8, г). Шуми на виході шумопослаблывача зменшуються тому, що $U_{\text{вих}}$ приблизно дорівнює нулю. Вхідний сигнал високого рівня маскує шум, а напруга $U_{\text{вих}}$ приблизно дорівнює $U_{\text{вх}}$ (рис. 7.8, г).

Розглянутий шумопослаблывач забезпечує вигравш у відношенні сигнал/шум від 5 дБ (5 кГц) до 20 дБ (10 кГц).

Серед компандерних відомі шумопослаблывачі Dolby. Вони встановлені як в тракті запису (передачі), так й в тракті відтворення (прийому) звукового сигналу. Тракти складаються з основного (ОК) та допоміжного каналів (ДК) (рис. 7.9).

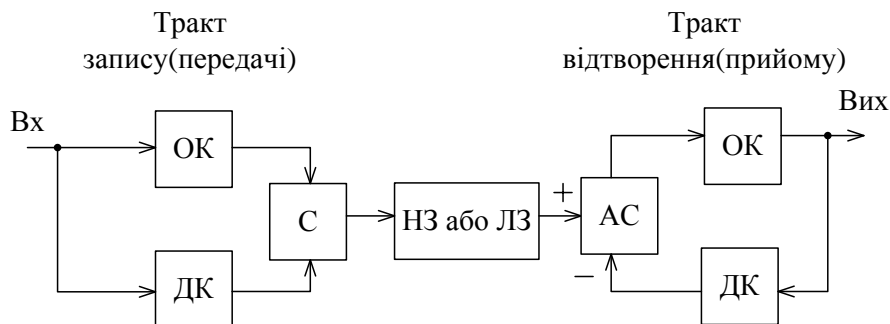


Рисунок 7.9 – Компандерний шумопослаблывач (НЗ – носій запису, ЛЗ – лінія зв’язку)

До каналу ОК входять лінійні підсилывачі, в ньому звуковий сигнал не перетворюється. У каналі ДК звуковий сигнал ділиться на частотні смуги, в яких змінюється його динамічний діапазон. В тракті запису (передачі) динамічний діапазон звукового сигналу зменшується компресорами, в тракті відтворення (прийому) – розширюється експандерами. Наприклад, в шумопослаблывачі Dolby А таких гілок регулювання по чотири (рис. 7.10). Звуковий сигнал поділений на частотні смуги 30...80 Гц, 80...3000 Гц, 3000...20000 Гц, 9000...20000 Гц.

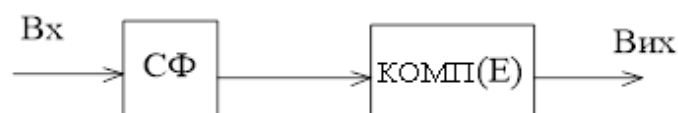


Рисунок 7.10 – Додатковий канал (СФ – смуговий фільтр, КОМП – компресор, Е – експандер)

Регулювання в трактах компандерного шумопослаблювача відбувається при маленьких рівнях вхідного сигналу $L_{вх}$, при яких особливо помітні шуми. В результаті, на виході тракту запису зростає рівень слабого сигналу (рис. 7.11). На виході шумопослаблювача великий за рівнем сигнал не змінюється, амплітудні співвідношення між складовими сигналу відновлюються в ДК експандера (рис. 7.11).

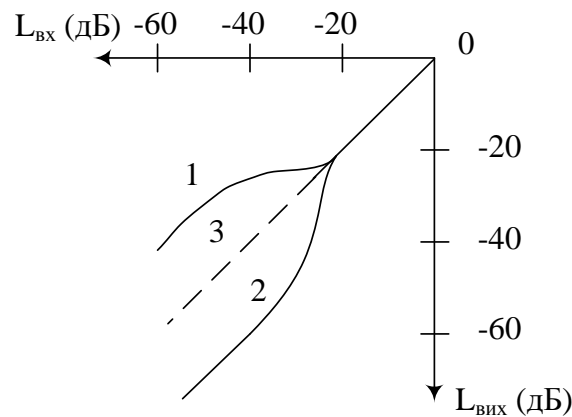


Рисунок 7.11 – Амплітудна характеристика
(1 – тракт запису, 2 – тракт відтворення, 3 – шумопослаблювач)

Компандерні шумопослаблювачі зменшують не тільки адитивну, а й модуляційну складову шуму на 10–15 дБ та більше.

7.4 Підсилювачі

Неодмінними ланками мовного каналу, зокрема пульта звукорежисера, є підсилювачі. Залежно від призначення розрізняють підсилювачі мікрофонні, проміжні, вихідні, роздільні, лінійно-роздільні.

Мікрофонні підсилювачі призначені для збільшення рівня сигналів, що поступають на входи пульта звукорежисера. Для них характерні:

- велике підсилення (до 80 дБ);
- низький приведений до входу рівень власних шумів (–120...–130 дБ);
- висока захищеність від синфазної вхідної завади (не менше 70 дБ).

Висока захищеність забезпечується симетричним входом. В мікрофонних підсилювачах є можливість регулювати чутливість або за допомогою подільника напруги (крок поділу звично 10 дБ), або за допомогою змінного негативного зворотного зв'язку.

Мікрофонні підсилювачі будують з трансформаторним та безтрансформаторним входом. У першому випадку простіше реалізувати узгодження невеликого електричного опору мікрофона з великим вхідним опором підсилювача. Подача фантомного живлення на конденсаторний мікрофон здійснюється через середню точку первинної обмотки трансформатора.

Безтрансформаторна схема простіша та дешевша, забезпечує малі частотні спотворення, більші межі зміни підсилення. Як наслідок відсутності трансформатора, в такому підсилювачі не виникає мікрофонний ефект, обумовлений магнітострикцією сердечника. Проте для організації фантомного живлення ускладнюється схема.

Проміжні підсилювачі – найпоширеніший вид підсилювальних вузлів пульта звукорежисера. Їх використовують для компенсації послаблень, що вносять регулятори рівня та спектра, як роздільні в мікшерах та в колах контролю. Ці підсилювачі звичайно виконують за безтрансформаторною схемою з симетричним входом та симетричним або несиметричним виходом з невеликим коефіцієнтом підсилення (10 або 20 дБ). В схемах застосовується глибокий від’ємний зворотний зв’язок. Рівень власних шумів проміжних підсилювачів 120–130 дБ, вхідний опір великий, а вихідний, як правило, малий.

Вихідні підсилювачі підключаються до симетричних ліній з хвильовим опором 150...600 Ом. Вони забезпечують номінальні вихідні рівні від +6 дБ до 15(17) дБ. Запас підсилення дозволяє піднімати вихідний рівень до 21...25 дБ. Вхід в таких підсилювачах несиметричний.

Розділові підсилювачі служать для усунення взаємних впливів в пристроях змішування, захисту трактів від короткого замикання та попадання завад, а також підмикання зовнішніх контрольних приладів. Для усунення проникання зовнішніх завад роздільні підсилювачі мають мати велике загасання між виходом та входом.

Лінійно-роздільні підсилювачі виконують функції лінійного та роздільного підсилювачів при підмиканні до виходу пульта звукорежисера декількох ліній. Як правило, вони мають симетричні вхід та вихід.

Основою всіх малопотужних підсилювачів тракту звукового мовлення є операційний підсилювач (ОП), ввімкнення за інвертувальною (рис. 7.12, а) або неінвертувальною (рис. 7.12, б) схемами.

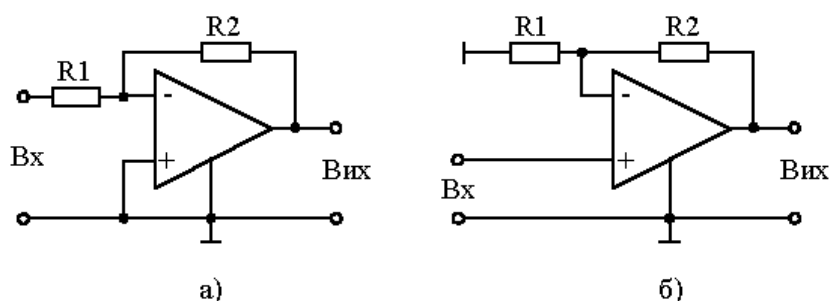


Рисунок 7.12 – Схеми ввімкнення операційного підсилювача

7.5 Мікшери

Мікшером або змішувачем називають пристрій, в якому додаються мовні сигнали декількох вхідних або групових трактів. Мікшер суміщають з комутатором, за допомогою якого вхідні або групові тракти пульта підмикаються до шини змішувача й через неї до подальших ланок пульта.

В простій схемі змішувача (рис. 7.13, а) сигнали з усіх входів поступають через індивідуальні регулятори (ІР) на шину змішувача Ш та загальний регулятор (ЗР). Ця схема має два недоліки. Перший полягає у тому, що зміна числа підімкнених до шини ІР приводить до зміни рівня сигналу на шині, оскільки навантаженням кожного ІР служить не тільки вхідний опір ЗР, але й вихідні опори інших ІР. По-друге, із переміщенням щітки повзунка з верхнього за схемою положення в нижній вихідний опір ІР все більш шунтуватиме шину змішувача й в нижньому положенні замкне її на «землю», що призведе до припинення передачі сигналів зі всіх інших ІР до виходу.

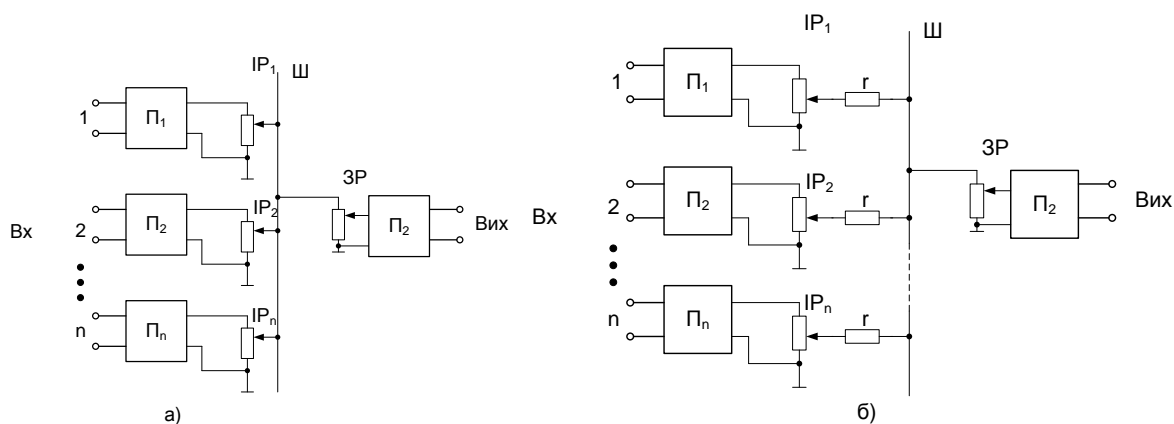


Рисунок 7.13 – Схеми мікшерів
(а – простий, б – з розділювальними резисторами)

Зазначених недоліків значною мірою немає в схемі, що наведена на рис. 7.13, б), в якій введені розділювальні резистори r .

Чим менше R/r , тим менший взаємний вплив регуляторів. Недоліком схеми є те, що розв'язувальні резистори створюють помітні втрати потужності сигналу.

Змішування сигналів за допомогою операційного підсилювача здійснюється за схемою (рис. 7.14), в якій $R_0 = R_{i1} = R_{i2} = \dots = R_{in}$. Для кожного з n входів змішувача коефіцієнт передачі по напрузі $K_i = R_0/R_i = 1$. Завдяки «віртуальному нулю» напруги на інвертувальному вході ОП така схема забезпечує достатньо високу розв'язку між входами.

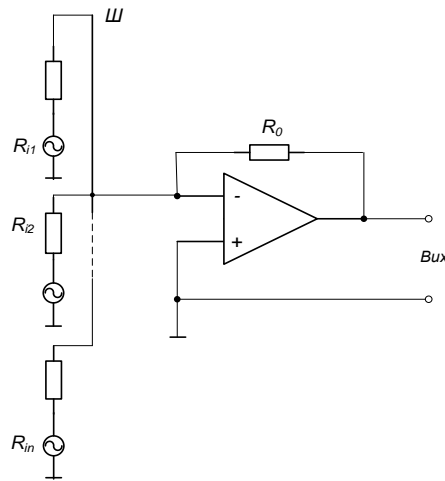


Рисунок 7.14 – Мікшер на операційному підсилювачі

7.6 Регулятори ширини бази та напрямку

При формуванні стереофонічних сигналів використовують звукові процесори, які виконують функції регуляторів ширини бази (РШ), напрямку (РН) та панорами (РП). Деякі з них діють спільно з сумарно-різницевим перетворювачем (СРП). За допомогою цих регуляторів формують бажану звукову картину або панораму в приміщенні слухача: розташування уявних джерел звуку (УДЗ), протяжність окремих груп УДЗ, по ширині бази змінюють сторони звукової картини, тобто інвертують її, переміщують УДЗ по базі. Ці ефекти досягаються чисто електричним шляхом. Попередньо з початкових сигналів лівого та правого каналів Л та П за допомогою СРП формують сигнали $M = L + P$ та $S = L - P$.

Принцип дії СРП зрозумілий з рис. 7.15. Нехай в якийсь момент полярність початкових сигналів Л та П така, як позначено. Струми сигналів Л та П на резисторах R2 та R3 збігаються за напрямом, тобто утворюють сигнал М, а на резисторах R1 та R4 – протилежні, тобто утворюють сигнал S. У такому вигляді стереофонічні сигнали подаються на регулятори РШ та РН.

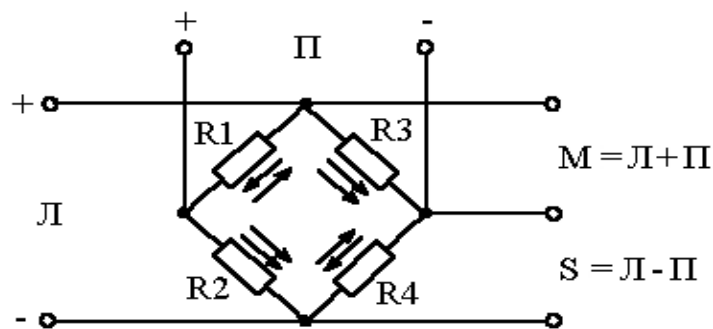


Рисунок 7.15 – Схема СРП

Розглянемо дію РШ (рис. 7.16, а). Будемо змінювати напругу сигналу S від максимальної до нуля. При максимальній напрузі сигналу S звукова картина утворюється між лівим гучномовцем та правим. При $S = 0$ на виході РШ одержимо $L = P = M$, тобто звукова картина стягнеться у точку, розташовану посередині між гучномовцями.

Нехай сигнал S РН (рис. 7.16, б) формується із сигналу M . Будемо підмішувати сигнал M в тракт сигналу S , змінюючи його величину та знак в межах M . При $S = M$ маємо $L = M + M = 2M$, $P = M - M = 0$ та звучить лівий гучномовець. При $S = 0$, $L = P = M$ й звук виходить з точки, розташованої посередині між гучномовцями. При $S = -M$ сигнали $L = M + (-M) = 0$, $P = M - (-M) = 2M$ і звучить правий гучномовець. Отже, при зміні в тракці сигналу S в межах $M \dots +M$ звукова картина УДЗ переміщується зліва направо.

Дуже часто звукову панораму формують з початкових моносигналів. Для цього їх підмішують в певних співвідношеннях в канали L та P за допомогою регулятора панорами (РП) (рис. 7.17). При переміщенні движка регулятора з позиції 1 в позицію 3 УДЗ зміщується зліва направо. Сумісною дією декількох таких регуляторів одержують бажане розміщення усіх УДЗ в звуковій картині.

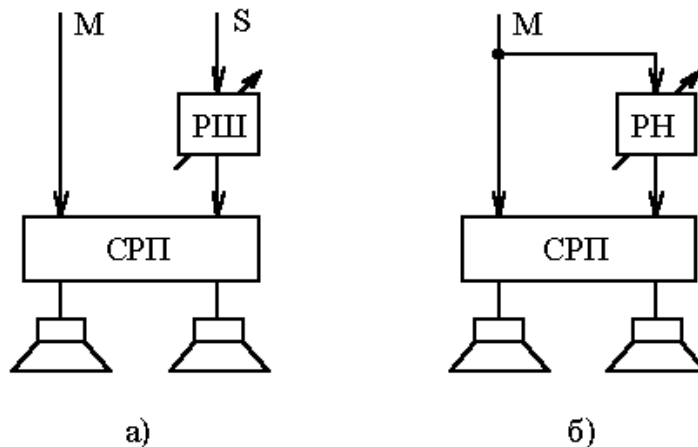


Рисунок 7.16 – Структурні схеми РШ (а) та РН (б)

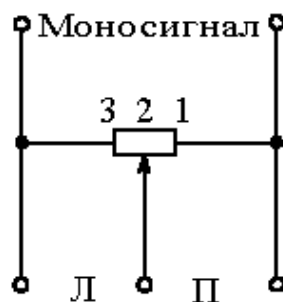


Рисунок 7.17 – Схема РП

Особливим видом ручних регуляторів є регулятор кросфейдер. За допомогою кросфейдера здійснюють плавний перехід від одного сигналу до іншого (рис. 7.18). Ці регулятори бувають ручні або автоматичні. Залежно від бажаного результату тривалість переходу змінюють від одиниць мілісекунд до декількох секунд.

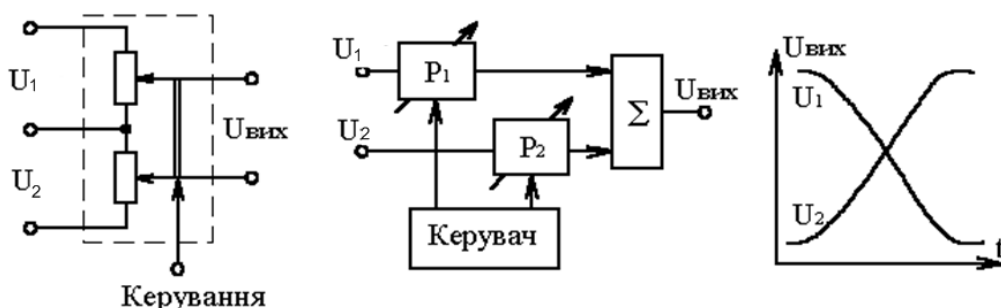


Рисунок 7.18 – Схеми кросфейдерів

Пристрій, що змінює панораму чи ширину стереобазиса, може складатися з двох сумарно-різницевих перетворювачів СРП із роздільними регуляторами рівнів сумарного (Σ) та різницевого (Δ) сигналів (рис. 7.19).

Нехай на виході стереомікрофона маємо сигнал довільної форми $S(t)$, причому в лівому каналі $aS(t)$, а в правому $bS(t)$. На виході СРП отримуються сигнали суми U_M та різниці U_s :

$$U_M = aS(t) + bS(t); U_s = aS(t) - bS(t).$$

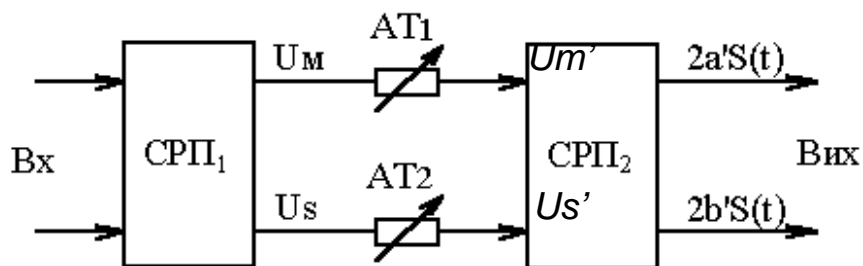


Рисунок 7.19 – Структурна схема звукового процесора

Оскільки в каналах суми та різниці є атенюатори (АТ), їхній вплив на сумарний й різницевий сигнали можна врахувати введенням коефіцієнтів m_1 та m_2 :

$$U'_M = m_1 U_M = m_1 S(t)(a + b), 0 \leq m_1 \leq 1,$$

$$U'_s = m_2 U_s = m_2 S(t)(a - b), 0 \leq m_2 \leq 1.$$

Після СРП₂:

$$U'_M + U'_S = S(t)[m_1(a+b) + m_2(a-b)] = 2a'S(t),$$

$$2a' = m_1(a+b) + m_2(a-b); 2b' = m_1(a+b) - m_2(a-b)$$

$$U'_M - U'_S = S(t)[m_1(a+b) - m_2(a-b)] = 2b'S(t),$$

Якщо рівні сумарного та різницевого сигналів не змінюються ($m_1 = m_2 = 1$), то $a' = a$, $b' = b$, тобто на виході СРП₂ отримаємо такі ж сигнали, як на вході.

При регулюванні співвідношення сумарного і різницевого сигналів змінюється і, отже, змінюється напрямок на УДЗ.

Потрібно зазначити, що мова тут йде про сигнали суміщеного стереомікрофона, при якому різниця фаз не позначається на стереоефекті.

7.7 Регулятори АЧХ

Для зміни спектра звукових сигналів використовують різні пристрої, що створюють спади або підйоми АЧХ у області нижніх та верхніх частот або в обмежених ділянках на середніх частотах. До числа цих пристроїв відносяться:

- регулятори тембру або плавного підйому й спаду АЧХ на нижніх та верхніх частотах;
- фільтри, які різко обмежують смугу пропускання по нижніх та верхніх частотах;
- багатосмугові регулятори АЧХ (еквалайзери);
- фільтри «присутність» та ін.

При побудові названих пристроїв звичайно використовують активні RC-ланки на ОП.

Різні регулятори АЧХ (Р) конструктивно об'єднують в загальному блоці. Його структурна схема та вигляд одержуваних АЧХ показані на рис. 7.24. Щоб уникнути взаємних впливів плавні або, частіше, дискретні регулятори відділяють один від одного підсилювачами (П).

Регулятори тембру. Основними функціями регуляторів тембру при звуковідтворенні є виправлення частотної характеристики джерел сигналу, з'єднувальних кабелів, гучномовців у конкретній акустичній обстановці, а також зміна спектра звукового сигналу відповідно до індивідуальних особливостей слуху та художнього смаку слухача.

Регулятор тембру, як елемент системи звуковідтворення, встановлює бажане забарвлення звучання конкретної апаратури.

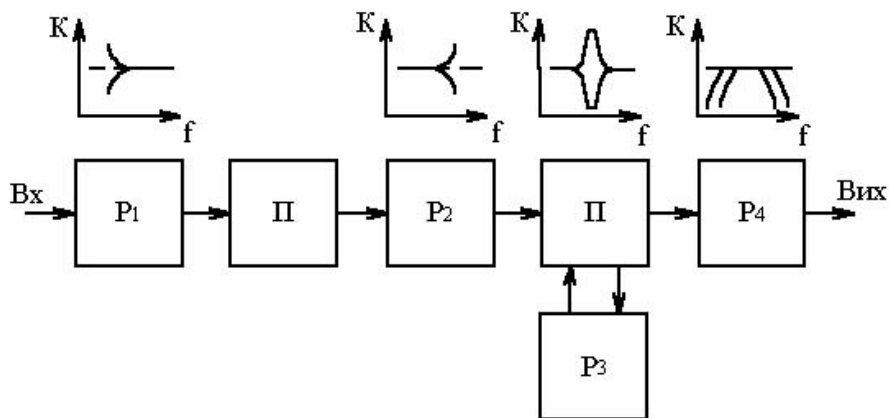


Рисунок 7.20 – Структурна схема блока регуляторів АЧХ

Регулятори тембру бувають односмугові, дво- або трисмугові. Односмугові регулятори тембру, які працюють на спад частотної характеристики, зображені на рис. 7.21. У верхньому за схемою положенні повзунка резистора R_p (рис. 7.21, а) завал АЧХ на ВЧ максимальний. Регулювання починається із частоти

$$F_B = \frac{1}{2\pi \cdot R_{вих} \cdot C}$$

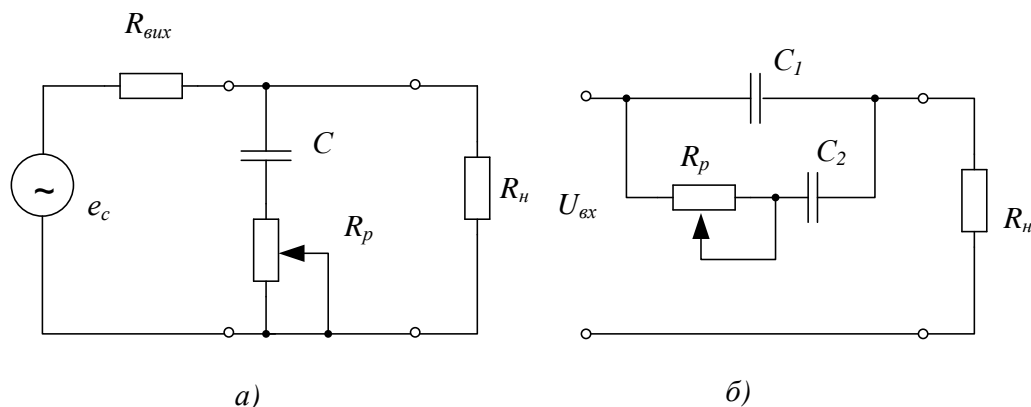


Рисунок 7.21 – Односмугові регулятори тембру

В правому за схемою положенні повзунка резистора R_p (рис. 7.21, б) спад АЧХ регулятора тембру на НЧ максимальний. Регулювання починається з частоти

$$F_H = \frac{1}{2\pi R_H (C_1 + C_2)}$$

Двосмуговий пасивний регулятор тембру з підйомом та спадом частотної характеристики на НЧ та ВЧ (рис. 7.22) працює таким чином. В області низьких частот реактивний опір конденсаторів C_1 – C_4 значний, тому коефіцієнт передачі регулятора тембру залежить від положення повзунка

резистора $R_{НЧ}$. На високих частотах, навпаки, коефіцієнт передачі регулятора тембру визначається положенням повзунка резистора $R_{ВЧ}$, а резистор $R_{НЧ}$ зашунтований конденсаторами $C1, C2$. На середніх частотах коефіцієнт передачі постійний, залежить не від змінних резисторів $R_{НЧ}, R_{ВЧ}$, а від співвідношення опорів резисторів $R1, R2$. Резистор R встановлюється з розділювальною метою. Недоліком регулятора тембру (рис. 7.22) є послаблення рівня звукового сигналу.

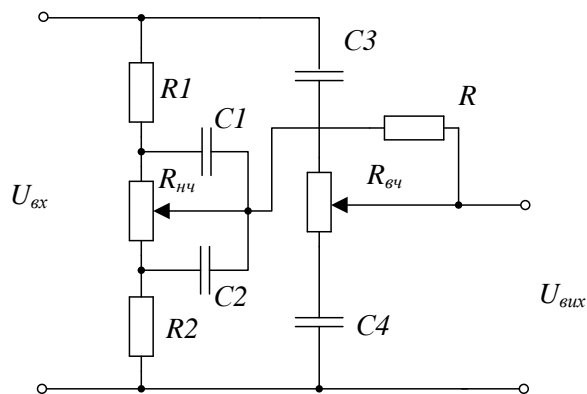


Рисунок 7.22 – Двосмуговий пасивний регулятор тембру

Активний двосмуговий регулятор тембру на операційному підсилювачі (рис. 7.23, а) має коефіцієнт передачі на СЧ 0 дБ та глибину регулювання до ± 20 дБ (рис. 7.23, б). Його побудовано на основі аналогічного рис. 7.22 частотозалежного вузла в колі зворотного зв'язку операційного підсилювача. Максимальний підйом частотної характеристики на НЧ та ВЧ буде у лівому за схемою розташуванні повзунків регуляторів $R2, R5$.

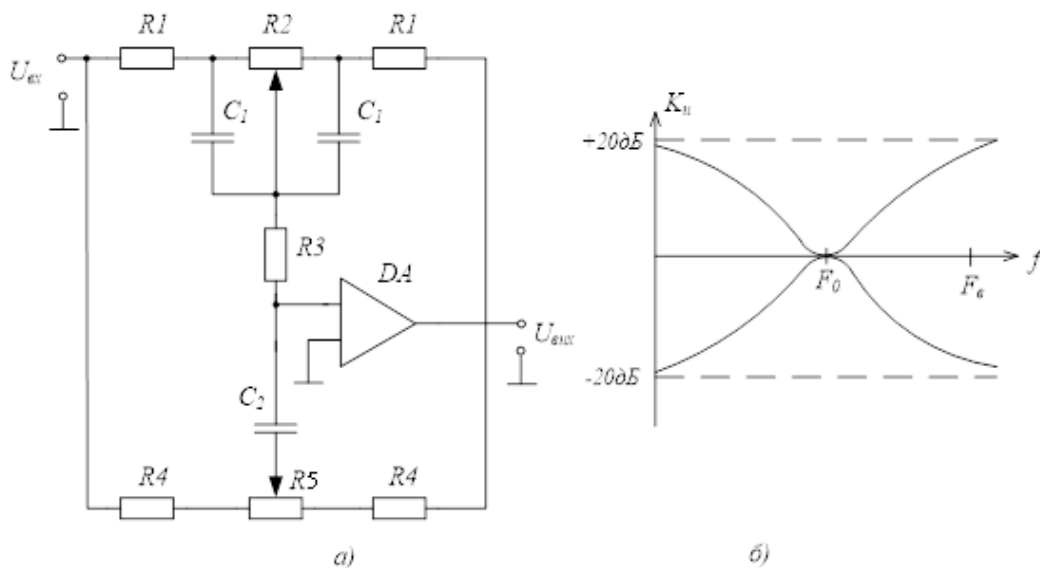


Рисунок 7.23 – Активний регулятор тембру

7.8 Обробка звукового сигналу в часі

В основі перетворення звукового сигналу в часі є застосування ліній затримки. За їх допомогою в стереофонічних сигналах змінюють напрямок до уявних джерел звуку, вирівнюють груповий час затримки мовних трактів, регулюють час затримки у надходженні звуку до слухачів від різних гучномовців. В таких лініях час затримки змінюють від одиниць мілісекунди до кількох секунд.

Лінії затримки входять до складу ревербераторів – пристроїв, які створюють штучну реверберацію. Крім того, створена велика кількість пристроїв звукових ефектів, робота яких основана на змішуванні звукового сигналу з одним або декількома затриманими його повтореннями. Якщо час затримки постійний, то реалізуються ефекти луни, повторення, реверси. При безперервній зміні за певним законом та з різними швидкостями часу затримки формуються ефекти вібрато, дует, хорус та інші.

В сучасному звукотехнічному та мовному обладнанні найбільш поширені цифрові лінії затримки на регістрах зсуву або запам'ятовувальних вузлах. В них час затримки, відповідно, складає:

$$\tau = \frac{N}{f_T}; \tau = \Delta N t_{\text{ц}},$$

де N – кількість тригерів у регістрі;

f_T – тактова частота;

ΔN – кількість програмних циклів між записуванням та зчитуванням цифрового сигналу;

$t_{\text{ц}}$ – тривалість циклу.

В аналоговій апаратурі цифрові лінії затримки починаються з аналогово-цифрового перетворювача, а завершуються цифро-аналоговими перетворювачами. Спрощено цифровий ревербератор наведений на рис. 7.24.

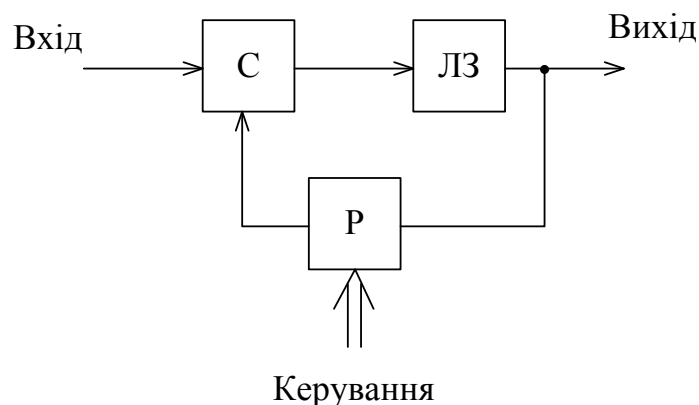


Рисунок 7.24 – Цифровий ревербератор
(С – суматор, ЛЗ – лінія затримки, Р – регулятор)

Із схеми видно, що для отримання реверберації вихідний сигнал з лінії затримки (ЛЗ) додається суматором (С) до вхідного. Рівень сигналу додавання можна змінювати за допомогою регулятора (Р), тим самим регулюється час штучної реверберації. Додатково в такий ревербератор вводяться програмний блок та коректор АЧХ. Це дозволяє змінювати режим реверберації та термін ревербераційного сигналу.

Сучасні цифрові ревербератори являють собою швидкодійні процесори, в яких кількість затриманих сигналів, їх рівні та час затримки задаються програмно. Такими пристроями імітуються об'єм, пропорції та лінійні розміри приміщень, коефіцієнти поглинання та їх частотні характеристики.

Еквалайзери. Широкі можливості зміни АЧХ має багатосмуговий регулятор. Він містить декілька смугових фільтрів (СФ). Коефіцієнт передачі в кожній частотній смузі змінюється плавно або дискретно регуляторами рівня.

Класифікація еквалайзерів наведена на рис. 7.25.

Графічні еквалайзери найбільш поширені. В них діапазон звукових частот розбитий на смуги (наприклад, 24 смуги в еквалайзері Technics SH-8020). Регулювання коефіцієнта передачі в окремих смугах здійснюється змінними резисторами, за положенням яких на передній панелі еквалайзера вирисовується форма АЧХ, це й визначає назву еквалайзера – графічний.

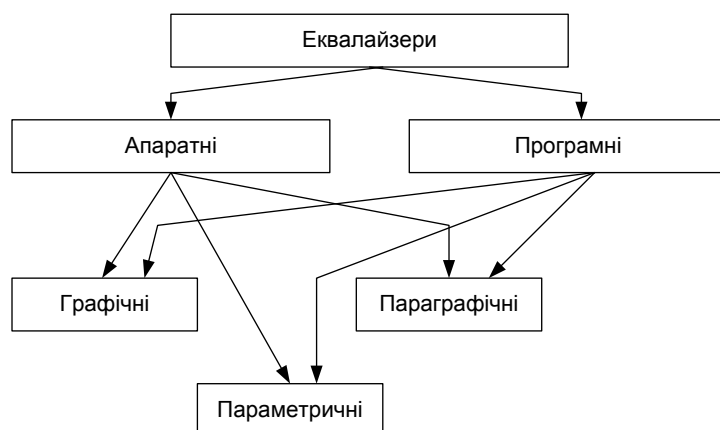


Рисунок 7.25 – Класифікація еквалайзерів

Параметричні еквалайзери відрізняються від графічних меншою кількістю смуг й тим, що центральні частоти смуг, їхня ширина можуть бути змінені. Три-, п'ятисмугові варіанти цих пристроїв дозволяють просто забезпечити ефективне регулювання АЧХ з результатами, досяжними в графічному еквалайзері з кількістю смуг не менше восьми.

Параграфічні еквалайзери за будовою схеми не відрізняються від параметричних. В них лише реалізовано властивість графічного еквалайзера – наочне подання АЧХ.

Графічні еквалайзери. Звичайно такі еквалайзери являють собою набір вузькосмугових фільтрів з резонансними частотами, розташованими в усьому

звуковому діапазоні за логарифмічним масштабом. Підйом або спад підсилення кожного фільтра регулюється змінним резистором із повзунком, що лінійно переміщується. У цьому випадку послідовно розташовані на передній панелі корпусу резистори всіх фільтрів наочно характеризують встановлену АЧХ еквайзера.

Окремі фільтри графічного еквайзера розміщені за частотою на відстані в октаву, або в півоктави чи в третину октави. Коли всі вони перебувають у стані підсилення (або всі у середньому стані чи в стані ослаблення) частотна характеристика гладка. Діапазон регулювання фільтрів, як правило, обмежений 12–20 дБ.

Графічні еквайзери можна зустріти в побутових системах Ні-Еі, однак основні області їхнього застосування – це звукозапис, звуковідтворення й акустична корекція приміщень. Під час відтворення звуку в приміщенні необхідно досягти як можна більше плоскої АЧХ, усуваючи за допомогою графічного еквайзера резонансні частоти, на яких приміщення й гучномовці мають тенденцію «заводитися». Індивідуальні еквайзери в «комбиках» зручно використовувати для оперативної зміни характеру звучання музичного інструменту.

Для того, щоб керувати частотною характеристикою у всьому звуковому спектрі, такі фільтри еквайзера необхідно з'єднати послідовно або паралельно.

При паралельному з'єднанні (рис. 7.26) кожний фільтр підсилює або послаблює «свою» ділянку спектра відповідно до розташування регуляторів. Паралельне з'єднання фільтрів у графічному еквайзері, на відміну від послідовного з'єднання, дозволяє зменшити фазові спотворення (phase distortion), внесені еквайзером у сигнал. Справа в тому, що крім формування амплітудно-частотної характеристики будь-який фільтр вносить у сигнал певну фазову затримку. У випадку послідовного з'єднання фільтрів ці фазові спотворення додаються. Якщо при з'єднанні двох або трьох фільтрів сумарні фазові спотворення незначні, то для більшої кількості смуг графічного еквайзера прийнятним виявляється тільки паралельне з'єднання [3, 6].

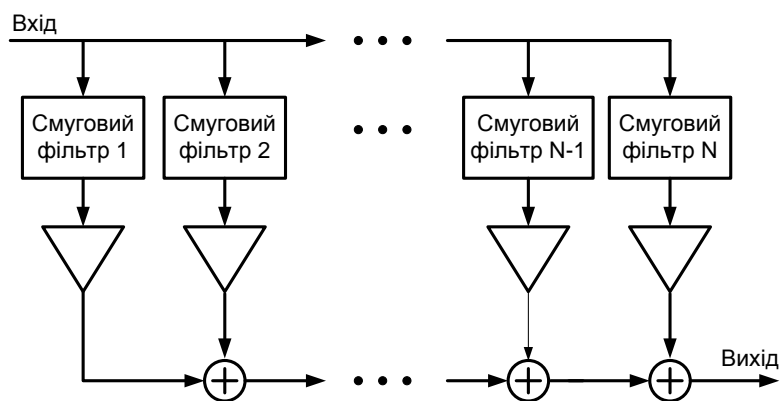


Рисунок 7.26 – Паралельне з'єднання фільтрів графічного еквайзера

Центральні частоти смугових фільтрів графічного еквайзера «рівномірно» розподілені за октавними інтервалами. Кожна октава відповідає степені двійки, тому крок в октаву із першою центральною частотою 100 Гц буде виглядати так: 200 Гц, 400 Гц, 800 Гц і т. д. Для кроку в 1/3 октави коефіцієнт множення 2 у степені 1/3, що приблизно дорівнює 1,26. При першій центральній частоті 100 Гц наступні частоти будуть 126 Гц, 159 Гц, 200 Гц і т. д. Кращі для використання в еквайзерах частоти фільтрів описані в спеціальному стандарті ISO.

Параметричні еквайзери мають більшу гнучкість, однак для роботи з ними необхідний певний досвід та знання. Параметричний еквайзер дозволяє управляти не тільки коефіцієнтом підсилення фільтра, але й його центральною частотою, а також добротністю, тобто смугою пропускання. За наявності деякого досвіду оператор може встановлювати значення цих параметрів фільтра таким чином, щоб підкреслити звук окремого інструмента або видалити небажану перешкоду (наприклад, фон 50 Гц або частоту «мікрофонного ефекту» приміщення) з мінімальним впливом на інші елементи звукової картини. На рис. 7.27 показані кілька варіантів АЧХ односмугового параметричного еквайзера.

Технічні параметри та характеристики еквайзера. Частотна характеристика еквайзера повинна бути рівномірною в середньому положенні ручок регулювання. Також важливим фактором є низький рівень власного шуму еквайзера, тому що підсилення в області високих частот підкреслить усі наявні шуми – як ті, що є у вхідному сигналі, так й ті, що народились в еквайзері.

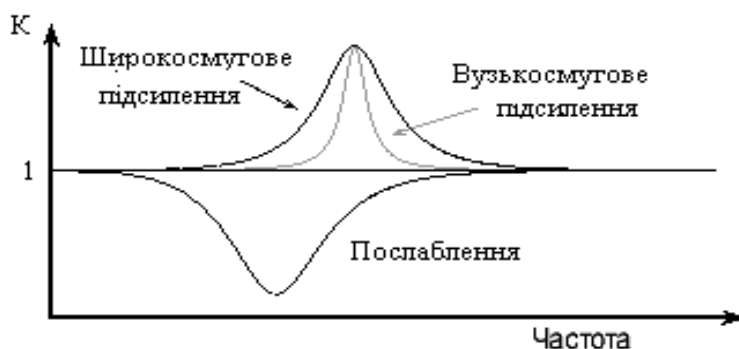


Рисунок 7.27 – Варіанти АЧХ параметричного еквайзера

Велике значення має фазова характеристика еквайзера. Вона дуже впливає на суб'єктивне сприйняття звуку. Ще один параметр – діапазон регулювання. Як уже було сказано вище, він звичайно складає ± 12 або ± 15 дБ.

На рис. 7.28 наведена АЧХ графічного еквайзера, який має вісім смуг регулювання з діапазоном або глибиною регулювання ± 20 дБ.

Ще однією характеристикою параметричних еквайзерів є добротність (quality) смугових фільтрів, яка в загальному випадку визначається як

$$Q = \frac{f_P}{\Delta f_{0.707}},$$

де f_P – резонансна частота (resonance frequency) фільтра;

$f_{0.707}$ – смуга пропускання (pass band) фільтра на рівні -3 дБ.

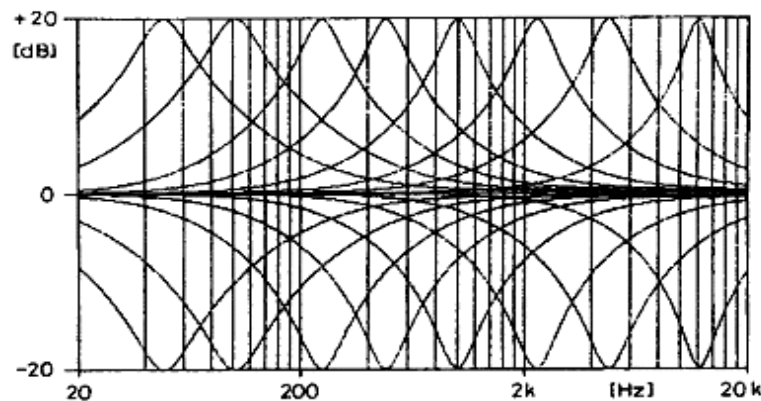


Рисунок 7.28 – АЧХ графічного еквайзера

7.9 Пристрої динамічної обробки сигналів (ПДОС)

В наш час існує величезна кількість різних приладів для динамічної обробки звукових сигналів – це компресори, порогові обмежувачі (гейти), експандери, левелери, лімітери і т. д.

Коли сигнал необхідно записувати або передавати по лініях зв'язку ПДОС узгоджують динамічний діапазон сигналу з динамічним діапазоном обладнання або лінії зв'язку.

Ще одна проблема – це наявність шумів в паузі, сторонніх сигналів, що потрапляють у мікрофони, фону та шипіння від гітарних приставок і т. д. У цих випадках виникає необхідність в автоматичному керуванні рівнями сигналів, тобто в застосуванні пристроїв динамічної обробки сигналів.

Усі пристрої динамічної обробки можна розділити на два класи: за характером взаємозв'язку їх коефіцієнта підсилення та рівня вхідного сигналу. Якщо при збільшенні рівня вхідного сигналу коефіцієнт передачі пристрою зменшується – то це компресор або його різновиди, такі, як лімітер, левелер, дакер та ін.

В протилежному випадку – при збільшенні вхідного сигналу коефіцієнт передачі пристрою також збільшується, маємо експандер або гейт.

Усі пристрої динамічної обробки сигналів відносяться до одного з цих двох класів. Існує велика кількість приладів, які мають різні назви, що не містять явного змістовного навантаження, або, в кращому випадку, являють собою складені назви, з частин назв приладів. Наприклад, «компеллор» – це «компресор + левелер».

Компресор та його похідні. Назва приладу походить від англійського дієслова «to compress» – стискати. Цей пристрій стискає динамічний діапазон вихідного звукового сигналу.

Основними параметрами компресії є: ступінь компресії (ratio), поріг спрацювання (threshold), а також час спрацювання (attack) та час відновлення (release). Перші дві величини відображені на графіку компресії (рис. 7.29).

На цьому рисунку по горизонталі показана вхідна напруга компресора, виражена для зручності в децибелах, по вертикалі – вихідна, а товста лінія – це прохідна характеристика компресора. З графіка видно, що вихідний сигнал дорівнює вхідному до точки спрацювання (початку роботи) компресора – threshold (поріг спрацювання). Починаючи з цієї точки, вихідний сигнал компресора збільшується меншою мірою, ніж вхідний, тобто здійснюється компресія. Мірою компресії служить ступінь компресії (ratio).

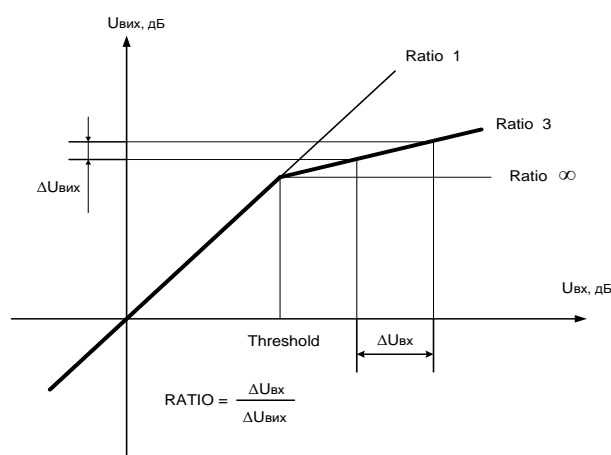


Рисунок 7.29 – Амплітудна характеристика компресора

Ступінь компресії – це відношення величини приросту вхідного сигналу до величини викликаного ним приросту вихідного сигналу. (При цьому вимірювані величини виражаються в децибелах)

$$\text{ratio} = D_{U_{\text{ВХ}}}/D_{U_{\text{ВИХ}}},$$

де $D_{U_{\text{ВХ}}}$ – зміна вхідного сигналу(дБ);

$D_{U_{\text{ВИХ}}}$ – зміна вихідного сигналу(дБ).

Динамічні характеристики компресорів визначаються часом спрацювання (attack) та відновлення (release).

Час спрацювання (attack) – це проміжок часу між моментом, коли від джерела подається стрибок сигналу з рівнем на 6 дБ вищим від початкового, й моментом, коли вихідний рівень досягає значення на 2 дБ вище встановленого значення вихідного сигналу (рис. 7.30).

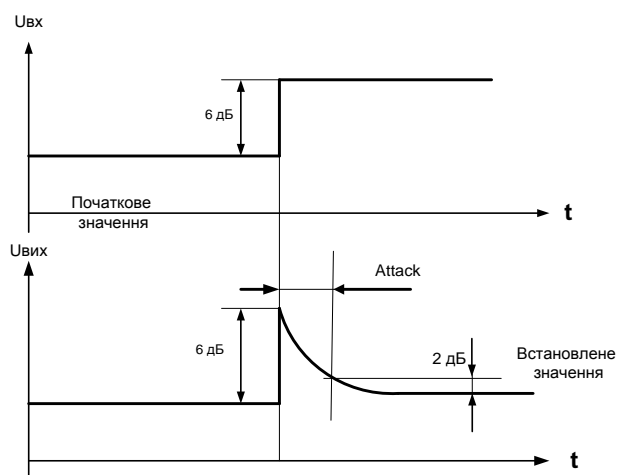


Рисунок 7.30 – Визначення часу спрацювання (attack)

Час відновлення (release) – це проміжок між моментом, коли рівень сигналу джерела зменшується на 6 дБ від початкового, й моментом, коли вихідний рівень досягає значення на 2 дБ нижче його встановленого значення (рис. 7.31).

Природно, що все це має відбуватися в області рівнів вхідного сигналу, що лежать вище порога спрацювання.

Будь-який компресор містить звуковий тракт та схему керування (рис. 7.32). Остання в англійській літературі носить назву «side chain». До складу звукового тракту входять зазвичай: вхідний та вихідний підсилювачі (1 та 3, відповідно), й елемент, що змінює коефіцієнт підсилення звукового сигналу – керований підсилювач VCA 2.

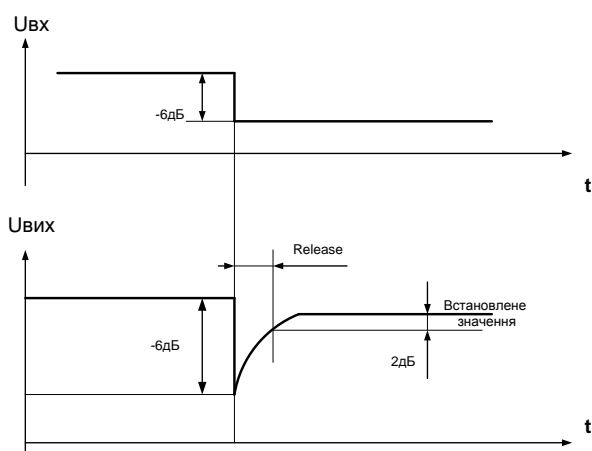


Рисунок 7.31 – Визначення часу відновлення

Коло керування складається з випрямляча 4 – для перетворення звукового сигналу в постійну керуючу напругу та керувача режимами компресії 5. В останньому й здійснюється установа динамічних параметрів компресора, а також змінюється ступінь компресії та поріг спрацьовування.

У деяких моделях компресорів, а також гейтів та ін., передбачаються гнізда side chain – для ввімкнення кола керування перед випрямлячем додаткового еквайзера.

При ввімкненні будь-якого еквайзера в розрив кола керування компресор працює із сигналом із зміненою еквайзером АЧХ. Цим забезпечуються більш широкі функціональні можливості для обробки початкових сигналів, стає можливою частото-залежна динамічна обробка, наприклад, де-ессер.

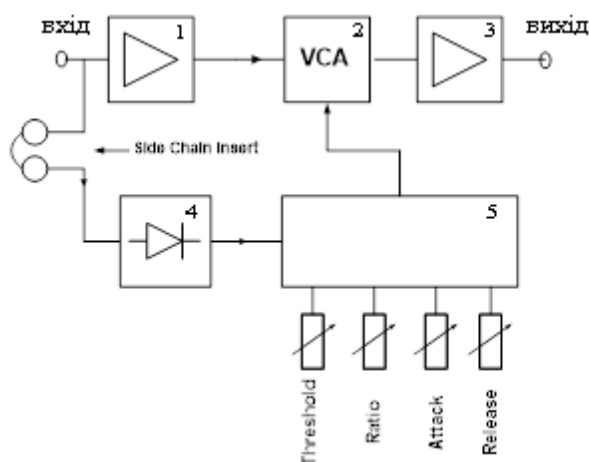


Рисунок 7.32 – Структурна схема компресора

Будь-які еквайзери, ввімкнені в side chain, не змінюють тембр звуку в основному каналі. Вони впливають тільки на параметри керування й відповідно, на характер здійснюваної динамічної обробки.

Всі компресори можна розділити на дві групи: пристрої з ручним або автоматизованим керуванням параметрами компресії.

В пристроях з ручним керуванням всі динамічні параметри задаються користувачем, що забезпечує дуже велику свободу у отриманні необхідних художніх результатів. У зарубіжній літературі цей тип компресорів часто називається creative – «творчий».

Користувачеві для роботи з ними необхідна досить висока кваліфікація, оскільки замість поліпшення звуку його можна зіпсувати.

В автоматизованих компресорах динамічні параметри раз та назавжди встановлені виробником, їх зміна користувачем неможлива. Деякі відомі виробники у ряді моделей пропонують на вибір кілька алгоритмів автоматизації для різних варіантів обробки.

Більшість автоматизованих компресорів не змінюють динамічні параметри звуку будь-яким істотним чином, а тільки вирівнюють початкове звучання, роблять його більш щільним та насиченим.

Автоматизовані компресори, насамперед, можна розділити також на два підкласи – компресори середньоквадратичного значення (RMS – Root Mean Square) та компресори із піковим детектором (не-RMS).

Компресори з піковим детектором мають один або де кілька наборів заводських попередніх налаштувань (пресетів) різних комбінацій часу спрацювання (attack) та відновлення (release.) Кожний варіант налаштувань компресора призначений для обробки якогось одного типу сигналів й тільки в цьому випадку робота такого компресора буде дійсно гарною. Пов'язано це з тим, що всі сигнали мають свої власні динамічні параметри, причому ці параметри для різних звучань можуть відрізнятися в сотні та навіть тисячі разів. Очевидно, що поєднання параметрів, оптимальне для одного звучання, для іншого буде малоприматне. Хоча іноді й це може дати цікаві, несподівані ефекти.

RMS – Root Mean Square (середньоквадратичне значення) компресор був донедавна рідкістю для більшості наших звукорежисерів. В останні роки все більше фірм приступає до їх випуску, що пояснюється постійно зростаючою популярністю цих компресорів як при звукозаписі, так й в концертній роботі. Цей тип компресора має реагувати на ефективне, діюче значення сигналу. RMS-компресор реагує безпосередньо на потужність звукового сигналу, а не на його миттєві значення, як звичайний компресор. Кола керування компресорів цього типу побудовані таким чином, що тривалий сигнал невеликої амплітуди набагато важливіший для керування підсиленням компресора, ніж короткий імпульс великої амплітуди.

Застосовувані для кіл керування компресором схеми мають дуже малу похибку детектування сигналів з великим пік-фактором, також до пристрою входять кола адаптації динамічних параметрів детектора до вхідного сигналу з урахуванням його сприйняття слухом. Інакше кажучи, часові параметри RMS-компресора не є чимось заданим, а складним чином змінюються залежно від частоти та рівня вхідного сигналу, його спектра. Це забезпечує дуже високу якість роботи RMS-компресора, який при правильному застосуванні практично не змінює динаміку вихідного музичного сигналу, а тільки його ущільнює.

Звучання стає більш рівним та потужним, без «нерівностей». Застосування RMS-компресора не потребує високої кваліфікації, й доступне практично будь-якому звукорежисеру. Навіть при не надто вмілому використанні, сильно зіпсувати звук RMS-компресором практично неможливо.

В окремих моделях компресорів є й деякі додаткові пристрої, що поліпшують їх функціональні можливості.

Наприклад, для зменшення помітності моменту ввімкнення багато компресорів мають так званий «м'який поріг» (Soft Threshold), що забезпечує плавне входження в режим компресії. На рис 7.33 зображені прохідні характеристики (залежність рівня вихідного сигналу від рівня вхідного) для двох компресорів звичайного (ламана лінія 1) та компресора з «м'яким порогом» (крива 2).

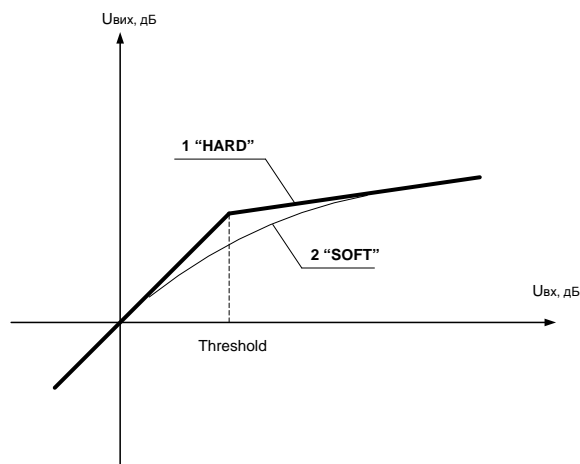


Рисунок 7.33 – Прохідні характеристики компресорів

Як видно з рис 7.33, в другому випадку ступінь компресії збільшується плавно, а не вмикається стрибкоподібно, як у звичайному компресорі. Таким чином вдається сильно послабити помітність початку компресії, зробити цей момент практично нечутним.

В престижних моделях можна навіть регулювати ступінь крутості зламу прохідної характеристики, робити його більш-менш «м'яким».

Загальновідома властивість компресії, особливо швидкої (при малих часах спрацювання та відновлення), приглушувати високі частоти в оброблюваному сигналі. Для усунення цього явища в деяких компресорах застосовуються різного роду спеціальні вузли ВЧ-експандери, що дозволяють нейтралізувати цей небажаний ефект. Зазвичай в таких пристроях сигнал розділяється на дві смуги й в той час як основний сигнал компресується, його високочастотна складова передається на вихід або незмінною, або навпаки підсиленою, пропорційно ослабленню рівня основного сигналу. У вихідному підсилювачі обидві ці складові підсумовуються, ефект послаблення ВЧ-складових істотно послаблюється.

Крім описаних вище, існують інші різновиди компресорів. Розглянемо деякі з них докладніше.

Лімітер

Лімітування відрізняється від компресування, насамперед ступенем компресії ratio. Для лімітування досить перевести регулятор в положення ratio = нескінченність: 1, при цьому незалежно від приросту вхідного сигналу рівень сигналу на його виході збільшуватися не буде.

Основне призначення лімітера – це захист наступних вузлів тракту від перевантажень. При цьому він має на 100 % не допускати перевищення встановленого вихідного рівня, але абсолютно не чіпати сигнали, що лежать нижче порога спрацювання. Звідси випливає висновок, що компресори з «м'яким перегином» принципово непридатні для цих цілей. Для них саме поняття «порога» розпливчате, адже для «непомітності» роботи протяжність «м'якої» ділянки характеристики у них велика, у деяких моделей досягає 40 дБ.

Компресори, автоматизацію динаміки своєї роботи також практично непридатні для використання як лімітера. Причина полягає в тому, що їх динаміка оптимізована під конкретний вид сигналу, під його компресію, а не що-небудь інше. А лімітер, крім більшого ratio, має й принципово інші динамічні характеристики. Він має дуже швидко (в ідеалі миттєво) загасити сигнал перевантаження й настільки ж швидко повернутися до початкового стану.

В автоматизованому компресорі домогтися цього попросту неможливо. У лімітері можна встановити час спрацювання до 5 мікросекунд, чого в компресорах просто не буває. Час відновлення в реальному захисному лімітері також дуже малий: кілька десятків мілісекунд. Очевидно, що компресія з такими параметрами здатна спотворити сигнал.

Левелер

Левелер є різновидом RMS-компресора. Основна його задача – це набагато більші постійні часу детектора, до десяти секунд в деяких моделях. Крім того, вони мають дещо іншу прохідну характеристику.

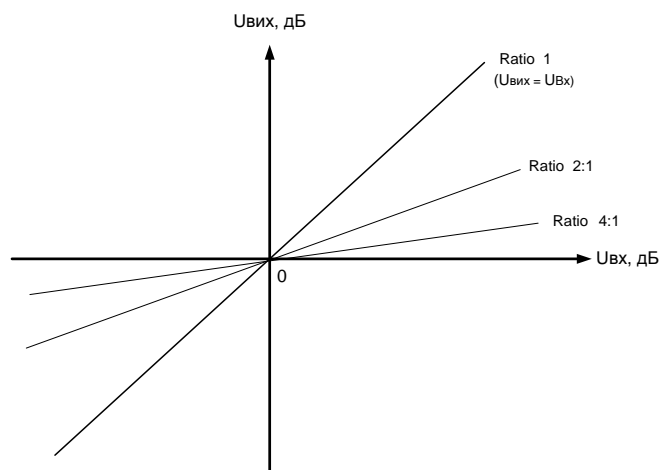


Рисунок 7.34 – Амплітудні характеристики левелера

На рис.7.34 зображено сімейство прохідних характеристик левелера при різних значеннях ratio. Незалежно від ratio сигнал з вхідним рівнем 0 дБ на виході має такий же рівень, а сигнали з іншими рівнями ніби підтягуються до нього: сильніші послаблюються, більш слабкі – посилюються. Причому, чим більше ratio встановлено, тим сильніше сигнали «притискаються» до рівня 0 дБ. У реальних пристроях є регулятор рівня, до якого мають «підтягуватися» сигнали.

Де-ессер, де-поппер. Це варіанти частотозалежного компресора, а точніше – смугового компресора. Де-ессер (та де-поппер) має обробляти тільки вузьку частотну смугу сигналу, не торкаючись всього іншого. Звичайний компресор в режимі де-ессер, з фільтром-еквалайзером в колі керування, обробляє всю смугу частот вхідного сигналу.

Він просто більш чутливий до виділеної області спектра. Відмінність де-ессера та де-поппера в тому, що де-ессер працює на високочастотних сигналах, прибираючи «цикання» та шепелявість. Де-поппер – навпаки, працює в низькочастотній області спектра, прибираючи «пихкання» та бубоніння. В іншому вони принципових відмінностей не мають.

Головна відмінність цих пристроїв від інших полягає в тому, що поріг спрацьовування в них не фіксований ручкою керування threshold, а «плаваючий». Тобто, він визначається різницею рівнів оброблюваної частини спектра, з одного боку, й всього іншого з іншого боку. Така побудова забезпечує нормальне їх функціонування незалежно від абсолютних рівнів вхідних сигналів. Де-ессер постійно аналізує спектр вхідного сигналу, й при перевищенні рівня сигналу у встановленій смузі допустимого значення, він зменшує рівень сигналів в цій смузі до допустимого встановленого користувачем.

Компресор / лімітер

Це звичайний компресор, який можна перевести в режим лімітера. Якщо ж потрібно й те, й інше, то при купівлі треба переконатися, що є хоча б один окремий регулятор для встановлення параметрів лімітування. Найчастіше, це регулятор порога спрацьовування лімітера limit. Хоча зустрічаються й інші назви – наприклад peak stop.

Крім описаних вище, існують й інші види компресорів: багатосмугові компресори, AGC-контролери і т. д.

Експандер та гейт

Експандер – це «компресор навпаки» (від англійського «to expand» – розширювати, розтягувати). У нього коефіцієнт передачі пропорційний рівню вхідного сигналу, тобто чим більший вхідний сигнал, тим більший вихідний. Існують два основні різновиди експандера – «експандер вгору» (upward expander) та «експандер вниз» (downward expander).

Відрізняються вони за характером реагування на вхідний сигнал. «Експандер вгору» обробляє тільки сигнали, що лежать вище порога його спрацьовування, роблячи гучні звуки ще більш гучними. У звукорежисерській практиці майже не використовується, як приклад можна навести лише гітарний «бустер».

«Експандер вниз», навпаки, не чіпає сигнали вище порога спрацьовування, а тільки робить тихіші сигнали, що лежать нижче цього порога. За характером своєї дії на сигнал цей пристрій схожий з гейтом, й, як правило, застосовується для аналогічних цілей: для приглушення слабких, але заважаючих сигналів. Завдяки якості, як «експандер вниз» входить складовою частиною практично в усі шумоподавлювачі (денойзери).

Органи керування у експандерах аналогічні компресору. Крім уже розглянутих, це регулятор порога спрацювання *threshold*, та регулятор ступеня розширення (експандування) *ratio*. Цей регулятор має маркування, зворотне компресорному. Він показує, на скільки децибел зміниться вихідний сигнал при зміні вхідного сигналу на 1 дБ. Тобто, якщо в компресорі *ratio* дорівнює 5:1, то при зміні рівня вхідного сигналу на 5 дБ вихідний сигнал зміниться на 1 дБ. В експандері *ratio* дорівнює 1:5, це показує, що при зміні вхідного сигналу на 1 дБ рівень вихідного сигналу зміниться на 5 дБ.

Гейт (від англійського *gate* – клапан, ворота) – один з поширених пристроїв динамічної обробки. Основне, початкове призначення гейта – відсічення сигналів малого рівня, для яких він є своєрідним клапаном, не пропускаючи їх на вихід. Гейт схожий на експандер, але тільки частково. Якщо в «експандері вниз» встановити *ratio* дорівнює 1: нескінченність, то він буде функціонувати як гейт. Експандер, навпаки, при всіх положеннях *ratio*, крім вищенаведеного, ніби стежить за сигналом, тобто він не має стійкого стану, його коефіцієнт передачі весь час змінюється (більший сигнал – більше підсилення, менший сигнал – менше підсилення). Гейт же має тільки два стійких стани: відкритий та закритий. А в моменти *attack* та *release* він просто переходить з одного стану в інший.

За своєю роботою гейт аналогічний формувачу обвідної в синтезаторах. Це такий же багатоступінчастий формувач обвідної плюс керований підсилювач, тільки запускається він не від натискання клавіші, а при перевищенні вхідним сигналом порога спрацювання гейта *threshold*.

Більшість гейтів мають відносно нескладний триступінчастий формувач обвідної, який формує три складових напруги керування – наростання *attack*, утримання *hold*, та плавного затухання *release* (рис. 7.35).

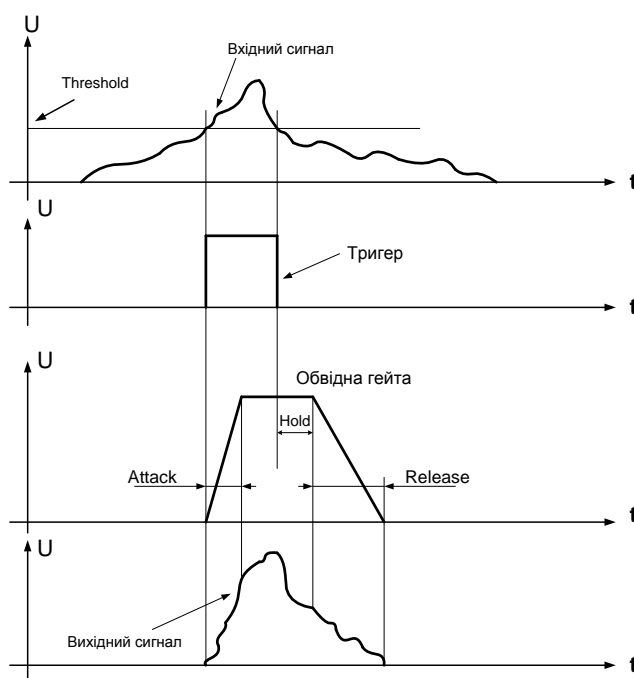


Рисунок 7.35 – Часові характеристики гейта

Ці фази звуку добре знайомі всім, хто має справу із синтезаторами. На рис. 7.35 зображено три сигнали – вхідний, сформована генератором гейта обвідна та результуючий вихідний сигнал внизу.

У момент перевищення вхідним сигналом порога спрацювання threshold (угорі) запускається спеціальний тригер, який, у свою чергу, запускає формувач обвідної гейта й той починає послідовно виробляти три складові керуючої напруги підсилювачем. У перший момент після запуску формується attack, потім зберігається досягнутий стан до моменту, коли вхідний сигнал стане менший порога спрацювання.

Після того, як вхідний сигнал стане менший threshold, тригер (trigger) змінює свій стан, й починають формуватися наступні дві частини обвідної. Під дією цієї напруги керований підсилювач змінює свій коефіцієнт підсилення та виходить результуючий (оброблений гейтом) вихідний сигнал рис. 7.35 (внизу).

Сигнали, що лежать нижче порога спрацювання, будуть повністю приглушені. Сигнали ж вище порога атаки залежатимуть від співвідношення їх вихідної швидкості та часу відкривання гейта, тобто результат може бути як більш різкий, так й більш плавний.

Властивість гейта змінювати динаміку сигналів й є тією причиною, через яку гейт отримав таке широке поширення. Основним застосуванням гейта є запис ударних інструментів – барабанів, тарілок і т. д.

Раніше звичний тепер гейт носив назву noise gate (нойз-гейт), при цьому малося на увазі, що головним його призначенням буде зниження шумів. Але досить швидко з'ясувалося, що «шумоподавляч» з гейта малоефективний. Краще для боротьби із шумами використовувати спеціально для цих цілей створені пристрої – денойзери.

Крім вищевказаних, в деяких, гейтах є й інші регулювання – наприклад, передзатримки delay, гістерезису, фільтрації і т. д.

Обов'язковою складовою частиною будь-якого, гейта є перебудовуванні обрізні НЧ та ВЧ-фільтри. У деяких моделях можна зустріти й гнізда для подачі зовнішніх сигналів запуску – ext. Key.

Призначення цих фільтрів та гнізд таке ж, як й в компресорі – зміна характеристик каналу керування. І точно так само вони не впливають на тембр самого сигналу. Причому, якщо в side chain компресора ставиться зазвичай еквайзер, то в гейтах ставляться саме вибірні фільтри, як правило перебудовуванні окремо для НЧ та для ВЧ.

Необхідність у них викликана, головним чином, специфікою застосування більшості гейтів – запису ударних. Інструменти цієї групи розташовані дуже близько один до одного, мають високу гучність, тому відокремити їх один від одного складне завдання. Наприклад, два близько розташованих мікрофони знімають звучання, один – барабана, інший – тарілки. За гучності їх не розрізнити, та й у різних місцях композиції вона може істотно різнитися.

Налаштовуємо фільтри в каналах керування гейтів цих двох мікрофонів таким чином, щоб гейт барабана сприймав тільки його основний тон, в області середніх частот, а гейт тарілки – тільки її ВЧ-складові. Проконтролювати точність налаштування фільтрів допоможе наявний в обов'язковому порядку в таких моделях перемикач key listen (прослуховування керуючого сигналу). Тепер, незалежно від гучності звучання того чи іншого інструмента, гейт буде керуватися тільки його сигналом, а інші для нього наче «невидимі»

Розглянемо тепер роботу всього циклу гейта. Що стосується початкової частини сигналу – атаки, то тут, як правило, особливих проблем не виникає. Вхідний сигнал наростає швидко, з гарним рівнем й гейт спрацьовує чітко. Зовсім інша картина на спаді сигналу. Затухання сигналів більшості інструментів не є рівним та плавним, а має хвилеподібний характер. Гейт в цей момент починає періодично перемикатися з відкритого стану в закритий, «смикатися». На слух цей ефект сприймається дуже неприємно.

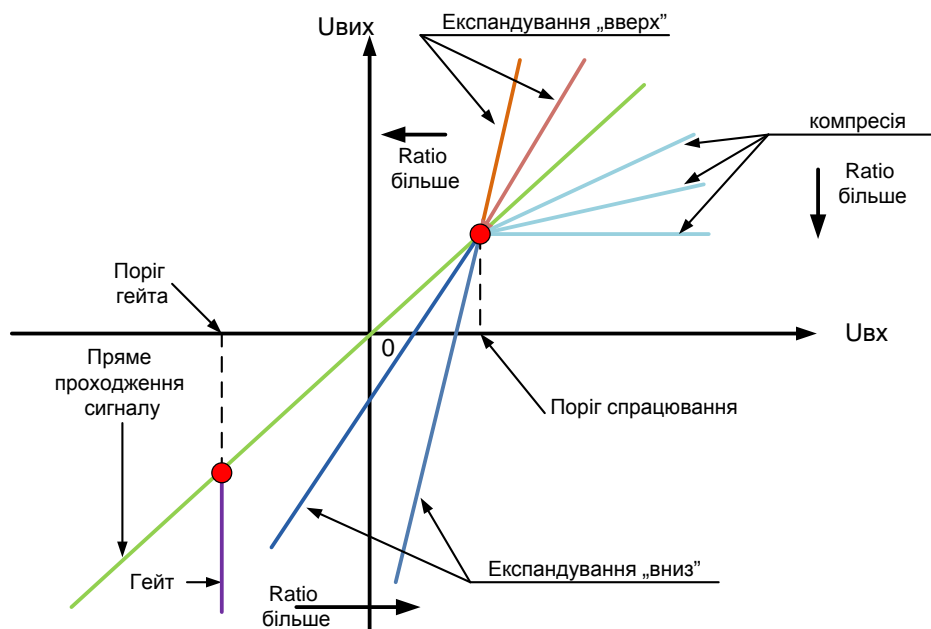


Рисунок 7.36 – Характеристики пристроїв динамічної обробки звукових сигналів

Частково впоратися з цією проблемою допомагає регулятор часу утримання hold, але тільки частково. Він лише затримує момент початку закривання гейта, але не позбавляє його повністю від нестабільності. Для цього застосовується особливий пристрій – тригер з гістерезисом. Це означає, що в такому гейті є два пороги спрацювання – один на відкривання, й один – на закривання, причому «поріг на закривання» – завжди менший, ніж на відкривання.

Наприклад, якщо встановлено гістерезис в 7 дБ, а поріг спрацьовування дорівнює +12 дБ, то гейт почне закриватися лише в тому випадку, якщо вхідний сигнал стане менший +5 дБ, а не +12 дБ, як у звичайному гейті. Це дозволяє забезпечити надійне, без коливань, закривання гейта та до того ж без затримки hold, необхідність у якій при цьому відпадає. В деяких моделях гейтів середнього цінового класу ця функція вже є вбудованою. Однак величина цього гістерезису встановлюється виробником, й його зміна користувачеві недоступна.

У деяких гейтах є режим з дивною назвою – *ducker*, або просто *duck*.

Історія появи цього терміна в точності не відома, а означає він інверсний режим роботи гейта, тобто при перевищенні вхідним (або керуючим) сигналом порога спрацьовування гейт не відкривається, а закривається. Цей режим може застосовуватися як спецефект, але основне його призначення в іншому – для зменшення рівня одного сигналу іншим, який в даному випадку відіграє роль керуючого.

Для цього керуючий сигнал (наприклад, голос) подається не на звуковий вхід гейта, а на його керуючий вхід *ext. key*. На звуковий же вхід подається той сигнал, рівнем якого треба керувати (наприклад, фонова музика). При появі на керуючому вході сигналу від голосу – гейт спрацьовує «навпаки», й гучність фонові музики зменшується. Таке використання гейта часто зустрічається на радіостанціях, в системах «Public Address», на телебаченні і т. д.

Для полегшення розуміння подібності та відмінності функціонування всіх пристроїв динамічної обробки на рис. 7.36 на одному графіку в суміщеному вигляді показані прохідні динамічні характеристики всіх розглянутих широкосмугових приладів.

Контрольні питання

1. Що таке об'єм звукового сигналу?
2. Для чого використовується регулювання рівня в звукотехніці?
3. У чому особливість шумоподавлювача з динамічним обмеженням шуму?
4. Призначення мікшерів у звукотехніці.
5. Для чого використовуються регулятори ширини бази, напряму та панорами у стереомовленні?
6. Які основні функції ревербераторів у звукотехніці?
7. Призначення пристроїв динамічної обробки сигналів у звукотехніці.

8 ЦИФРОВА ЗВУКОТЕХНІКА

8.1 Загальні положення

В сучасному звукотехнічному обладнанні, у всіх трактах каналу радіомовлення мовні сигнали значною мірою обробляються та передаються в цифровій формі.

У процесі перетворення аналогового сигналу в цифровий спочатку проводиться дискретизація сигналу в часі. Аналоговий сигнал, який можна подати у вигляді нескінченної кількості градацій амплітуд, перетворюється в дискретну форму, в множину різнорівневих імпульсів (вибірок), які розташовані з однаковими часовими інтервалами між собою (інтервал дискретизації). Точні значення амплітуд вибірок замінюються в межах кожного інтервалу дискретизації на наближені дозволені значення амплітуд відліків. Ця операція має назву квантування або дискретизації за рівнем. Кожному такому сформованому відліку відповідає деяке число – кодове слово, відбувається кодування, що є останнім етапом аналого-цифрового перетворення.

Таким чином, основними операціями, що використовуються при перетворенні аналогового мовного сигналу в цифровий, є дискретизація, квантування, кодування.

Розглянемо ці операції детальніше, звернувши увагу на деякі особливості їх застосування.

8.2 Дискретизація

Дискретизація неперервного у часі звукового сигналу – це процес формування з частотою дискретизації f_δ його миттєвих відліків. Частоту f_δ визначають за теоремою Котельникова: будь-який аналоговий сигнал з обмеженим верхньою частотою F_B спектром може бути правильно відновлений, якщо частота дискретизації відповідає умові $f_\delta \geq 2F_B$.

Під час обробки аналого-цифровим перетворювачем звукового сигналу на його вході обов'язково необхідно встановити ФНЧ з граничною частотою F_B . При ідеальній дискретизації за теоремою Котельникова не спостерігається втрата інформації при зворотному цифро-аналоговому перетворенні. Винятком буде зростання спотворень, які викликані обмеженням смуги частот звукового сигналу ФНЧ.

У випадку невдалого вибору частоти f_δ (рис. 8.1) у спектрі вихідного сигналу зворотного цифро-аналогового перетворювача з'являються нові складові, а первинні зникають. Це означає, що мовний сигнал буде значно спотворений.

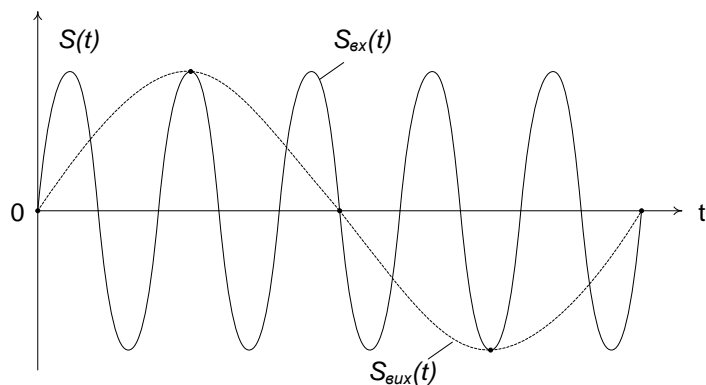


Рисунок 8.1 – Невдалий вибір частоти дискретизації

($S_{вх}(t)$ – вхідний сигнал АЦП з частотою $F_{вх}$; $S_{вух}(t)$ – вихідна напруга ЦАП з частотою $F_{вух}$; $f_d = 0,8F_{вх} = 4F_{вух}$)

Основним в аналого-цифровому перетворювачі є вузол вибірки-зберігання (рис. 8.2). Фази роботи вузла такі:

- 1) швидке, майже миттєве взяття відліку (ключ S замкнутий) через рівні проміжки часу $1/f_d$, конденсатор С дуже швидко заряджається;
- 2) утримання-зберігання дискретного значення сигналу незмінним до наступної вибірки, практично відсутня розрядка конденсатора С.

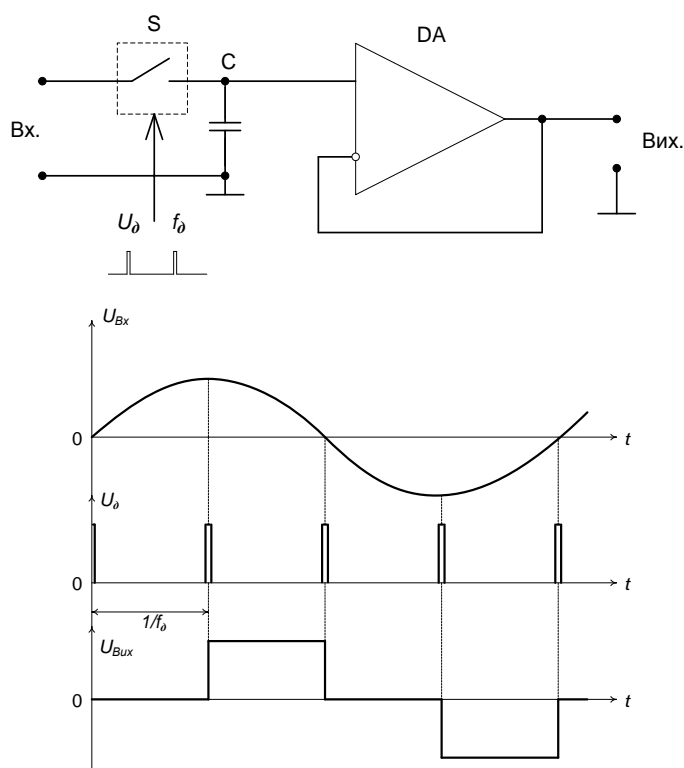


Рисунок 8.2 – Вузол вибірки-зберігання та діаграма його роботи

У звукотехніці та радіомовленні використовують звукові мовні сигнали різної якості. Відповідно частоти дискретизації вибираються залежно від класу сигналу. В табл. 8.1 наведені різні види сигналів, їх призначення та частоти f_{Δ} , що застосовуються при прямому та зворотному перетвореннях «аналог – цифра», «цифра – аналог».

Таблиця 8.1 – Характеристики мовних сигналів

Сигнал	Частотна смуга	Призначення	Частота дискретизації, f_{Δ}
Телефонний сигнал	0,3–3,4 кГц	Телефонія	8 кГц
Другого класу «6,4 кГц»	0,1–6,4 кГц	Радіомовлення в діапазонах ДХ, КХ	16 кГц
Першого класу «10 кГц»	0,05–10 кГц	Радіомовлення в діапазонах ДХ, СХ	32 кГц
Вищого класу «15 кГц»	0,03–15 кГц	Радіомовлення в діапазоні УКХ	32 кГц
Цифровий звуковий	0,02–20 кГц	Цифрове радіомовлення, цифрова звукотехніка	44,1; 48; 96 кГц

В деяких системах з метою оптимізації роботи обладнання, використовують інші частоти дискретизації.

8.3 Квантування

Під час квантування амплітуду кожного відліку, що отримані в процесі дискретизації, замінюють найближчим дозволеним значенням. Процедuru квантування можна розглядати як результат проходження вхідного сигналу через вузол або квантувач зі східчатою амплітудною характеристикою. Відстань між сусідніми дозволеними рівнями квантування має назву крок квантування Δ . Якщо крок $\Delta = \text{const}$, то квантування рівномірне (рис. 8.3, а), в протилежному випадку – нерівномірне (рис. 8.3, б).

У високоякісному звукотехнічному обладнанні та апаратно-студійному комплексі каналу радіомовлення, в якому основним критерієм оцінювання якості перетворень є мінімум спотворень, застосовується рівномірне квантування. Оптимально, з точки зору пропускнуої здатності, організувати роботу звукотехнічної, радіомовної апаратури та ліній зв'язку з використанням нерівномірного квантування.

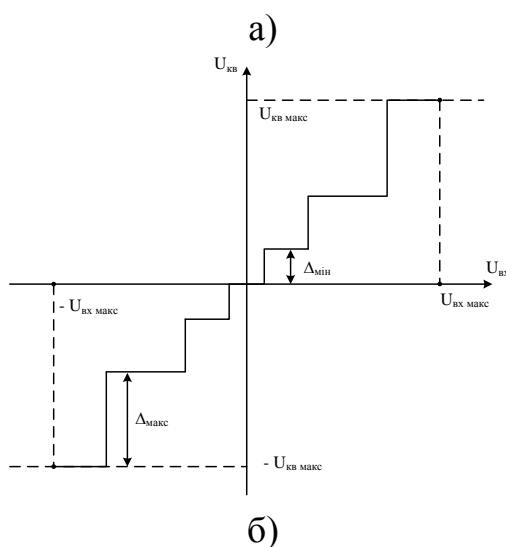
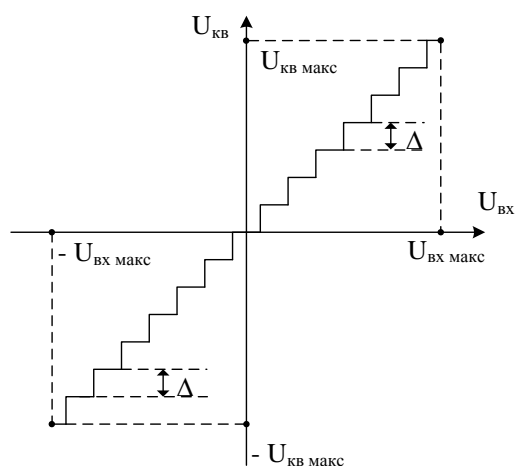


Рисунок 8.3 – Амплітудна характеристика квантувача
(а – рівномірне квантування, б – нерівномірне квантування)

Діапазон напруг вхідного сигналу від $-U_{\text{вхmax}}$ до $U_{\text{вхmax}}$ ділиться в двійковій арифметиці на 2^m інтервалів, де параметр m є розрядністю квантування. Постійний крок для рівномірного квантування визначається за формулою

$$\Delta = U_{\text{вхmax}} - (-U_{\text{вхmax}}) / 2^m = U_{\text{вхmax}} / 2^{m-1}.$$

Крок нерівномірного квантування залежить нелінійно від вхідної напруги квантувача.

Мінімальна кількість дозволених рівнів для аудіосигналів $n = 2^8 = 256$, тобто розрядність квантування $m = 8$. При цьому наявні значні спотворення. Таке перетворення допустимо в телефонії. З метою реалізації якісного звучання кількість дозволених рівнів n збільшують до $2^{16} = 65536$ або навіть до 2^{24} . Відповідно розрядність квантування зростає до $m = 16$ або 24.

Робота квантувача супроводжується появою шуму, який можна поділити на 3 складових: шуми обмеження, квантування та паузи.

Шум обмеження виникає при умові великих вхідних напруг $u_{ex} > U_{exmax}$ та визначається з виразу $\Delta u_{шобм} = u_{ex} - U_{exmax}$. Ця складова шуму може бути інтенсивною й суттєво впливати на якість аналого-цифрового перетворення. Встановленням перед квантувачем компресора та обмежувача миттєвої дії запобігають появі цього шуму.

З урахуванням попередніх розмов про необхідність встановлення перед аналого-цифровим перетворювачем ФНЧ або смугового фільтра схема увімкнення перед перетворювачем допоміжних вузлів або нормалізатора сигналу за частотою та амплітудою буде такою (рис. 8.4). ФВЧ разом з ФНЧ утворюють смуговий фільтр $F_H - F_B$.

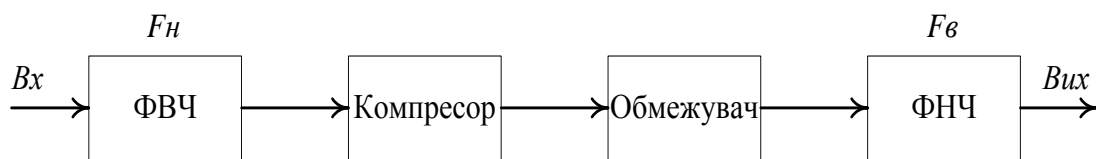


Рисунок 8.4 – Нормалізатор вхідного сигналу

Другою складовою шуму при умові, що $u_{ex} \leq U_{exmax}$, є шум квантування $\Delta u_{шкв} = u_{ex} - u_{кв}$.

Особливості цього шуму такі:

- а) потужність на одиничному опорі знаходиться за формулою $P_{шкв} = \Delta^2/12$ (рівномірне квантування);
- б) шум виникає тільки за наявності сигналу;
- в) спектр шуму рівномірний в смузі від 0 до $f_d/2$.

Третьою складовою є шум паузи, потужність якого має бути більшою за $\Delta^2/4$. Поява шуму обумовлена неідеальністю елементів, що входять до складу перетворювачів.

8.4 Спектри дискретизованого та квантованого аудіосигналу

Спектр дискретизованого та квантованого аудіосигналу стає нескінченним за частотою. Крім корисної складової в ньому присутні перша гармоніка з частотою f_d та її вищі гармоніки, навколо яких розташовуються бічні (рис. 8.5). Корисні складові сигналу знаходяться в смузі $F_H - F_B$. Вони виділяються при зворотному цифро-аналоговому перетворенні за допомогою ФНЧ. Нижні та верхні бічні знаходяться, відповідно, в смугах

$$nf_d - F_B \dots nf_d - F_H,$$

$$nf_d + F_H \dots nf_d + F_B,$$

де n – номер гармоніки.

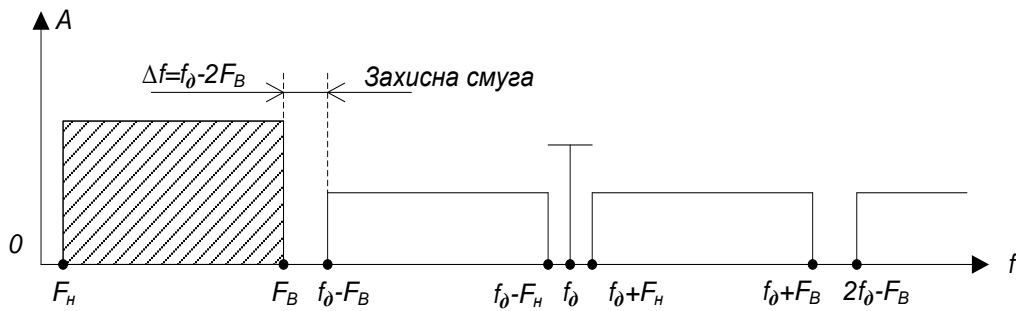


Рисунок 8.5 – Спектр дискретизованого та квантованого сигналу

У спектрі виділяємо захисну смугу, яка відокремлює корисний продукт перетворення від додаткових непотрібних складових (рис. 8.5). Вони можуть спотворити аудіосигнал на виході цифро-аналогового перетворювача.

При невдалому виборі частоти дискретизації $f_0 \leq 2F_e$ захисна смуга відсутня, спектри перехрещуються, якісне виділення первинного сигналу стає неможливим (рис. 8.6).

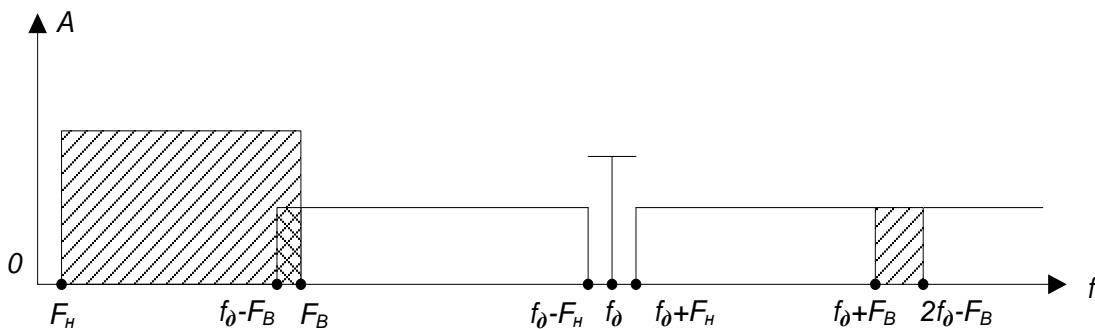


Рисунок 8.6 – Накладання спектрів

При відтворенні звукового компакт-диска частота $f_0 = 44,1$ кГц, а верхня частота звуку $F_e = 20$ кГц. Тоді захисна смуга

$$\Delta f_{\text{зах}} = f_0 - 2F_e = 44,1 - 2 \cdot 20 = 4,1 (\text{кГц}).$$

Послаблення спектральних складових нижньої бічної першої гармоніки з частотою f_d повинно бути не менше 70–80 дБ, тому для реалізації такої захисної смуги ФНЧ, що входять до складу перетворювачів, встановлюються фільтри високого порядку. Ця обставина суттєво ускладнює побудову прямого та зворотного перетворювачів.

З метою зменшення порядку ФНЧ в цифрових перетворювачах широко використовують штучний прийом збільшення захисної смуги – передискретизацію. Вона полягає в тому, що у прямому та зворотному перетворювачах застосовують свої власні частоти передискретизації $f_{nd} = n f_{\delta}$, де $n = 2, 3, 4, \dots$. На рис. 8.7 зображений спектр сигналу для $n = 2$. Захисна смуга значно зростає до

$$\Delta f = f_{nd} - 2F_B = 2(f_{\delta} - F_B).$$

Наприклад, у програвачах компакт-дисків вона збільшується до

$$\Delta f = 2 \cdot (44,1 - 20) = 48,2 (\text{кГц}).$$

Зрозуміло, що на виході цифро-аналогового перетворювача може бути встановлений ФНЧ невисокого порядку (рис. 8.7 – крива 2 замість кривої 1).

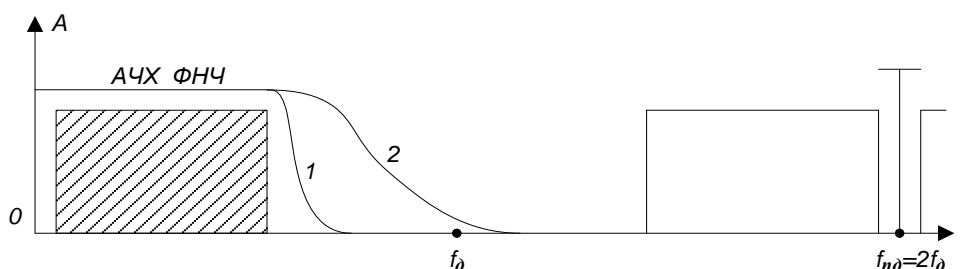


Рисунок 8.7 – Спектр передискретизованого сигналу та АЧХ ФНЧ

Передискретизація покращує співвідношення сигнал/шум вихідного сигналу, тому що потужність шуму квантування в смузі $0 \dots f_{\delta}/2$ зменшується.

Для реалізації передискретизації потрібно на виході прямого перетворювача встановити дециматор (рис. 8.8), який видаляє зайві відліки, а на вході зворотного перетворювача – інтерполятор, який штучно додасть необхідну кількість відліків.

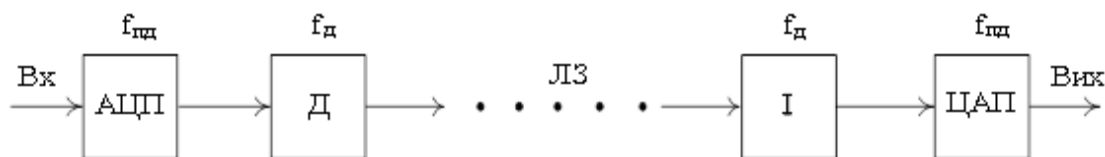


Рисунок 8.8 – Передискретизація (Д – дециматор, ЛЗ – лінія зв’язку, І – інтерполятор)

8.5 Динамічний діапазон цифрового аудіосигналу

Динамічний діапазон цифрового аудіосигналу визначається технічними параметрами та характеристиками прямого та зворотного перетворювачів. Як відомо, динамічний діапазон визначається за формулами

$$D = \frac{P_{\text{смакс}}}{P_{\text{смін}}}, D[\text{дБ}] = 10 \lg D.$$

Знайдемо вираз для динамічного діапазону аналого-цифрового перетворювача при рівномірному квантуванні та звернемо увагу на рекомендації щодо вибору меж зміни аудіосигналу на його вході.

Максимальна потужність сигналу $P_{\text{смакс}}$ залежить від значення напруги обмеження $U_{\text{вхмакс}}$ (рис. 8.3), а мінімальна потужність сигналу $P_{\text{смін}}$ дорівнює потужності шуму квантування $P_{\text{шкв}}$. Тоді динамічний діапазон буде визначено за співвідношенням сигнал/шум:

$$D = 10 \lg \frac{U^2}{\Pi^2 P_{\text{шкв}}},$$

де $\Pi = \frac{U_{\text{вхмакс}}}{U_{\text{смакс}}}$ – пік-фактор мовного сигналу;

$U_{\text{смакс}}$ – діюча напруга, яка відповідає максимально можливій амплітуді мовного сигналу $U_{\text{вхмакс}}$ на вході перетворювача. Значення пік-фактора реального аудіосигналу змінюється в межах від 7 до 25 дБ. Як було зазначено вище, максимальна амплітуда вхідного сигналу $U_{\text{вхмакс}} = \Delta \cdot 2^{m-1}$, а потужність шуму квантування $P_{\text{шкв}} = \frac{\Delta^2}{12}$. Підставивши ці вирази у формулу для динамічного діапазону, отримаємо

$$D = 10 \lg \frac{(\Delta \cdot 2^{m-1})^2}{\Pi^2 \cdot \frac{\Delta^2}{12}} = 10 \lg 3 + 20m \lg 2 - 20 \lg \Pi \approx 6m - 20 \lg \Pi + 4,8.$$

Зміна на одиницю розрядності квантування m збільшує або зменшує динамічний діапазон на 6 дБ.

Для синусоїдальної за формою вхідної напруги динамічний діапазон аналого-цифрового перетворювача становить

$$D_{\text{sin}} = 6m - 20 \lg \sqrt{2} + 4,8 = 6m + 1,8.$$

Якщо розрядність квантування $m = 16$, то $D_{sin} = 97,8$ дБ. З цього значення динамічного діапазону треба відняти приблизно 2 дБ додаткової похибки аналого-цифрового перетворення та 12 дБ, які враховують середній пік-фактор реального аудіосигналу. Для захисту перетворювача від можливої появи шуму обмеження динамічний діапазон зменшують зверху ще на 10 дБ (рис. 8.9). І, нарешті, щоб усунути різке зростання спотворень при квантуванні сигналу низького рівня та забезпечити маскування шуму квантування при зворотному перетворенні, динамічний діапазон знизу зменшують ще на 20 дБ.

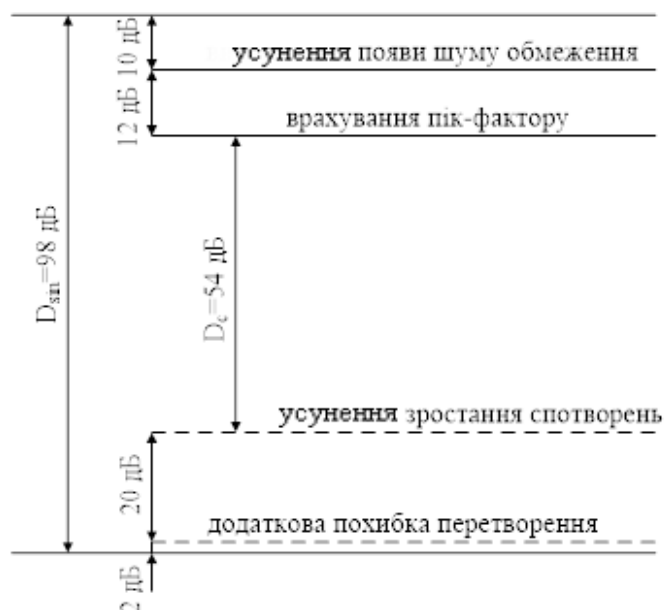


Рисунок 8.9 – Динамічний діапазон сигналу та аналого-цифрового перетворювача з розрядністю квантування $m = 16$

В результаті отримаємо, що динамічний діапазон аудіосигналу на вході цифрового тракту не має перевищувати

$$D_c = D_{sin} - 2 - 12 - 10 - 20 \approx 54(\text{дБ}).$$

Таким чином, динамічний діапазон звукового сигналу при записі на компакт-диск зменшується звукорежисером до 50 дБ, а динамічний діапазон сигналу каналового радіомовлення не перевищує 40 дБ.

Як відомо, динамічний діапазон звуків, що чує людина в умовах акустичного фону, не перевищує 100 дБ. Цифрове звукотехнічне обладнання з таким динамічним діапазоном можна реалізувати, якщо збільшити розрядність квантування. Результати, аналогічні наведеним, для $m = 24$ наведені на (рис. 8.10). Отриманий динамічний діапазон аудіосигналу на вході аналого-цифрового перетворювача відповідає високоякісному відтворенню.

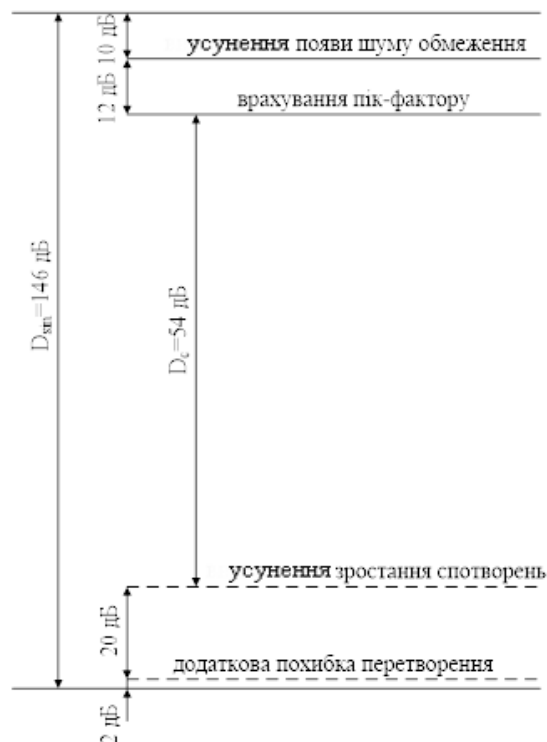


Рисунок 8.10 – Динамічний діапазон сигналу та аналого-цифрового перетворювача з розрядністю квантування $m = 24$

8.6 Нерівномірне квантування

Під час цифрової обробки звукового сигналу крім рівномірного використовується також нерівномірне квантування, в якому змінним є крок квантування. При слабких рівнях аналогового сигналу крок маленький й зростає, якщо підвищується рівень сигналу. Нерівномірне квантування дозволяє зменшити потрібну кількість розрядів у кодовому слові, тим самим знижується швидкість передачі цифрового потоку в лініях зв'язку звукотехнічних та радіомовних трактів.

Зростання кроку збільшує шуми квантування, тому, зі зміною від слабого до великого рівня аудіосигналу, при нерівномірному квантуванні спостерігається погіршення відношення сигнал/шум. Відношення сигнал/шум треба підтримувати таким, щоб у всьому діапазоні зміни рівня сигналу потужність шумів квантування була нижчою за поріг чутливості в умовах маскувальної дії самого сигналу.

Поширені два способи нерівномірного квантування: миттєве компаундування та майже миттєве компаундування.

Миттєве компаундування реалізується за схемою (рис. 8.11) послідовного увімкнення компресора (К) та вузла рівномірного квантування (ВРК). На боці приймача або відтворювача звукового сигналу для відновлення динамічного діапазону встановлюється експандер (Е), тобто застосовується компандерна схема.

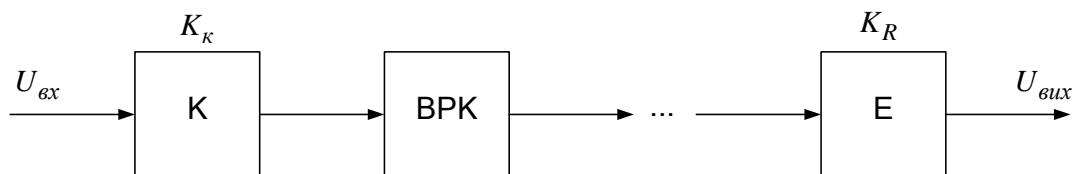


Рисунок 8.11 – Нерівномірне квантування

Амплітудна характеристика компресора наведена на рис. 8.12. Можна побачити, що рівномірне квантування з кроком Δ сигналу на виході компресора відповідає нерівномірному квантуванню звукового сигналу з кроком Δ_n .

Для компенсації спотворень звукового сигналу компресора амплітудна характеристика експандера (рис. 8.12, крива 2) повинна бути оберненою до амплітудної характеристики компресора, тобто коефіцієнти передачі компресора та експандера (рис. 8.11) пов'язані між собою співвідношенням:

$$K_k K_e = 1.$$

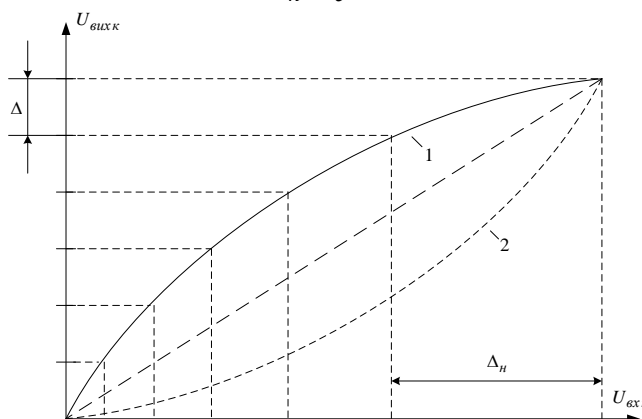


Рисунок 8.12 – Амплітудна характеристика компресора

У звукотехніці та радіомовленні, частіше за все, використовують характеристики компресії за μ - та A -законами. В сучасній апаратурі не встановлюють аналогові компандери, а замінюють їх на цифрові. В цифрових компандерах амплітудна характеристика компресора не плавна, а лінійноломана. Залежно від кількості сегментів або відрізків ліній амплітудні характеристики позначають буквами μ або A (закон компресії) та двома числами. Наприклад, амплітудна характеристика вигляду μ 15/11 означає, що $\mu = 15$ й реалізовано 11 сегментів.

Непогані характеристики нерівномірного квантувача проілюстровані рис. 8.13. Розрядність квантування зменшена до одинадцяти. Відповідно, знизилась швидкість цифрового потоку. Погіршення відношення сигнал/шум не впливає суттєво на якість відтворення, сигнал маскує збільшені шуми квантування.

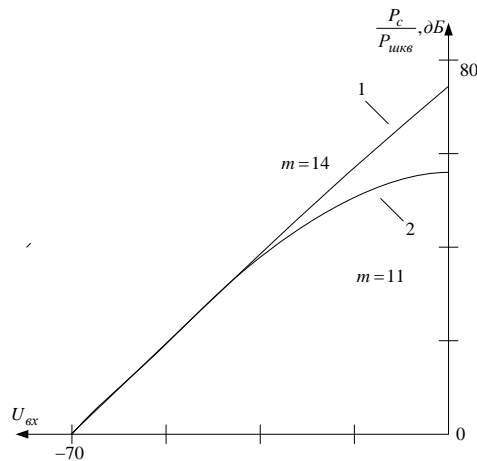


Рисунок 8.13 – Шумові властивості
(1 – рівномірне квантування, 2 – нерівномірне квантування)

При майже миттєвому компаундуванні використовуються декілька, наприклад п'ять, шкал рівномірного квантування. Вибір шкали відбувається за максимальним рівнем сигналу за певний час вибірки $T_в$, наприклад 1 мс.

Послідовність операцій майже миттєвого компаундування така:

- а) кодується звуковий сигнал з рівномірним квантуванням;
- б) запам'ятовуються вибірки перетвореного сигналу тривалістю $T_в$;
- в) у кожній з вибірок за максимальним рівнем сигналу визначається шкала квантування.

Схема цифрового компресора майже миттєвого компаундування (рис. 8.14) складається з вузла рівномірного квантування (ВРК) з лінійним кодером, оперативної пам'яті (ОП), цифрового перетворювача (ЦП), вузла керування (ВК) та об'єднувача (О). Після рівномірного квантування та кодування у ВРК вибірки двійкових слів запам'ятовуються в ОП. Для кожної вибірки вузол ВК визначає шкалу подальшого квантування (рис. 8.15 – п'яти-сегментна характеристика компресії). Якщо максимальна напруга вибірки звукового сигналу мала, то в ЦП відкидаються старші розряди (рис. 8.15, шкала 5), якщо велика, то відкидаються молодші розряди (шкала 1). Проміжні значення максимальної напруги скорочують двійкове слово відліку звукового сигналу за рахунок частини молодших та старших розрядів (шкали 2, 3, 4). Об'єднувач О додає до перетворених відліків звукового сигналу інформацію від вузла керування про номери шкал квантування у вибірках. Наприклад, якщо рівномірне квантування аудіосигналу здійснюється з розрядністю $m = 14$, то в компресорі майже миттєвого компаундування у кожному відліку відкидається по чотири розряди, тобто вихідна розрядність зменшується до $m_n = 10$ (рис. 8.14).

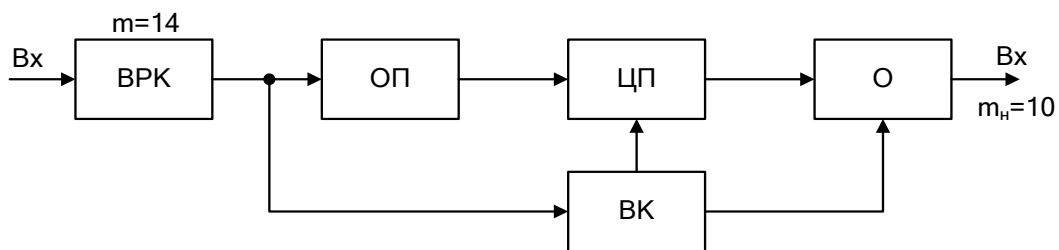


Рисунок 8.14 – Цифровий компресор

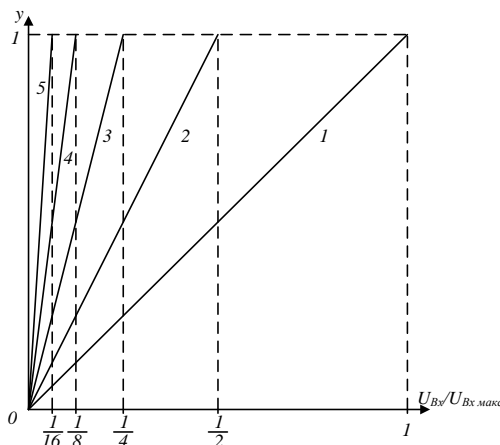


Рисунок 8.15 – Характеристики компресії при майже миттєвому компаундуванні

8.7 Завадостійке кодування

В процесі запису та відтворення цифрового «звуку», передачі його лініями зв'язку виникають помилки – разові та групові. Перші в молодших розрядах двійкових слів відліків можуть бути непомітні, в той час як у п'яти – шести старших розрядах разова помилка призводить до неприємного високочастотного клацання. Групові помилки найбільш помітні, тобто можуть значно спотворювати звуковий сигнал. При майже миттєвому компаундуванні необхідно виправляти помилки, які спостерігаються в розрядах, що несуть інформацію про шкали квантування.

Вважається, що для високоякісного відтворення звуку допустима поява не більше одного клацання на годину. Тому гранична ймовірність появи разової помилки визначається за формулою $p_{дон} = \frac{1}{f_{\delta} \cdot m \cdot 3600}$. Так для

частоти дискретизації 48 кГц й розрядності квантування 16, гранична ймовірність появи помилки дорівнює $3,6 \cdot 10^{-10}$. В реальних вузлах цифрових перетворень передачі звуку середня ймовірність появи помилки $10^{-4} - 10^{-6}$, що значно більша розрахованої ймовірності. Тому обов'язковим є застосування завадостійкого кодування, яке виявляє помилки, виправляє їх, але вносить надмірність, тобто зменшує швидкість передачі безпосередньо даних.

До основних завадостійких кодів, що застосовуються в звукотехніці та радіомовленні, відносяться блокові та згорткові коди. Серед блокових кодів можна виділити код Хемінга, лінійні циклічні коди БЧХ та подвійний Ріда–Соломона з перемежуванням (CIRC).

В блокових кодах інформація, що передається, поділена на блоки з однаковою кількістю символів або біт. Блоки складаються з даних та перевірних символів, останні формуються в результаті виконання певних лінійних операцій над символами даних.

Надмірність кодів БЧХ та CIRC становить 33 %.

При згортковому кодуванні формується безперервна послідовність символів без розділення їх на незалежні блоки. Одночасне використання згорткового та блокового кодування є ефективним у боротьбі із завадами у звукотехніці та радіомовленні.

Велика кількість помилок приводить до того, що завадостійкі декодери неспроможні правильно відтворити аудіосигнал. У цьому випадку на допомогу приходять інтерполятори, які замінюють пошкоджені дані про звуковий сигнал додатково розрахованими, наприклад, середньоарифметичними значеннями сусідніх непошкоджених відліків або значеннями, що плавно змінюються до нуля, та навпаки. Це дозволяє зменшувати та маскувати перед слухачами спотворення звуку.

Крім завадостійкого кодування в цифровій звукотехніці та радіомовленні використовується каналне кодування, основною задачею якого є перетворити цифровий потік в шумоподібний. Це дозволяє розмістити спектр сигналу в нормованій смузі частот, усунути появу в спектрі постійних та низькочастотних складових, спростити виділення при декодуванні тактової частоти, в цілому – покращити умови передачі цифрових сигналів.

Контрольні питання

1. Основні етапи аналого-цифрового перетворення.
2. Основні частоти дискретизації в радіомовленні.
3. Яка структурна схема нормалізатора вхідного сигналу для АЦП?
4. Наведіть спектри дискретизованого та квантованого сигналу.
5. Призначення передискретизації у цифровій звукотехніці.
6. Як визначити динамічний діапазон сигналу за m -розрядністю квантування?

9 КОМП'ЮТЕРНА ОБРОБКА ЗВУКУ

9.1 Формати звукових файлів

Програми, які вміють створювати та відтворювати файли певного формату, називаються кодеками (вони вміють кодувати та декодувати сигнали). З точки зору звичайного користувача, відтворює файли, звичайно, програвач (наприклад, Winamp). Програвач й є програмою, яка вміє за допомогою наявних у нього кодеків відтворювати файли певних типів.

Всі кодеки можна розділити на дві групи – без втрат (lossless) і з втратами інформації (lossy). Різниця між ними полягає в тому, наскільки точно звук, відтворений зі стисненого файлу, буде відповідати оригінальному звуку (з якого він створювався, наприклад – трек аудіодиска). У разі стиснення без втрат файл стає меншим, але його вміст після декодування абсолютно відповідає оригінальному файлу. До таких кодеків належать Monkey's Audio (Ape), FLAC – Free Lossless Audio Codec (Flac), WavePack (Wav) та ін. На відміну від них, в разі стиснення із втратами, звук, відтворений зі стисненого файлу, буде відрізнятися від оригінального. Ступінь цих відмінностей залежить від конкретного кодека та параметрів кодування. В цілому, чим більша якість стиснення, тим ближче буде «стислий» звук до оригінального, й тим більшим за розміром буде файл. До таких кодеків належать MPEG-1 layer 3 (Mp3) – найбільш поширений, Ogg – Vorbis (Ogg), Windows Media Audio (Wma) та інші.

Різні формати мають різні переваги та недоліки. Кодування без втрат забезпечує кращу якість звуку, але займає більше дискового місця й не підтримується більшістю стандартних носіїв – плеєрів. Стислі із втратами файли більше підходять для прослуховування в плеєрах, зберігання на комп'ютерах і т. п. Потрібно зазначити, що при нормальних параметрах кодування втрату якості, про яку ми говорили вище, більшість пересічних слухачів просто не помітять.

AUDIO. На один лазерний диск поміщається 74 хвилини звучання у форматі AUDIO. Такий диск може бути відтворений й на ПК, забезпеченому пристроєм CD-ROM (пристроєм для роботи з CD-дисками). У форматі AUDIO звук може зберігатися тільки безпосередньо на компакт-диску, для зберігання в комп'ютері (на жорсткому диску) цей формат не прийнятний. Незручністю аудіоформату також є те, що він, в основному, не може мати візуальної назви свого вмісту. Тобто, якщо на диску не зазначений перелік пісень й ви втратили супутній конверт, то дізнатися вміст диска можна, тільки прослухавши кожен трек.

Звук у форматі AUDIO можна записати за допомогою спеціальних програм на жорсткий диск комп'ютера, але при цьому комп'ютер перетворює формат AUDIO в формат WAV.

WAV. Перше – wav це не кодек, а контейнер, іншими словами, у файлі з розширенням wav можуть бути аудіодані, закодовані за допомогою різних кодеків. Проте, найбільш часто в таких файлах знаходиться аудіо у форматі PCM – це нестиснене аудіо, якість якого відповідає тому, що було записано на компакт-диску. Такі файли можуть відтворюватися різними плеєрами, але займають багато місця.

MP3. Найбільш поширений формат зберігання аудіоданих з втратами. Є кілька варіантів цього кодека, з яких для зберігання якісної музики краще підходить MPEG-1 Layer 3 або просто mp3.

У mp3 є режим об'єднання стерео (Joint Stereo), при якому пишуться не дві звукові доріжки окремо, а сума сигналів доріжок та їх різниця. Якщо дві доріжки містять багато однаковою інформації (а в музиці саме так і є, оскільки рідко коли по правому та лівому каналах йде абсолютно різний звук), то канал з різницею міститиме мало інформації, що призведе до істотного зменшення обсягу файлу. Таким чином, використання цієї опції може привести до зменшення розміру Mp3 файлу без зміни якості звуку.

Бітрейт – кількість інформації, що припадає на секунду звучання музики. Мінімальне значення параметра 32 кілобіти на секунду, максимальне – 320. Зрозуміло, що чим бітрейт більший, тим більше інформації, тим точніше звук відповідає оригіналу, але при цьому розмір файлу стає більшим. Для аудіофайлів мінімальним бітрейтом є 128 кбіт/с, хоча й це значення цінителі якості музики називають низьким. В силу того, що кодування аудіоінформації здійснюється невеликими фрагментами (фреймами) й формат дозволяє незалежно задавати параметри кодування кожного фрейма, є можливість дещо зменшити розмір файлу без втрати якості. Це визначається режимом обчислення та підтримки бітрейта – VBR, CBR та ABR. При CBR (Constant bitrate – постійному бітрейті) його значення задається користувачем й не змінюється, тобто, всі фрейми кодуються з однаковими параметрами. При використанні VBR (variable bitrate – змінний бітрейт) кожен фрейм може кодуватися зі своїми параметрами. При цьому можна задати мінімальне та максимальне значення бітрейта, якість кодування (тенденцію вибирати більший або менший бітрейт) та алгоритм вибору значень бітрейта. При ABR (average bitrate – середній бітрейт) користувачем задається середній бітрейт й при кодуванні даних різні фрейми кодуються таким чином, щоб у фіналі вийти на цей рівень.

OGG. Ogg – також, як й wave, контейнер, в який може бути упаковано аудіо у форматі ogg/vorbis. Кодек із втратами. За рядом характеристик вважається, що якість звуку, кодованого в Ogg Vorbis при тому ж розмірі файлу трохи вище, ніж якість Mp3. Кодек підтримується багатьма безкоштовними програвачами, в тому числі й вхідними в дистрибутив різних безкоштовних операційних систем, але через те, що багато плеєрів не вміють відтворювати його, не набув поширення більше, ніж Mp3 [8].

WMA. Windows Media Audio – формат зберігання аудіоданих, запропонований компанією Microsoft. Позиціонується як альтернатива Мр3. До переваг відноситься підтримка багатьма плеєрами [9].

AAC. Advanced Audio Coding – формат кодування з втратами, який забезпечує кращу якість звуку в порівнянні з Мр3 при рівних розмірах файлів. Малопоширений.

АС3. Формат зберігання аудіо з втратами, сумісний з форматом Dolby Digital (стереозвук). Застосовується для зберігання звукових доріжок на DVD – дисках.

9.2 Програмна обробка звуку на персональному комп'ютері

Існує безліч аудіоредакторів для запису та обробки звуку й вибір будь-якого з них безпосередньо залежить від цілей, які ви перед собою ставите. Однією з таких програм, призначених для обробки аудіо на професійному рівні, є Sound Forge фірми Sonic Foundry Inc. З її допомогою можна обробляти аудіосигнал, змінюючи його до невпізнання або ж редагувати невдало записану партію будь-якого музичного інструменту. Sound Forge успішно об'єднує у собі практично повний набір сучасних звукових ефектів та потужні засоби редагування звуків для наступного їх використання у семплері.

Семплер (англ. sampler) – електронний музичний інструмент, що дозволяє записувати, редагувати та відтворювати звуки. Його відмінність від інших електромозичних інструментів (ЕМІ), наприклад синтезаторів, полягає в тому, що замість осциляторів (генераторів хвиль) використовується записаний в пам'ять семпл (оцифрований звук), який розкладається по MIDI-клавіатурі, змінюючи висоту тону за заданими умовами. В наш час існує безліч таких пристроїв та їх віртуальних аналогів. Часто семплер є опцією або основою електронних музичних інструментів.

Вихід в середині – кінці 1980-х років загальнодоступних цифрових семплерів стимулював появу нових музичних напрямків, в першу чергу хіп-хоп, acid house, драм-н-бейс.

Sound Forge працює з будь-якою звуковою платою, яка має драйвери для Windows. Крім того, для роботи з оцифрованим звуком необхідно мати достатню кількість вільного місця на жорсткому диску (одна хвилина стереозапису з якістю компакт-диска займає близько 10 Мбайт).

Викликаються лінійки інструментів з головного меню (Options > Preferences > Toolbars). Відзначивши необхідні лінійки хрестиком, розмістіть їх по периметру вікна програми (рис. 9.1).

Далі виберіть драйвери вашої звукової плати для аудіозапису та відтворення (Options > Preferences > Wave), а також для MIDI (MIDI вхід та MIDI вихід), якщо ви збираєтеся використовувати Sound Forge разом із зовнішніми MIDI-пристроями або іншими програмами, що підтримують MIDI (Options > Preferences > MIDI > Sync).

Також можна встановити час попереднього перегляду різних звукових ефектів, які ви будете застосовувати (Options > Preferences > Previews). Можливість оцінити результат дії застосовуваного до звукового сигналу перетворення до повної обробки файлу значно заощадить ваш час при роботі з великими обсягами інформації. На практиці буває цілком достатньо 5–10 секунд.

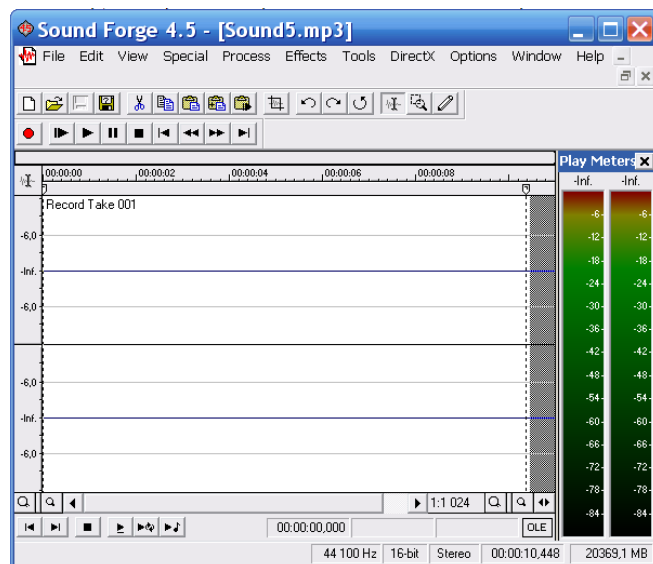


Рисунок 9.1 – Інтерфейс програми Sound Forge 4.5h

Відкриємо новий файл, виконавши команду File > New. При цьому з'явиться вікно з налаштуваннями режиму роботи, де можна вибрати розрядність та частоту вибірки АЦП.

Контроль над записом, відтворенням та перемоткою до початку й кінця файлу здійснюється керуючими кнопками, розташованими в правій верхній частині екрана, й вони нагадують відповідні кнопки побутового магнітофона. Для запису використовуємо мікрофон або будь-яке інше джерело сигналу, наприклад, магнітофон або CD-програвач, підключений до входу звукової плати. Рівень вхідного сигналу можна регулювати програмно за допомогою мікшера, вбудованого в Sound Forge (View > Mixer), стандартного регулятора рівня Windows або регулятора, що поставляється в комплекті зі звуковою платою.

Іноді паузу перед початком файлу потрібно залишити, особливо, якщо записаний трек був синхронізований з іншим додатком або зовнішнім MIDI-пристроєм. У цьому випадку потрібно позбутися всіх шумів, присутніх у паузі, виділивши її та виконавши команду Process > Mute.

Якщо сигнал слабо змінюється за гучністю (наприклад, якщо це звук електрогітари з ефектом Distortion), то корисно злегка обмежити його за рівнем для того, щоб уникнути можливих спотворень в процесі подальших перетворень. Для цього можна виконати команду Effects > Dynamics > Graphic та у вікні (рис. 9.3) скорегувати динамічну характеристику сигналу.

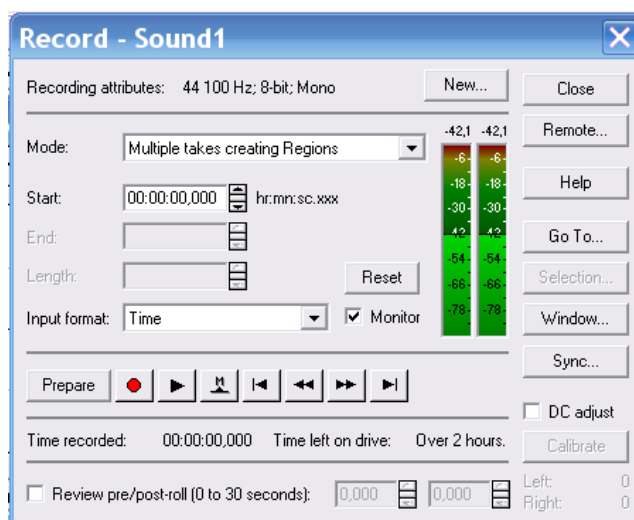


Рисунок 9.2 – Допоміжне меню

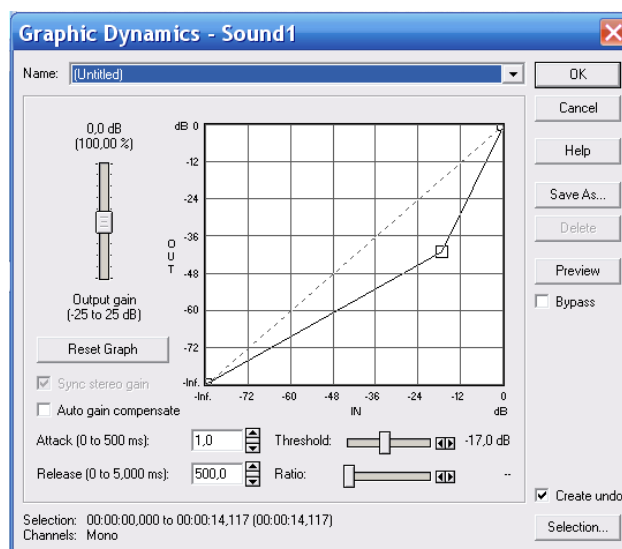


Рисунок 9.3 – Меню Effects > Dynamics

Наступною корисною та часто застосовуваною процедурою є обробка звуку еквайзером, що дозволяє додати звуку бажане темброве забарвлення. У Sound Forge є три основних типи еквайзера: графічний (Process > EQ > Graphic), параметричний (Process > EQ > Parametric) та комбінований (Process > EQ > Paragraphic). Параметричний та комбінований еквайзери дозволяють підсилити або приглушити вибрану вами смугу частот, графічний же 10-смуговий еквайзер дає більш гнучкий контроль над звуком та поданий у вигляді панелі звичайного аналогового еквайзера, з яким багато хто з вас напевно знайомі (рис. 9.4).

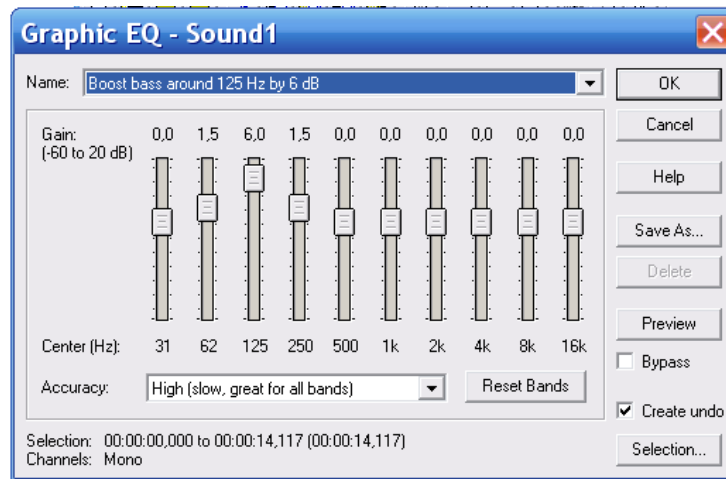


Рисунок 9.4 – Вікно графічного еквайзера

Додати звуку нові фарби та відтінки можна, застосувавши ефект під назвою Chorus (хорус). Chorus створює враження, що звучать два або декілька джерел сигналу одночасно. Це досягається шляхом додання до вихідного необробленого сигналу його копії, затриманої в часі (до 100 мілісекунд) та злегка зміненої по висоті. Для активізації хоруса виконайте команду Effects > Chorus та в меню виберіть будь-яке переустановлення або регулюйте параметри самостійно, змінюючи Input gain (рівень сигналу на вході), Dry out (рівень необробленого сигналу на виході), Chorus out (рівень обробленого сигналу на виході), Delay (затримка обробленого сигналу відносно вихідного), Modulation Rate (частота модулювання оброблюваного сигналу), Modulation Depth (глибина модуляції), Feedback (у відсотках вказується, яка частина обробленого сигналу піддається повторній обробці), Chorus size (кількість обробок вихідного сигналу ефектом). Для електрогітари, яка виконує соло, у багатьох випадках добре підходять такі значення: Input gain = 100 %; Dry out = 100 %; Chorus out = 33 %; Delay = 30 мілісекунд; Modulation Rate = 0,5 Гц; Modulation Depth = 8 %; Feedback = 15 %; Chorus size = 2. Перед тим, як застосувати ефект до всього файлу, можна попередньо оцінити його дію, натиснувши у допоміжному меню кнопку Preview.

Одним з найбільш часто вживаних звукових ефектів, є реверберація, яка використовується для додання звуку «об'єму» та для імітації акустичних умов різних типів приміщень (концертний зал, хол, невелика кімната і т. д.). Практично жоден сучасний музичний запис не обходиться без використання реверберації тією чи іншою мірою. Ефект реверберації оснований на затримці численних копій вихідного сигналу в часі. Sound Forge дозволяє працювати з вісьмома копіями, для кожної з яких можна незалежно задавати час затримки, амплітуду та розміщення в стереоспектрі. Затримані в часі сигнали імітують перші відбиття звукової хвилі від стін уявного приміщення й далі піддаються повторному перетворенню з параметрами Feedback,

Modulation Rate, Modulation Depth та Lowpass (фільтр високих частот). Повторне перетворення служить для імітації тисяч перевідбиттів звуку, в результаті чого стає неможливим почути якийсь окреме відлуння в певний момент часу. У підсумку після реверберації ми маємо дуже природний та насичений звук. Оскільки реверберація використовує складний алгоритм обробки, налаштування цього ефекту є одними з найскладніших в Sound Forge. Якщо ви не користуєтеся заданими переустановленнями, то вам доведеться витратити досить багато часу для того, щоб знайти потрібне звучання. Для виклику ефекту необхідно виконати команду Effects > Reverb та вибрати відповідне переустановлення, або зайнятися регулюваннями самостійно.

Далі можна застосувати до записаного звукового файлу такий часто використовуваний ефект, як Delay/Echo (Затримка-Ехо), який викликається командою Effects > Delay/Echo. Delay дозволяє імітувати відлуння та створює враження, що звук, який ви чуєте, лунає у великому приміщенні, в горах або ж, навпаки, в надзвичайно маленькій кімнаті.

На цьому основний обробіток аудіофайлу можна закінчити, якщо тільки ви не хочете домогтися чого-небудь екстраординарного.

Потрібно зазначити, що три описаних вище ефекти (Chorus, Reverb, Delay/Echo) є спорідненими, в їх основу покладено принцип затримки однієї або декількох копій вихідного сигналу в часі. Тому застосовувати всі ці ефекти відразу до одного звукового файлу далеко не завжди доцільно. Часто вистачає або одного з них, або поєднання двох, наприклад, Chorus > > Reverb. Звук не має в підсумку виявитися забитим численними відлуннями та незрозумілими шумами. Уважно прослуховуйте звуковий файл після кожної обробки й домагайтеся найкращого результату.

За допомогою наявних в Sound Forge засобів обробки можна легко реалізувати ефект поступового наростання гучності звучання на початку файлу або загасання гучності в його кінці. Достатньо лише виділити необхідну область звукової хвилі та виконати Process > Fade > In для отримання ефекту наростання гучності або Process > Fade > Out для її загасання. Зміни амплітуди сигналу протягом усього файлу можна задавати та графічно (Process > Fade > Graphic). Графічне подання дуже наочне й дає вам повну свободу творчості.

Описані вище звукові ефекти використовуються при обробці мало не кожного звукового файлу. Крім них, Sound Forge пропонує й безліч інших широкопоширених інструментів, які також дуже цікаві, але використовуються рідше. Це такі специфічні ефекти, як Reverse (Process > Reverse), що дозволяє відтворити звуковий фрагмент задом наперед, Pitch Bend (Effects > > Pitch > Bend), що змінює висоту звуку відповідно до заданої обвідної, Gapper/Snipper (Effects > Gapper > Snipper) – з його допомогою можна, наприклад, дати голосу людини механічні відтінки, Amplitude Modulation

(амплітудна модуляція – Effects > Amplitude Modulation), що дозволяє домогтися як повільного тремоло, так й незвичайних спотворень звуку, Distortion (Effects > Distortion) імітують перевантаження підсилювача і так далі.

Дуже корисною на практиці виявляється можливість прискорювати або сповільнювати звуковий фрагмент, не змінюючи при цьому його висоту (Process > Time Compress/Expand). Музиканти можуть «розгадувати» швидкі пасажі, уповільнюючи їх, або перевіряти, як будуть звучати в необхідному темпі музичні фрази, які вони не можуть ще зіграти досить швидко.

Ще один часто використовуваний та корисний ефект – це Noise Gate (Effects > Noise Gate). Він дозволяє позбутися від усіх шумів, присутніх в паузах, коли основний сигнал тимчасово відсутній. Суть ефекту в тому, що він прибирає всі звуки та шуми, амплітуда яких нижча заданого вами рівня.

Велику цінність програма являє й для тих, хто займається створенням звуків для подальшого їх використання в семплері. До складу Sound Forge входить такий потужний та зручний інструмент, як Loop Tuner, призначений для створення та редагування зацикленних в часі ділянок звуку (loop). Подібна техніка (looping) дозволяє домогтися як завгодно довгого звучання коротких звуків у семплері.

Звук, який в подальшому ви плануєте завантажувати в семплер, має мати максимально можливу амплітуду, яка не викликає спотворення сигналу. Для цього використовується операція, названа нормалізацією (Process > Normalize).

Зверніть увагу, що майже всі ефекти можна застосовувати не тільки до обох каналів відразу, але й до одного з них окремо. Обробка звукового файлу одним й тим же ефектом, який має на правому та лівому каналах різні установки, часто дає дуже цікавий результат (особливо, це відноситься до затримки та реверберації). Як правило, саме такій обробці, різній по каналах, й піддається в цей час музичний інструмент, який виконує соло. Ефекти, застосовані до лівого каналу, можуть зовсім відрізнятися від ефектів, застосованих до правого. Єдине обмеження – ваша фантазія. Не бійтеся експериментувати. У процесі роботи обережно поведіться з процедурою збереження, оскільки операція Undo (скасування) одноступінчата, тобто, скасовує лише останнє застосоване до файлу перетворення; якщо ви зайшли в обробці звуку занадто далеко та хочете повернутися на два-три кроки назад, то Undo вже не допоможе й доведеться знову відкривати початковий файл. Тому буває корисно зберігати кілька проміжних копій файлу.

Редактор Sound Forge 4.5h при установленні відповідної бібліотеки дозволяє безпосередньо редагувати стислі файли у форматі MP3. Найчастіше виконується редагування файлів у вихідному форматі WAV, а потім виробляється стиск (компресія).

Мінімальні суб'єктивні втрати якості кодованого в MP3 сигналу досягаються за допомогою врахування особливостей людського слуху. Один з використовуваних ефектів – це маскування слабкого сигналу одного частотного діапазону більш потужним сигналом сусіднього діапазону. Інший ефект полягає в тому, що потужний сигнал попереднього фрейму викликає тимчасове зниження чутливості вуха до сигналу поточного фрейма. Також враховується нездатність більшості людей розрізнити сигнали, які за потужністю лежать нижче певних рівнів, різних для різних частотних діапазонів. Ця технологія називається адаптивним кодуванням та дозволяє економити на найменш значущих з точки зору сприйняття людиною деталях звучання.

Ступінь стиснення сигналу визначається таким параметром, як бітрейт (bitrate). Цей параметр часто називають шириною потоку даних. Він визначає, скільки одиниць інформації потрібно для зберігання однієї секунди звучання стислої фонограми. Загальноприйнята одиниця вимірювання бітрейт – кілобіт на секунду (Кбіт/сек або kbs). Зауважимо, що для нестислих сигналів так само можна ввести поняття «Бітрейт», при цьому його значення легко розраховується за відомим параметром оцифровки – частотою дискретизації та розрядності коду (наприклад, для сигналу, оцифрованого з параметрами якості «компакт-диск» – 44100 Гц, 16 біт, стерео бітрейт визначається так: $44100 \times 16 \times 2 = 1411 \text{ kbs}$).

Потрібно пам'ятати, що кодування з високим бітрейтом потребує великих обчислювальних ресурсів.

Контрольні питання

1. Які основні формати аудіофайлів та їх особливості?
2. У чому полягає відмінність між форматами AUDIO (WAV) та Mp3?
3. Які основні звукові ефекти дозволяє реалізувати програма Sound Forge?

ЛІТЕРАТУРА

1. Радиовещание и электроакустика / [Выходец А. В., Гитлиц М. В., Ковалчин Ю. А. и др.] ; под ред. М. В. Гитлица. – М. : Радио и связь, 1989. – 432 с.
2. Ковалгин Ю. А. Стереофония / Ковалгин Ю. А. – М. : Радио и связь, 1982. – 234 с.
3. Урбанский Б. Электроакустика в вопросах и ответах / Урбанский Б. [пер. с польск.] под ред. М. А. Сапожкова. – М. : Радио и связь, 1981. – 248 с.
4. Атаев Д. И. Практические схемы высококачественного звуковоспроизведения / Д. И. Атаев, В. А. Болотников. – М. : Радио и связь, 1986. – 136 с.
5. Бурко В. Г. Бытовые акустические системы : эксплуатация, ремонт : справ. пособие / В. Г. Бурко, П. М. Лямин. – Минск : Беларусь, 1996. – 350 с.
6. Схемотехніка високоякісного звуковідтворення / [Сухов М. Є., Бать С. Д., Колосов В. В., Чупаков О. Г.]. – К. : Техніка, 1992. – 127 с.
7. Римский-Корсаков А. В. Электроакустика / Римский-Корсаков А. В. – М. 1973. – 272 с.
8. Ogg Vorbis – Режим доступа : http://uk.wikipedia.org/wiki/Ogg_vorbis (30.10.2016). – Назва з екрану.
9. WMA – Режим доступа : <http://uk.wikipedia.org/wiki/WMA> (22.03.13). – Назва з екрану.

Навчальне видання

**Кононов Сергій Павлович
Макогон Віталій Іванович**

ОСНОВИ РАДІОМОВЛЕННЯ ТА ЗВУКОТЕХНІКИ

Навчальний посібник

Рукопис оформлено В. І. Макогоном

Редактор В. Дружиніна

Коректор З. Поліщук

Оригінал-макет виготовлено С. Сідак

Підписано до друку 04.04.2018.

Формат 29,7×42¼. Папір офсетний. Гарнітура
Times New Roman.

Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 7,05.

Наклад 50 (1-й запуск 1–20) пр. Зам. № 2018-069.

Видавець та виготовлювач
інформаційний редакційно-видавничий центр.

ВНТУ, ГНК, к. 114.

Хмельницьке шосе, 95,

м. Вінниця, 21021.

Тел. (0432) 65-18-06.

press.vntu.edu.ua;

E-mail: kivc.vntu@gmail.com.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.